

Алгоритм распределения ресурсов при обслуживании VR-трафика в сетях Wi-Fi с применением C-OFDMA¹

Д. Ц. Хубаева^{*,**}, С. А. Тутельян^{*,**}

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

^{**} *Лаборатория интеллектуальных систем связи, Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)*

Поступила в редколлегию 01.10.2025 г. Принята 30.10.2025 г.

Аннотация—В современных беспроводных сетях непрерывно растет число пользователей и объем передаваемого трафика, что предъявляет строгие требования к пропускной способности и качеству обслуживания. Особенно высокие требования характерны для приложений виртуальной реальности, чувствительных к задержкам и потерям кадров. Увеличение числа точек доступа может потенциально повысить пропускную способность сети Wi-Fi, однако на практике это приводит к росту интерференции и снижению эффективности случайного доступа. В данной работе рассматривается подход, основанный на координации точек доступа по частоте с использованием метода C-OFDMA (англ.: Coordinated Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Предложен рекурсивный алгоритм распределения частотных ресурсов, учитывающий особенности VR-трафика и обеспечивающий гибкое использование радиоресурсов. В работе проводится сравнение существующих способов передачи данных в сети Wi-Fi с исследуемым методом при обслуживании VR-трафика. Использование предложенного алгоритма позволяет повысить производительность сети и увеличить число удовлетворенных пользователей до 90% по сравнению с иными методами передачи данных.

Ключевые слова: Виртуальная реальность, Wi-Fi, C-OFDMA.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_3_513

1. ВВЕДЕНИЕ

С ростом числа пользователей и объема передаваемого трафика сети Wi-Fi сталкиваются с возрастающими требованиями к пропускной способности. Особое место занимает трафик виртуальной реальности (англ.: Virtual Reality, VR). Он характеризуется высоким битрейтом, а работа VR-приложений требует обеспечения высокого качества обслуживания [1], включающего минимальные задержки и малую долю потерянных кадров. Однако с увеличением числа VR-пользователей пропускной способности сети Wi-Fi может оказаться недостаточно для обеспечения требуемого качества обслуживания.

Для обслуживания трафика приложений виртуальной реальности в сетях Wi-Fi предлагаются различные механизмы управления доступом к каналу [2]. Например, при использовании механизма Restricted Target Wake Time (R-TWT) часть времени работы канала резервируется для приоритетных передач [3]. Другим подходом является метод Preemptive Channel Access, в котором передача неприоритетных данных разделяется на фрагменты, между которыми предусмотрены интервалы времени для отправки приоритетных кадров [4]. Можно также отметить методы фильтрации трафика [5], которые также отдают приоритет трафику, чувствительному к задержке.

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00756

Помимо этого, повышение эффективности обслуживания VR-трафика может быть достигнуто за счет увеличения числа точек доступа (англ.: Access Point, AP): уменьшение расстояния между AP и пользователями потенциально позволяет повысить пропускную способность сети и снизить задержки передачи данных. Однако в реальности высокая плотность точек доступа приводит к росту интерференции сигналов при случайном доступе к каналу, что существенно ухудшает качество передачи. Альтернативным подходом может быть статическое разделение канала по частоте между точками доступа на непересекающиеся полосы, однако такое решение характеризуется низкой эффективностью использования спектра. Соответственно данные подходы не позволяют обеспечивать высокую пропускную способность при большом числе активных пользователей.

Для борьбы с указанными проблемами предлагаются способы координации точек доступа, одним из которых является метод C-OFDMA (англ.: Coordinated Orthogonal Frequency Division Multiple Access), который планируется включить в будущие версии стандарта Wi-Fi [6]. C-OFDMA является расширением OFDMA, в котором распределение частотных ресурсов координируется между точками доступа под управлением главной точки, назначающей ресурсы участникам сети. Подобная координация уменьшает число коллизий, свойственных методу случайного доступа, и обеспечивает динамическое распределение ресурсов между пользователями, что особенно важно для VR-приложений. Гибкость распределения важна, поскольку VR-трафик характеризуется переменным размером кадров и изменяющимися во времени требованиями к скорости передачи данных. Это позволяет адаптивно выделять частотные ресурсы и поддерживать стабильное качество обслуживания при изменяющейся нагрузке. Поэтому в данной работе ставится задача разработать алгоритм распределения ресурсных блоков в сетях Wi-Fi с использованием C-OFDMA, который обеспечивает передачу VR-трафика большому числу пользователей при сохранении требуемого качества обслуживания.

Структура статьи организована следующим образом. В главе 2 представлен обзор литературы, посвященной исследованиям метода C-OFDMA. Глава 3 описывает принцип передачи данных с использованием C-OFDMA. В главе 4 формулируется математическая постановка задачи распределения ресурсов, а в главе 5 приводится рекурсивный алгоритм ее решения. В главе 6 представлены и проанализированы результаты моделирования, а глава 7 содержит выводы из работы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературе активно исследуются подходы, основанные на разделении частотных ресурсов, направленные на повышение эффективности использования радиоресурсов в сетях Wi-Fi. В работах [7, 8] рассматривается задача распределения ресурсов в сетях Wi-Fi при обслуживании обычного пользовательского трафика без жестких требований к задержке с использованием метода OFDMA. В работе [7] предложен жадный алгоритм распределения ресурсов, в [8] представлен рекурсивный подход. Однако данные алгоритмы либо не предусматривают координацию точек доступа, либо ограничиваются рассмотрением единственной точки доступа. Кроме того, в данных исследованиях не учитываются особенности трафика VR, такие как высокая чувствительность к задержкам и значительный объем передаваемых данных.

В обзорной статье [9] представлены различные методы координации точек доступа, включая C-OFDMA с различными стратегиями назначения ресурсов, однако в исследовании не рассматривался трафик VR. В работе [10] подробно анализируется метод C-OFDMA, его преимущества по сравнению с другими методами координации, а также с существующими механизмами передачи данных в Wi-Fi. В статье приведен алгоритм распределения ресурсов между пользователями, основанный на статическом разделении канала на ресурсные блоки.

Подобное решение ограничено по гибкости, поэтому не обеспечивает требуемого качества обслуживания при передаче VR-трафика.

В статье [11] рассматривается метод, основанный на использовании C-OFDMA, направленный на повышение эффективности обслуживания VR-трафика. В представленном сценарии сеть включает одну точку доступа, а пользователи могут осуществлять прямой обмен данными между собой, используя вторичный канал. Однако в подобном сценарии обслуживается небольшое количество пользователей виртуальной реальности — рассматривается один VR-поток между двумя пользователями.

Таким образом, C-OFDMA для обслуживания VR-приложений в сетях Wi-Fi исследовался преимущественно в упрощенных сценариях, не отражающих особенности высоконагруженных сетей или специфику VR-трафика, хотя данный метод обладает рядом свойств, важных для удовлетворения пользователей VR — гибкостью распределения частотных ресурсов и снижением конкуренции за канал. В связи с этим в настоящей работе рассматривается задача распределения ресурсов при обслуживании VR-трафика в сети Wi-Fi.

3. ПЕРЕДАЧА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА C-OFDMA

Передача данных с использованием метода C-OFDMA выполняется главной точкой доступа. Она назначает ресурсы для пользователей системы и передает их в триггер-кадре (англ.: Trigger Frame, TF) точкам доступа. Также TF содержит момент окончания передачи информации. После успешного получения триггер-кадра все AP, указанные в нем, начинают передачу данных, которые содержат общий заголовок физического уровня (англ.: PHY header), полезную информацию, неинформационные символы (англ.: padding) для обеспечения одинаковой длительности передачи и TF для отправки кадра подтверждения (англ.: ACK) от пользователей (см. рис. 1).

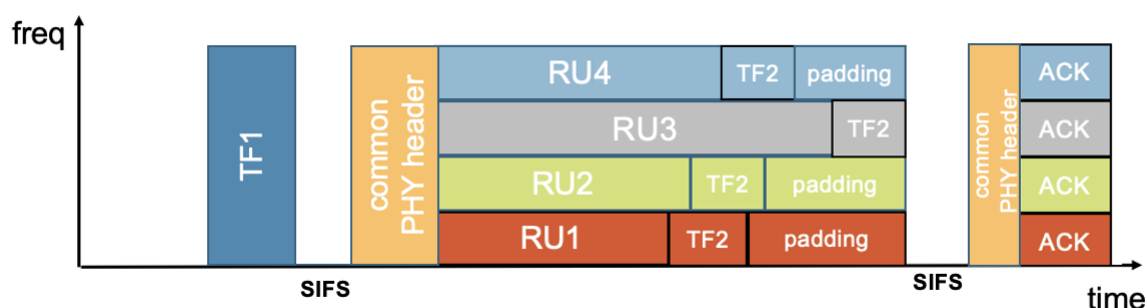


Рис. 1. Передача с помощью метода C-OFDMA

В OFDMA единицами планирования выступают ресурсные блоки (РБ), которые назначаются в триггер-кадре, передаваемом главной точкой доступа. Доступный частотный диапазон канала делится на ресурсные блоки различной ширины, при этом их структура носит иерархический характер и определяется общей шириной канала. Например, каналу шириной 80 МГц соответствует ресурсный блок, включающий 996 поднесущих, который может быть разделен на два блока по 484 поднесущие. Такое деление продолжается вплоть до минимального ресурсного блока, содержащего 26 поднесущих. Таким образом, каждый РБ, не являющийся минимальным, может быть представлен как совокупность двух блоков меньшего размера, а в

некоторых случаях — трех, где средний блок включает 26 поднесущих. Для определенности крайние блоки будем называть левым и правым.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу распределения ресурсов при применении C-OFDMA в нисходящем канале. Требуется для заданного набора пользователей S выделить ресурсные блоки из множества всех ресурсных блоков R для заданного канала и сигнально-кодовые конструкции (СКК) из множества всех СКК L . Для этого вводится функция полезности U , которая показывает качество построенного распределения ресурсов:

$$U(Y) = \sum_{(s,r,l) \in Y} \lambda(s,r,l), \quad (1)$$

где Y — набор назначений (s, r, l) : s — номер пользователя на передачу ($s \in S$), r — индекс ресурсного блока из множества R , l — СКК из множества L ; $\lambda(s, r, l)$ — функция, показывающая качество решения для выбранных назначений (s, r, l) .

Главная точка доступа решает задачу максимизации функции полезности:

$$\max_{Y \in \mathbb{G}} U(Y) = \max_{Y \in \mathbb{G}} \sum_{(s,r,l) \in Y} \lambda(s,r,l), \quad (2)$$

где $\mathbb{G}$ — множество распределений, подчиняющихся следующим требованиям:

$$\forall (s_1, r_1, l_1), (s_2, r_2, l_2) \in Y \Rightarrow s_1 \neq s_2, \quad (3)$$

$$\forall (s_1, r_1, l_1), (s_2, r_2, l_2) \in Y \Rightarrow r_1 \neq r_2, \quad (4)$$

где требование (3) значит, что одному пользователю может быть только одно назначение; (4) — на ресурсный блок не может быть назначено более одного пользователя.

5. АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСНЫХ БЛОКОВ

Для распределения частотных ресурсов между пользователями предлагается использовать модифицированную версию рекурсивного алгоритма, представленного в работе [8], адаптированную к условиям решаемой задачи. Главная точка доступа обладает информацией о пользователях, для которых имеются данные на передачу и информацией о состоянии каналов пользователей. На основании этих данных для каждого пользователя выбирается сигнально-кодовая конструкция (СКК) с учетом условий радиоканала, что обеспечивает эффективное использование доступных частотных ресурсов.

Алгоритм осуществляет рекурсивный обход дерева ресурсных блоков с применением стратегии обхода в глубину. Размеры минимальных (листовых) ресурсных блоков варьируются для нахождения распределения с максимальной функцией полезности. На первом шаге рассматривается наибольший ресурсный блок, соответствующий корневому узлу дерева. На k -м шаге рекурсии главной точке доступа известен текущий список пользователей, имеющих данные на передачу, а также распределение ресурсных блоков, полученное для уже рассмотренных узлов дерева. В рамках k -ого шага рассматривается ресурсный блок r .

Для ресурсного блока r выбирается пользователь s , для которого значение $\lambda(s, r, l)$ является максимальным. После этого формируется распределение ресурсных блоков Y_1 , содержащее данное назначение. При выборе пользователя производится обновление мощности передачи для точки доступа, ассоциированной с выбранным пользователем: мощность перераспределяется между ее пользователями пропорционально размерам ресурсных блоков, назначенных

данным пользователям в текущем распределении. После обновления мощностей на передачу при необходимости обновляется СКК.

Далее рассматриваемый ресурсный блок разделяется на левый и правый подблоки, для каждого из которых последовательно формируются распределения Y_{left} и Y_{right} . При этом существует два способа распределения: сначала строится Y_{left} , затем — Y_{right} , или сначала Y_{right} , затем — Y_{left} . Полученные результаты объединяются в совокупные распределения Y_2 и Y_3 соответственно.

Для Y_1 , Y_2 и Y_3 вычисляются соответствующие функции полезности U_1 , U_2 и U_3 . Результатом работы алгоритма на k -м шаге является распределение, обеспечивающее максимальное значение функции полезности. Иными словами, на каждом шаге рекурсии алгоритм выбирает, что является оптимальным — назначить рассматриваемый ресурсный блок одному пользователю или разделить частотный ресурс на две части и выделить их двум подмножествам пользователей. Итоговым результатом работы алгоритма является распределение Y_{best} с наибольшим значением функции полезности. Условием выхода из рекурсии является либо отсутствие пользователей, имеющих на текущем шаге данные на передачу, либо достижение минимального размера ресурсного блока.

В качестве функции λ был взят планировщик M-LWDF (англ.: Modified Largest Weighted Delay First) [12]. M-LWDF нацелен на учет срока доставки кадра, что существенно для VR, и на справедливое распределение радиоресурсов сети. При использовании M-LWDF, функция $\lambda(s, r, l)$ вычисляется следующим образом:

$$\lambda(s, r, l) = \left[\frac{c(s, Y)}{Q(s)} \right] \cdot \left[\frac{-\log e(s) \cdot d(s)}{D(s)} \right], \quad (5)$$

где $c(s, Y)$ — текущая скорость передачи данных на пользователя s при выбранном наборе Y ; $Q(s)$ — средняя скорость передачи данных на пользователя s ; $d(s)$ — текущая задержка головного пакета пользователя s ; $D(s)$ — порог задержки для пользователя s , при достижении которого кадр отбрасывается; $e(s)$ — порог потерь.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

6.1. Параметры системы и расположение устройств

Для исследования эффективности предлагаемого алгоритма распределения ресурсных блоков при использовании C-OFDMA пользователям VR в сетях Wi-Fi была построена имитационная модель сети Wi-Fi в среде моделирования ns-3 [13]. Параметры моделирования сети указаны в таблице 1.

Таблица 1. Используемые параметры

Кадровая частота VR	90 кадров на поток
Ограничение на задержку кадра VR	50 мс
Модель канала	Model-B [14]
Ширина канала	160 МГц
Центральная частота	5 ГГц
Количество антенн на устройствах	1
Битрейт VR-трафика	80 Мбит/с или 60 Мбит/с

Частота кадров составляет 90 кадров в секунду для каждого глаза, что соответствует передаче стереоизображения. В модели использованы характеристики, основанные на поведении реальных VR-устройств, описанные в работе [1]. Пользователь считается удовлетворенным,

если доля потерянных кадров не превышает 1%. Кадр считается потерянным, если он не был полностью получен за 50 мс [1].

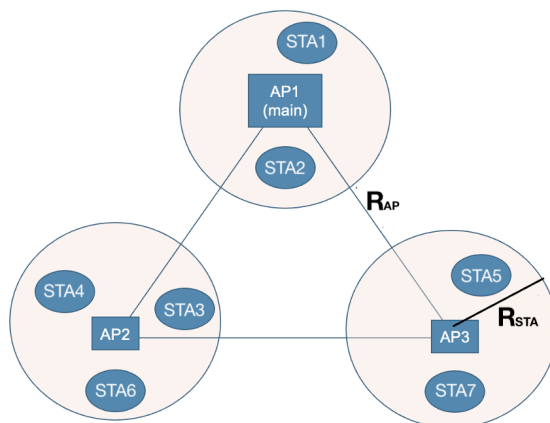


Рис. 2. Сценарий расположения устройств

В данной работе рассматривается следующий сценарий расположения устройств сети: точки доступа расположены в вершинах правильного многоугольника со сторонами R_{AP} и вокруг каждой из них равномерно распределены пользователи. R_{STA} — максимальное расстояние от пользователя до точки доступа (см. рис. 2).

В работе проводится сравнение эффективности работы:

- метода случайного доступа к каналу шириной 160 МГц, при котором точки доступа независимо осуществляют доступ к среде, а передача выполняется пользователем с наибольшей метрикой M-LWDF («Edca»);
- метода статического разделения канала по частоте, при котором доступная полоса частот разделяется на диапазоны, закрепленные за разными точками доступа, а пользователь на передачу выбирается по метрике M-LWDF («Static»);
- метода C-OFDMA с разделением частотного диапазона на ресурсные блоки одинакового размера, каждый из которых назначается наиболее подходящему пользователю («CofdmaEqual») [10];
- метода C-OFDMA с предложенным в данной работе рекурсивным алгоритмом распределения ресурсов («CofdmaRecursive»).

6.2. Результаты

На рис. 3 приведена зависимость количества удовлетворенных пользователей от максимального расстояния между пользователем и точкой доступа при 4 точках доступа, битрейте 80 Мбит/с и $R_{AP}=30$ м. Согласно результатам, метод «CofdmaRecursive» обеспечивает прирост числа удовлетворенных пользователей до 87% по сравнению с «Static» и «CofdmaEqual», и до 167% относительно «Edca». На рис. 4 приведена аналогичная зависимость при 4 точках доступа, битрейте 60 Мбит/с и $R_{AP}=30$ м. Из графика видно, что «CofdmaRecursive» демонстрирует выигрыш над «CofdmaEqual» до 67%, над «Static» и «Edca» — до 100%. Преимущество над другими рассматриваемыми методами достигается благодаря значительному сокращению числа коллизий, характерных для случайного доступа. Также обеспечивается более гибкое распределение частотных ресурсов по сравнению со статическим разделением канала или использованием C-OFDMA с равномерным делением частотного диапазона, что позволяет избежать

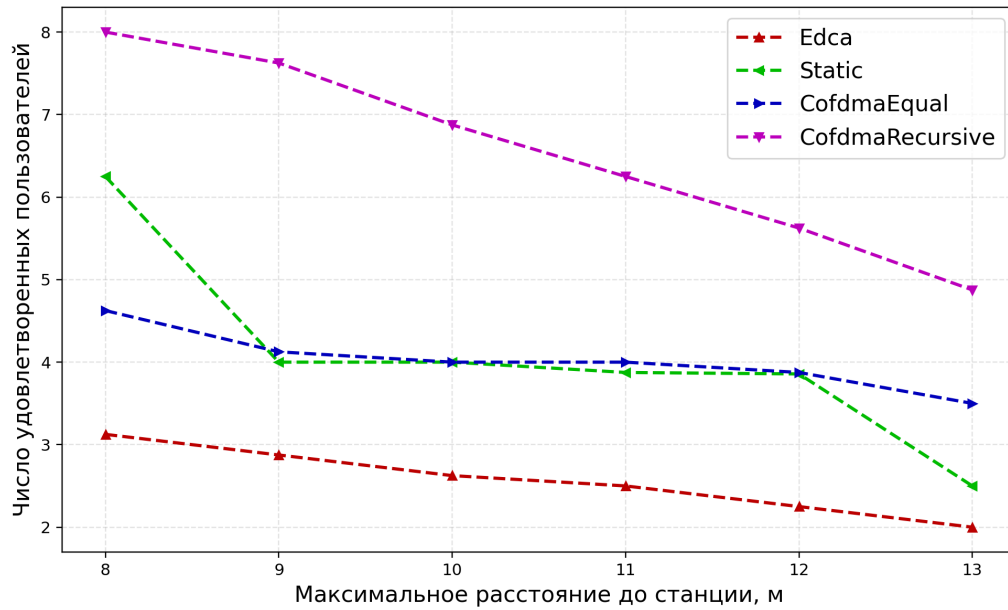


Рис. 3. Количество удовлетворенных пользователей от максимального расстояния до пользователей при VR-битрейте 80 Мбит/с

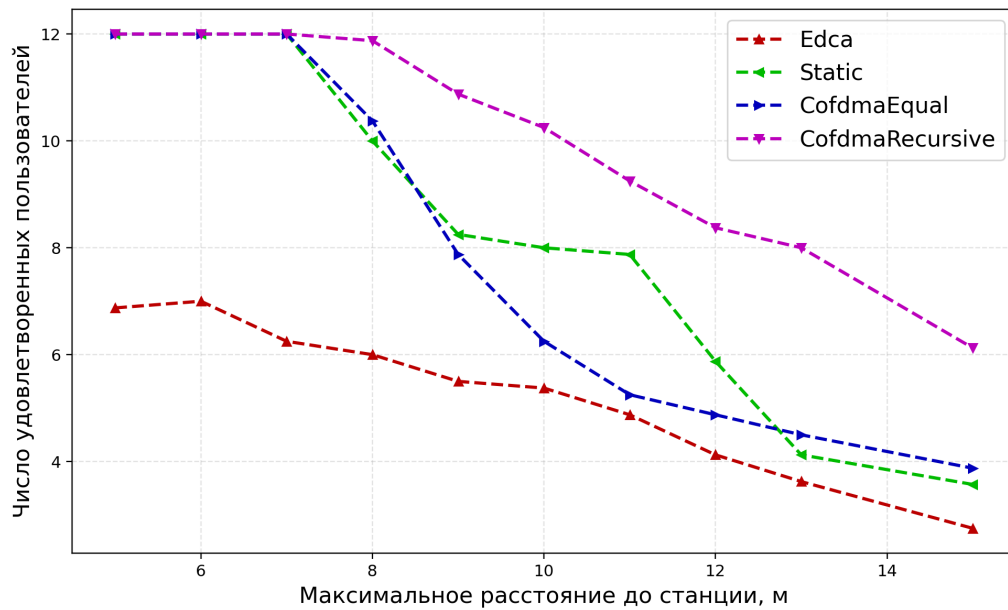


Рис. 4. Количество удовлетворенных пользователей от максимального расстояния до пользователей при VR-битрейте 60 Мбит/с

простаивания части спектра и повысить эффективность его использования при изменении числа активных пользователей и условий передачи. В результате достигается требуемое качество обслуживания и повышается устойчивость работы сети при увеличении нагрузки. На рис. 5, 6 представлены зависимости квантиля 99% задержки от количества пользователей при битрейтах 80 Мбит/с ($R_{STA}=10\text{м}$) и 60 Мбит/с ($R_{STA}=13\text{м}$) соответственно. «CofdmaRecursive» способен поддерживать передачу с заданным ограничением для большего числа пользователей. Так, например, по сравнению с «CofdmaEqual», «CofdmaRecursive» удовлетворяет тре-

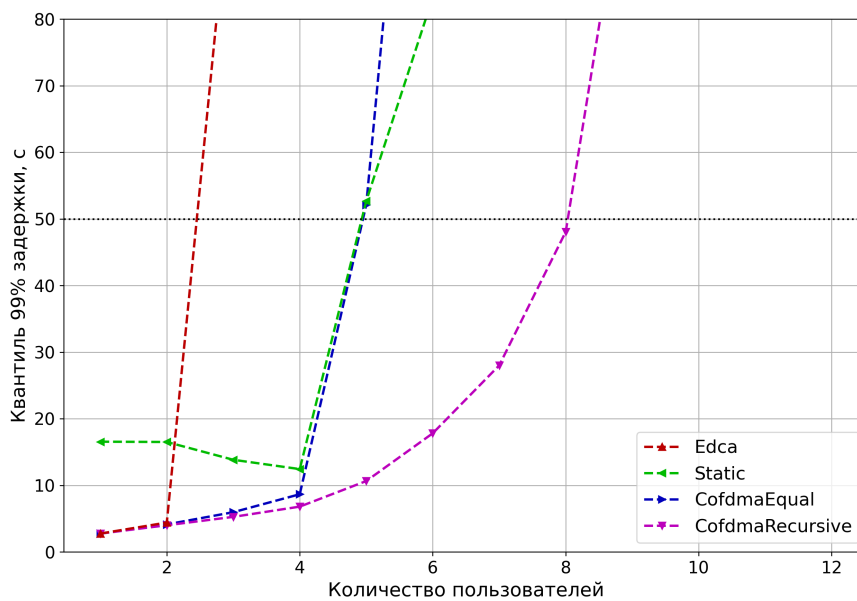


Рис. 5. Количество удовлетворенных пользователей от максимального расстояния до пользователей при VR-битрейте 80 Мбит/с

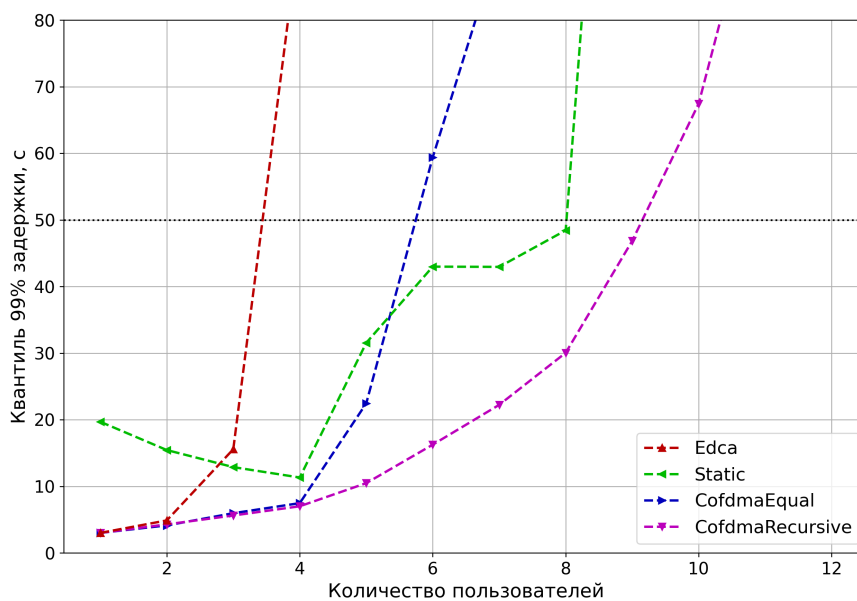


Рис. 6. Количество удовлетворенных пользователей от максимального расстояния до пользователей при VR-битрейте 60 Мбит/с

бованиям по задержке примерно для вдвое большего количества пользователей. Кроме того, у предложенного решения рост задержек с увеличением количества пользователей не такой

резкий, как у остальных рассматриваемых методов передачи, что позволяет поддерживать стабильное качество обслуживания при повышении нагрузки на сеть.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована эффективность обслуживания VR-трафика в сетях Wi-Fi с применением метода C-OFDMA. Предложен алгоритм распределения ресурсов, в котором учитываются требования к малой задержке кадров. Для оценки его эффективности проведено сравнение с некоторыми подходами, описанными в литературе. Результаты моделирования показали, что использование разработанного алгоритма повышает производительность системы при обслуживании VR-трафика: число удовлетворенных пользователей увеличилось до 90% по сравнению с другими методами передачи данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. How to Model Cloud VR: An Empirical Study of Features That Matter / Korneev Eugene, Liubogoshchev Mikhail, Bankov Dmitry, and Khorov Evgeny // IEEE Open Journal of the Communications Society. — 2024.
2. Adame Toni, Carrascosa-Zamacois Marc, Bellalta Boris. Time-sensitive networking in IEEE 802.11 be: On the way to low-latency WiFi 7 // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 15. — P. 4954.
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. Modeling of Preemptive Channel Access in Wi-Fi Networks / Riterman AV, Bankov DV, Lyakhov AI, and Khorov EM // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 4. — P. 327–343.
5. Performance comparison of IEEE 802.1 TSN time aware shaper (TAS) and asynchronous traffic shaper (ATS) / Nasrallah Ahmed, Thyagaturu Akhilesh S, Alharbi Ziyad, Wang Cuixiang, Shao Xing, Reisslein Martin, and Elbakoury Hesham // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 44165–44181.
6. 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. 164–210.
7. IEEE 802.11 ax OFDMA resource allocation with frequency-selective fading / Tutelian Sergei, Bankov Dmitry, Shmelkin Dmitri, and Khorov Evgeny // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 18. — P. 6099.
8. Wang Kaidong, Psounis Konstantinos. Scheduling and resource allocation in 802.11 ax // IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications / IEEE. — 2018. — P. 279–287.
9. A survey on Multi-AP coordination approaches over emerging WLANs: Future directions and open challenges / Verma Shikhar, Rodrigues Tiago Koketsu, Kawamoto Yuichi, Fouda Mostafa M, and Kato Nei // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2023.
10. Multi-AP coordination phy/mac management for industrial Wi-Fi / Lacalle Guillermo, Val Iñaki, Seijo Óscar, Mendicute Mikel, Cavalcanti Dave, and Perez-Ramirez Javier // 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) / IEEE. — 2022. — P. 1–8.
11. Mirzoian Mary, Loginov Vyacheslav, Khorov Evgeny. M-TDLS: Enhancement of VR Quality of Service Using Coordinated OFDMA and Direct Links // 2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN) / IEEE. — 2023. — P. 408–412.
12. Analysis of M-LWDF fairness and an enhanced M-LWDF packet scheduling mechanism / Xian Yong-Ju, Tian Feng-Chun, Xu Chang-Biao, and Yue YANG // The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications. — 2011. — Vol. 18, no. 4. — P. 82–88.
13. The network simulator ns-3. — <https://www.nsnam.org>.

14. wlanTGaxChannel. — <https://www.mathworks.com/help/wlan/ref/wlantgaxchannel-system-object.html>.

Resource Allocation Algorithm for Serving VR Traffic in Wi-Fi Networks Using C-OFDMA

D. Ts. Khubaeva, S. A. Tutelian

In modern wireless networks the number of users and the volume of transmitted traffic are continuously increasing, imposing strict requirements on throughput and quality of service. These requirements are especially high for virtual reality (VR) applications, which are sensitive to delays and frame losses. Increasing the number of access points can potentially improve the throughput of Wi-Fi networks. However, in practice, it leads to higher interference and reduced efficiency of random access. This paper considers an approach based on frequency coordination of access points using the C-OFDMA (Coordinated Orthogonal Frequency Division Multiple Access) method. A recursive algorithm for frequency resource allocation is proposed, which takes into account the characteristics of VR traffic and ensures flexible utilization of radio resources. The study compares existing data transmission methods in Wi-Fi networks with the proposed approach for serving VR traffic. The use of the developed algorithm improves network performance and increases the number of satisfied users compared to other data transmission methods.

KEYWORDS: Virtual Reality, Wi-Fi, C-OFDMA.