

Исследование способов доставки трафика виртуальной реальности с помощью механизма R-TWT¹

Д. В. Банков^{*,**}, А. И. Ляхов^{*}, Е. А. Степанова^{*}

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

^{**}Московский независимый исследовательский институт искусственного интеллекта

Поступила в редколлегию XX декабря 2025 г. Принята XX декабря 2025 г.

Аннотация—В настоящее время устройства виртуальной реальности (ВР) приобретают все большую популярность. Для удобства пользователя такие устройства должны быть портативными и иметь возможность быстро и надежно обмениваться большими объемами данных через беспроводной канал связи. Для удовлетворения данных требований к качеству обслуживания ВР-трафика технология Wi-Fi 7 предлагает использовать новый механизм пробуждения по расписанию с ограниченным резервированием R-TWT (англ.: Restricted Target Wake Time). В данной работе при помощи имитационного моделирования проведено исследование различных способов передачи ВР-кадров в сети Wi-Fi с помощью механизма R-TWT в комбинации с базовым механизмом случайного доступа к каналу.

Ключевые слова: Трафик виртуальной реальности, R-TWT, качество обслуживания, Wi-Fi.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_4_679

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все сильнее развивается отрасль индустрии, связанная с созданием устройств и разработкой приложений виртуальной реальности (ВР). Особенностью таких приложений является высокое качество воспроизведения видео с низкими задержками обновления изображения, в том числе при смене положения головы пользователя. Отдельно следует отметить, что большинство устройств ВР являются портативными, что является необходимым условием для удобства пользования, поэтому для обмена данными между гарнитурой и компьютером используются беспроводные технологии передачи данных, а главным образом — технология Wi-Fi. Таким образом, приложения ВР предъявляют строгие требования к качеству обслуживания передаваемых через беспроводной канал данных, т.е. требуют обеспечения низкого уровня задержек и потерь, а также высокой пропускной способности сети. Отметим, что трафик ВР представляет собой несколько потоков данных, передаваемых как на гарнитуру и являющихся в основном видеокадрами, так и от нее и являющихся потоком команд, описывающих положение гарнитур. Из-за того, что видеокадры по размеру многократно превосходят кадры потока команд, далее в данной работе под трафиком ВР будем понимать видеотрафик, передаваемый от точки доступа на ВР-гарнитуру.

Удобство использования технологии Wi-Fi для обмена данными ВР связано с ее широким распространением, однако сети Wi-Fi для передачи данных используют многие устройства —

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00816, <https://rscf.ru/project/24-19-00816/>

от «умных» бытовых устройств до смартфонов и ноутбуков, периодически генерирующих насыщенные потоки данных, из-за чего задача удовлетворения требований к качеству обслуживания ВР-трафика может оказаться сложной. Очевидным решением данной проблемы является выделение канальных ресурсов для передачи ВР-трафика. Такой подход решает проблему коллизий, являющихся следствием случайного доступа к каналу, используемого в сетях Wi-Fi. Однако в общем виде трафик ВР представляет собой нестационарный поток кадров, т.е. размеры передаваемых кадров не равны друг другу, но подчиняются некоторому распределению. В таком случае резервирование канальных ресурсов необходимо выполнять с запасом с учетом флуктуации размеров кадров, но это приведет к тому, что часть зарезервированных канальных ресурсов не будет использоваться. При этом сети Wi-Fi активно используются для доставки разного вида пользовательского трафика, поэтому излишнее резервирование канальных ресурсов может негативно сказаться на общей пропускной способности сети.

Для решения этой проблемы в дополнении IEEE 802.11be к стандарту Wi-Fi был представлен новый механизм — механизм пробуждения по расписанию с ограниченным резервированием R-TWT (англ.: Restricted Target Wake Time). Особенностью данного механизма является то, что он не резервирует временной интервал, а только обозначает момент времени — момент R-TWT, к которому все станции в сети должны завершить свои передачи. Этот подход предназначен для решения проблемы излишнего резервирования канального времени одновременно с обеспечением низких задержек доставки кадров, так как ВР-устройство не будет ожидать освобождение канала от чужой передачи, а сразу начнет процесс получения доступа к каналу в запланированный момент времени.

Однако механизм R-TWT не гарантирует ВР-устройству получение доступа к каналу в момент R-TWT, так как после наступления момента R-TWT все станции сети, включая те, для которых не назначен R-TWT, могут начать процесс получения доступа к каналу. Это означает, что использование механизма R-TWT не гарантирует отсутствие коллизий, и моменты R-TWT должны назначаться с учетом возможных повторных попыток передачи ВР-кадров в достаточном количестве для удовлетворения требований к надежности доставки кадров и ограничений на задержку. Очевидным решением для данной проблемы является назначение моментов R-TWT как можно чаще, однако такой подход может привести к снижению общей пропускной способности сети [1] из-за негативного влияния моментов R-TWT на пропускную способность пользовательских станций, под которыми далее будем понимать станции, передающие насыщенные потоки кадров без использования механизма R-TWT. В связи с этим актуальной является проблема настройки механизма R-TWT, при которой будут удовлетворены требования к качеству обслуживания ВР-трафика и максимизирована пропускная способность пользовательских станций.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 представлено описание объекта исследования. Раздел 3 содержит обзор литературы. В разделе 4 описан исследуемый сценарий, в разделе 5 рассматриваемые подходы к настройке механизма R-TWT для передачи приоритетных данных, а в разделе 6 представлен анализ результатов моделирования. Наконец, в разделе 7 формулируются основные результаты работы.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Метод доступа к каналу

Базовым методом получения доступа к каналу в сетях Wi-Fi является механизм EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), причем он применяется и при использовании в сети механизма R-TWT, поэтому далее представлено упрощенное описание механизма EDCA. Пусть станция сгенерировала для передачи кадр данных, который попадает в пустую очередь на передачу. Станция прослушивает канал и, если канал оказывается свободен, сразу

выполняет передачу данного кадра. Если канал оказывается занят, то перед передачей станция должна выполнить процедуру случайной отсрочки. Для этого станция выбирает значение случайной отсрочки и уменьшает его каждый раз, когда канал пробыл пустым в течение определенного промежутка времени. Значение случайной отсрочки равновероятно выбирается из промежутка от 0 до $W_r - 1$, где W_r — конкурентное окно, r — число сделанных повторных попыток передачи. При первой попытке передачи используется минимальное конкурентное окно W_{min} . После завершения отсчета отсрочки выполняется передача кадра. Если передача кадра оказалась успешной, то получатель в ответ отправляет кадр подтверждения Ack (англ.: Acknowledgement) через T_{SIFS} после завершения приема кадра данных. В случае, если в течение $T_{AckTimeout}$ после завершения передачи данных станция не получает в ответ кадр Ack, то она считает попытку передачи неуспешной, удваивает конкурентное окно, если оно еще не достигло максимума W_{max} , и после нового отсчета отсрочки выполняет повторную попытку передачи.

Следует отметить, что в своей работе EDCA использует механизм TXOP (англ.: transmission opportunity), который определяет интервал времени $TXOP_{limit}$, в течение которого станция может занимать канал после получения к нему доступа без выполнения повторной процедуры отсрочки. Другим важным механизмом является механизм агрегации, при использовании которого несколько кадров данных объединяются в один кадр для передачи на физическом уровне. Данный механизм позволяет экономить каналные ресурсы на заголовках физического уровня и кадрах подтверждения, так как используется механизм блочного подтверждения вместо отправки кадра Ack для каждого из фрагментов агрегированного кадра. В кадре блочного подтверждения BAck (англ.: Block Ack) передается последовательность битов, которые обозначают успешность получения соответствующего фрагмента из подтверждаемой последовательности.

2.2. Механизм R-TWT

В данном разделе представлено краткое описание работы механизма R-TWT, с более подробным описанием данного механизма можно ознакомиться в работе [1]. Сразу отметим, что механизм R-TWT был разработан для доставки трафика, чувствительного к задержке, поэтому при помощи последовательности интервалов обслуживания R-TWT SP (англ.: service period) должны передаваться кадры приоритетных данных с фиксированными идентификаторами TID (англ.: traffic identifier), задаваемыми при настройке этой последовательности R-TWT.

Важным компонентом задержки доставки кадров является время до момента освобождения канала, если кадр данных для передачи поступил в процессе передачи другой станции, т.е. когда канал был занят. Механизм R-TWT был разработан для устранения этой составляющей задержки доставки кадра¹. Как уже было сказано, для этого механизм R-TWT определяет моменты R-TWT, до наступления которых все станции сети должны завершить свои передачи, т.е. завершить TXOP, и освободить канал. При этом передачи должны завершить в том числе точка доступа и те станции, для которых установлен ближайший момент R-TWT. Исключением может являться только передача точкой доступа кадра с таким же TID, который использовался при настройке пересекаемого передачей момента R-TWT. Отметим, что каждый момент R-TWT определяет начало интервала обслуживания R-TWT SP, в течение которого приоритизируется обмен кадрами тех типов, для которых настроен R-TWT. Таким образом, если станция, использующая механизм R-TWT, обслуживает несколько потоков данных с разными

¹ Для решения аналогичной проблемы в стандарте Wi-Fi 8 разрабатывается метод доступа к каналу с вытеснением [2], однако он еще не стандартизован, поэтому в рамках данной работы данный метод не исследуется.

TID, то в течение R-TWT SP она должна приоритизовать передачу кадров с соответствующим R-TWT TID, и только в случае, если таких кадров нет, передавать кадры с иными TID.

Информация о назначенных R-TWT периодически рассылается в специальных широковещательных кадрах — биконах — для информирования всех станций сети. В случае если станция, досчитав отсрочку, определяет, что запланированный ей обмен кадрами нельзя завершить до момента R-TWT, станция выбирает новое значение отсрочки из того же интервала, то есть без увеличения конкурентного окна, и продолжает выполнять отсчет. Получается, что если станция заканчивает отсчет отсрочки после момента R-TWT или даже в сам момент R-TWT, то она может сразу выполнить попытку передачи. Из этого следует, что сам интервал R-TWT SP не защищен от передач других станций в сети и передача станции, использующей для доставки приоритетных кадров механизм R-TWT, может попасть в коллизию, а также может быть задержана, если иная станция отсчитывает отсрочку и начнет собственную передачу раньше нее.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Впервые механизм R-TWT был представлен в рамках дополнения IEEE 802.11be к стандарту Wi-Fi, в связи с этим его упоминания и краткое описание встречаются в большом числе обзорных работ [3–13]. При этом отмечается, что в сценариях с несколькими сетями Wi-Fi, имеющими пересекающиеся области покрытия, эффективность использования механизма R-TWT будет значительно снижаться или полностью нивелироваться из-за влияния передач в сетях, не использующих R-TWT [14]. Для решения этой проблемы в рамках дополнения IEEE 802.11bn к стандарту Wi-Fi [15] разрабатывается усовершенствованная версия механизма R-TWT — механизм координированного R-TWT (англ.: Coordinated R-TWT, co-RWT), использование которого должно позволить защищать моменты R-TWT не только от передач в собственной сети, но и в соседних сетях Wi-Fi.

Переходя к работам, посвященным исследованию самого механизма R-TWT, отметим, что они представляют как имитационные модели [14, 16], так и большое число аналитических моделей [1, 17–21].

Общей особенностью большинства аналитических моделей R-TWT является то, что они разработаны для достаточно простых сценариев, в которых, к примеру, все станции в сети для передачи данных используют механизм R-TWT [17–20], причем для каждой станции устанавливается собственный R-TWT, что позволяет станциям передавать кадры без коллизий. В [21] рассмотрен сценарий, в котором станции объединяются в группы и один и тот же R-TWT назначается сразу группе станций, причем авторы предполагают, что такое объединение должно выполняться только для пространственно разнесенных станций, вследствие чего между их передачами невозможны коллизии. В работе [1] представлена аналитическая модель, разработанная для сети Wi-Fi, в которой помимо точки доступа, использующей механизм R-TWT, присутствует группа пользовательских станций, передающих насыщенные потоки кадров. Данная модель позволяет для заданного периода R-TWT и ограничения $TXOP_{limit}$ найти пропускную способность пользователей. Однако модель не учитывает передачу приоритетных данных при использовании R-TWT, в связи с чем не может оценить задержку, вероятность потери, а также влияние передачи приоритетного трафика на пропускную способность пользователей.

Имитационные модели позволяют исследовать достаточно сложные сценарии, к примеру, несколько сетей с пересекающимися областями покрытия [14] или одну сеть, в которой один R-TWT назначается нескольким станциям [16], между передачами которых возможны коллизии. Причем авторы последнего исследования показали, что использование механизма R-TWT

позволяет удовлетворять достаточно строгие требования по задержке (< 10 мс) с достаточно высокой надежностью, если число станций, использующих R-TWT, мало.

Важно отметить, что в настоящий момент существует единственная работа [22], представляющая аналитическую модель для оценки вероятности доставки приоритетных кадров за ограниченное время, передаваемых при помощи R-TWT, а также пропускную способность для пользовательских станций. Однако данная модель разработана для сценариев индустриального Интернета вещей, особенностью которых является большое количество чувствительных к энергопотреблению сенсоров, редко генерирующих малые объемы высокоприоритетных данных для передачи. В связи с этим модель построена для сценария, в котором накапливаемой энергии сенсора достаточно для выполнения только одной попытки передачи кадра и не достаточно для длительного прослушивания канала. Эта особенность не позволяет эффективно использовать данную модель для исследования способов доставки ВР-трафика в сети Wi-Fi при помощи механизма R-TWT.

Обобщая все вышесказанное, ни одна из перечисленных работ не исследует подходы к повышению эффективности передачи ВР-трафика при использовании механизма R-TWT в комбинации с базовым механизмом EDCA, поэтому целью данной работы является исследование различных способов передачи приоритетных кадров при помощи механизма R-TWT и их влияния на пропускную способность пользовательских станций. Для достижения поставленной цели в работе ставится и решается следующая задача: *разработать имитационную модель обмена данными в сети Wi-Fi, использующей для передачи ВР-кадров механизм R-TWT, при помощи которой исследовать влияние параметров механизма R-TWT, способов его настройки и параметра механизма доступа к каналу $TXOP_{limit}$ на долю доставленных ВР-кадров за ограниченное время и на пропускную способность пользовательских станций.*

4. СЦЕНАРИЙ

Рассмотрим поставленную в предыдущем разделе задачу в следующем сценарии. Дана сеть Wi-Fi, состоящая из точки доступа, ВР-гарнитуры, получающей от точки доступа поток ВР-кадров при помощи механизма R-TWT, и группы из N пользовательских станций, передающих кадры данных точке доступа в режиме насыщения. Пользовательские станции поддерживают механизм R-TWT.

Передачи кадров в сети выполняются при помощи механизма случайного доступа к каналу EDCA. При формировании кадров для передачи станции и точка доступа используют механизм агрегации A-MPDU, передача которого предваряется обменом кадрами RTS/CTS. Длительность A-MPDU определяется количеством данных в буфере передатчика, используемой сигнально-кодовой конструкции (СКК), ограничением $TXOP_{limit}$ и временем до ближайшего момента R-TWT. Все станции обеих сетей находятся в зоне радиовидимости друг друга, скрытых станций нет. Считаем, что канал идеальный, т.е. шума в канале нет и потери кадров происходят только в случае коллизии с передачей другой станции.

Как было сказано ранее, в качестве потока ВР-кадров будем рассматривать поток видеокадров. Видеокадры генерируются строго периодически, причем генерируется два потока видеокадров, предназначенных для разных глаз. Для упрощения моделирования будем рассматривать одну последовательность видеокадров с периодом генерации кадров T_{VR} в два раза меньшим, чем у исходной последовательности. Видеопоток состоит из повторяющейся последовательности одного опорного I-кадра и $N_{GOP} - 1$ разностных P-кадров. Размеры I-кадров и P-кадров фиксированные. Видеокадр считаем потерянным, если он не был доставлен до момента генерации следующего видеокадра, то есть за время T_{VR} . В случае потери I-кадра считаем также потерянными и все следующие за ним P-кадры.

Будем использовать самый простой способ настройки механизма R-TWT для передачи видеокадров, при котором устанавливается одна периодическая последовательность моментов R-TWT с периодом T_{R-TWT} . Для того, чтобы не ограничивать возможность передачи ВР-кадров, устанавливаем длительность R-TWT SP равной T_{VR} .

5. ИССЛЕДУЕМЫЕ СХЕМЫ ПЕРЕДАЧИ КАДРОВ В R-TWT

Перейдем к подробному описанию способов передачи кадров с использованием механизма R-TWT. Начнем с рассмотрения двух стратегий получения доступа к каналу относительно момента R-TWT. В рамках стратегии «без пересечения» точка доступа начинает процесс получения доступа к каналу при достижении момента R-TWT, в то время как в рамках стратегии «с пересечением» точка доступа начинает получать доступ к каналу заранее, т.е. за T_{offset} до назначенного момента R-TWT. Стратегия «с пересечением» может быть реализована без нарушения стандарта Wi-Fi, так как механизм R-TWT позволяет точке доступа, в отличие от любых других станций в сети, пересекать момент R-TWT передачей кадра, если TID этого кадра совпадает с TID, для которого настроена соответствующая последовательность R-TWT SP.

Кроме стратегии, определяющей начало процесса получения доступа к каналу при использовании R-TWT, в данной статье рассматривается вопрос, все ли кадры ВР, в том числе повторные попытки передачи, должны передаваться в моменты R-TWT, или часть кадров необходимо отправлять, не дожидаясь ближайшего момента R-TWT. Для этого рассмотрим три различные политики передачи кадров и их повторных попыток передачи с использованием механизма R-TWT.

Политика 1. Процесс получения доступа к каналу для всех попыток передачи агрегированных кадров A-MPDU, в которых передаются данные ВР, начинается в моменты R-TWT. Такой подход должен позволить максимально повысить вероятность успешных передач точки доступа, так как начало конкуренции за доступ к каналу привязывается к моментам, в которые пользовательские станции обязаны прекратить передачу данных из-за использования механизма R-TWT. В то же время такой подход должен уменьшить влияние передач RTA-станций на остальные передачи в сети. Однако данный подход может увеличить задержку передачи видеокадров, так как все передачи точки доступа разделяются временными интервалами между моментами R-TWT.

Политика 2. Процесс получения доступа к каналу для первой попытки передачи A-MPDU начинается в моменты R-TWT. В случае передачи видеокадра, состоящего из нескольких A-MPDU, доступ к каналу для первой попытки передачи второго A-MPDU выполняется в ближайшем моменте R-TWT, следующем за успешной доставкой первого A-MPDU. Повторные попытки передачи выполняются по EDCA без привязки к моментам R-TWT. Такой подход позволяет снизить задержку доставки кадров относительно предыдущего подхода, однако увеличивает конкуренцию за доступ к каналу с другими станциями сети.

Политика 3. Процесс получения доступа к каналу точка доступа начинает сразу после получения видеокадра независимо от моментов R-TWT. Такой подход нацелен на минимизацию задержки передачи видеокадров, однако может значительно повлиять на пропускную способность пользовательских станций.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования эффективности описанных в предыдущем разделе способов настройки механизма R-TWT была разработана дискретно-событийная имитационная модель переда-

чи данных в сети Wi-Fi, учитывающая особенности использования в сети механизма R-TWT. Моделирование проводилось в рамках описанного в разделе 4 сценария с использованием приведенных в Таблице 1 параметров. Для подсчета каждого значения выполнялось по 1000 запусков имитационной модели, в каждом из которых выполнялась передача 1000 видеокадров.

Таблица 1. Параметры моделирования.

Величина	Значение
Число пользовательских станций, N	5
$AIFS_N^{VR}$	2
$AIFS_N$	3
Размер минимального конкурентного окна для трафика ВР, CW_{min}^{VR}	3
Размер максимального конкурентного окна для трафика ВР, CW_{max}^{VR}	3
Размер минимального конкурентного окна для трафика пользователей, CW_{min}	15
Размер максимального конкурентного окна для трафика пользователей, CW_{max}	1023
Ограничение $TXOP_{limit}^{VR}$ для трафика ВР	4 мс
Размер I-кадра	175 кБайт
Размер P-кадра	50 кБайт
Размер группы из опорного и разностных кадров, N_{GoP}	5
Ограничение на задержку доставки ВР-кадра, T_{VR}	7 мс
Сдвиг начала получения доступа к каналу в стратегии «с пересечением», T_{offset}	70 мкс
СКК для трафика ВР	MCS11
СКК для трафика пользователей	MCS9
Количество используемых пространственных потоков	2
СКК для передачи контрольных кадров	MCS3

Начнем анализ с рассмотрения стратегий получения доступа к каналу «с пересечением» и «без пересечения» момента R-TWT. На рис. 1 представлены зависимости пропускной способности S пользовательских станций и доли PLR не доставленных за время T_{VR} видеокадров от периода R-TWT при использовании Политики 1 передачи кадров и двух фиксированных значениях $TXOP_{limit}$ для пользовательских станций, равных 700 мкс и 2500 мкс. Маркерами отмечены максимальные значения пропускной способности пользователей, достигаемые при $PLR \leq 10^{-3}$, маркер «звезда» используется для $TXOP_{limit} = 700$ мкс, маркер «ромб» — для $TXOP_{limit} = 2500$ мкс. В рамках стратегии «с пересечением» выбрано фиксированное значение $T_{offset} = 70$ мкс, так как оно соответствует округленному в большую сторону значению $AIFS_N^{VR} + CW_{MAX}^{VR}$ и при этом меньше минимальной длительности обмена кадрами в сети Wi-Fi, что позволяет в течение T_{offset} приоритизировать получение доступа к каналу для точки доступа.

Анализируя рис. 1, можно отметить, что использование стратегии «с пересечением», т.е. использование возможности точки доступа начать передачу до момента R-TWT, позволяет на порядки снизить потери видеокадров, в то же время незначительно уменьшив пропускную способность пользователей. Увеличение доли доставленных видеокадров связано с тем, что в течение времени T_{offset} до начала R-TWT в случае, если канал свободен, каждая попытка передачи точки доступа окажется успешной, так как всем другим станциям в сети механизм R-TWT запрещает передачи. В то же время передача пользовательской станции может завершиться прямо перед моментом R-TWT, и тогда использование T_{offset} не позволяет всегда избегать потерь видеокадров из-за коллизий. Следует отметить, что снижение пропускной

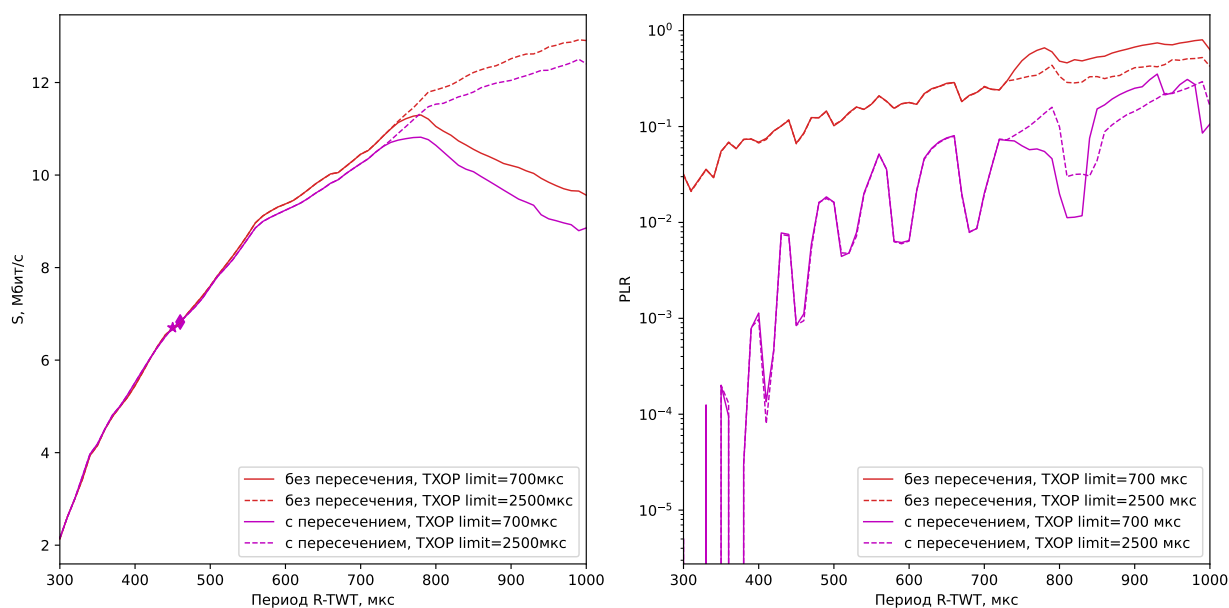


Рис. 1. Зависимости пропускной способности S пользовательских станций и доли PLR не доставленных за время T_{VR} видеокадров от периода R-TWT при использовании Политики 1 передачи ВР-кадров и двух фиксированных значениях $TXOP_{limit}$

способности пользователей в рассматриваемом сценарии при использовании стратегии «с пересечением» по сравнению со стратегией «без пересечения» связано с тем, что при высоких значениях PLR много видеокадров отбрасывается в момент, когда времени на его передачу остается меньше, чем до конца ограничения T_{VR} . Таким образом, видеокадр не занимает канал своей передачей, что увеличивает долю канального времени, занимаемого передачами пользовательских станций, и, как следствие, их пропускную способность.

Рассмотрим влияние параметра $TXOP_{limit}$ на представленные на рис. 1 показатели. Пропускная способность пользователей не зависит от величины $TXOP_{limit}$, пока она больше периода R-TWT, т.е. $T_{R-TWT} < TXOP_{limit}$. После того, как период R-TWT начинает превосходить значение $TXOP_{limit}$, пропускная способность пользователей начинает уменьшаться из-за недоиспользования канала (см. графики для $TXOP_{limit} = 700$ мкс). Это происходит из-за того, что между последовательными моментами R-TWT может быть выполнена только одна успешная передача кадра, а вторая не сможет начаться из-за ограничения механизма R-TWT (подробнее про этот эффект можно прочитать в [1]).

Переходя к рассмотрению влияния параметра $TXOP_{limit}$ на PLR видеокадров, отметим, что аналогично пропускной способности пользователей при $T_{R-TWT} < TXOP_{limit}$ влияния нет. Однако при $T_{R-TWT} > TXOP_{limit}$ можно заметить, что при использовании стратегии «без пересечения» PLR при $TXOP_{limit} = 700$ мкс заметно выше, чем при $TXOP_{limit} = 2500$ мкс. Это связано с тем, что при $TXOP_{limit} = 700$ мкс после завершения передачи кадра до наступления момента R-TWT остается время, в течение которого пользователи завершают отсчет $AIFS^{STA}$ и начинают отсчет отсрочки, из-за чего у точки доступа нет возможности передать кадр без конкуренции за доступ к каналу. В то же время при $TXOP_{limit} = 2500$ мкс передача пользовательского кадра данных завершается максимально близко к моменту R-TWT, из-за чего у точки доступа появляется возможность получения приоритетного доступа к каналу из-за использования для передачи данных приоритетной категории доступа к каналу. Отметим, что влияние параметра $TXOP_{limit}$ при использовании политики «с пересечением» становится менее очевидным, так как при некоторых соотношениях $TXOP_{limit}$ и периода T_{R-TWT} исполь-

зование меньшего значения $TXOP_{limit}$ позволяет в несколько раз снизить PLR , см. рис. 1 при $T_{R-TWT} \in [810, 830]$ мкс. Это происходит, так как после завершения передачи пользовательского кадра до момента R-TWT часто остается время, достаточное для успешного начала передачи точки доступа.

Обобщая все вышесказанное, отметим, что в рассмотренном сценарии только при использовании стратегии «с пересечением» можно добиться доли не доставленных за время T_{VR} видеокадров, не превосходящей 10^{-3} , при этом максимальные значения пропускной способности и соответствующие им величины периода T_{R-TWT} обозначены маркерами на рис. 1. В связи с этим можно сделать вывод о целесообразности использования стратегии «с пересечением», поэтому будем ее использовать при дальнейшем сравнении политик передачи кадров.

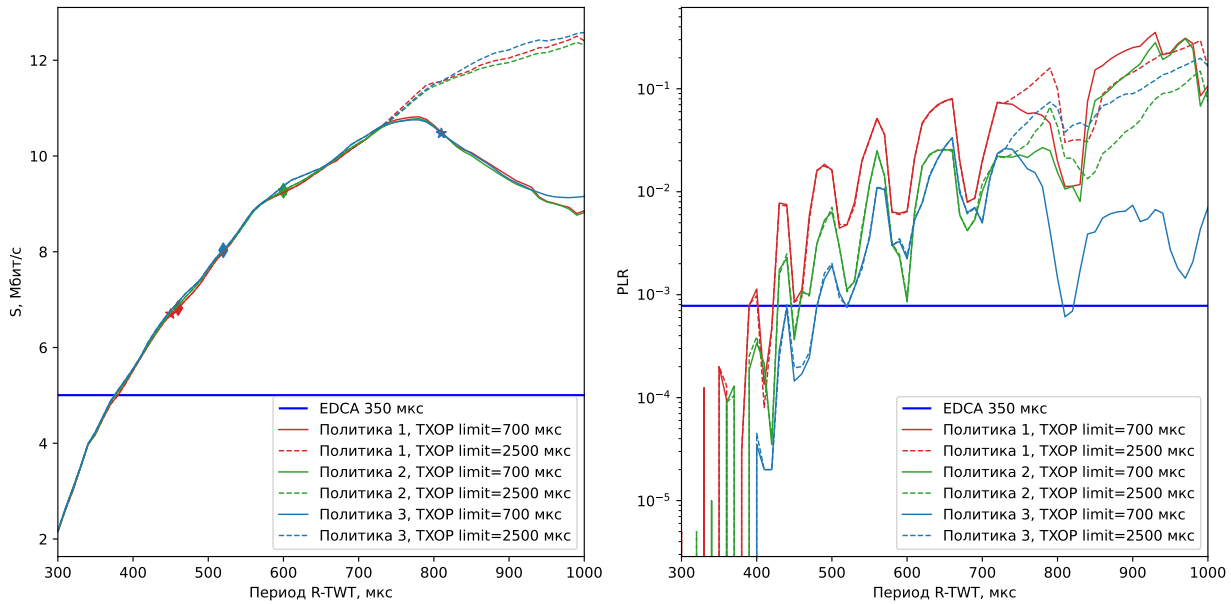


Рис. 2. Сравнение политик передачи кадров при использовании стратегии «с пересечением»

На рис. 2 представлены зависимости пропускной способности S пользовательских станций и доли PLR не доставленных за время T_{VR} видеокадров от периода R-TWT для каждой из трех описанных в разделе 5 политик передачи кадров. Для каждой политики зависимости представлены для двух фиксированных значений $TXOP_{limit}$ 700 мкс и 2500 мкс и $T_{offset} = 70$ мкс. Маркером отмечены максимальные значения пропускной способности пользователей, достигаемые при PLR видеокадров не более 10^{-3} . Для дополнительного сравнения приведена максимальная пропускная способность пользователей без использования механизма R-TWT, достигаемая при аналогичных ограничениях PLR . Отметим, что она достигается при $TXOP_{limit} = 350$ мкс и в разы меньше тех значений, которые можно получить при использовании механизма R-TWT.

Обратим внимание на то, что зависимости пропускной способности пользователей от периода R-TWT для рассматриваемых политик практически не отличаются друг от друга при фиксированном $TXOP_{limit}$. В то же время заметно отличаются максимально достижимые значения пропускной способности пользователей при удовлетворении ограничения $PLR \leq 10^{-3}$, а также значения периода R-TWT, при которых эти максимумы достигаются. Такие различия объясняются тем, что для каждой политики отличается диапазон периодов R-TWT, при которых PLR видеокадров не превосходит 10^{-3} . Это связано с тем, что выбранная политика передачи кадров оказывает прямое влияние на количество возможных попыток передачи ви-

деокадра точкой доступа. При использовании Политики 1 точка доступа перед выполнением каждой попытки передачи кадра ожидает новый момент R-TWT, что приводит к увеличению задержки доставки кадров и, как следствие, к увеличению PLR по сравнению с другими политиками. Это также приводит к тому, что максимальная достигаемая пропускная способность пользователей при использовании данной политики оказывается минимальной из всех трех политик. При использовании Политики 2 все повторные попытки передачи выполняются с помощью EDCA без ожидания ближайшего момента R-TWT. Это увеличивает число возможных попыток передачи, про этом оставляя возможность передачи в момент R-TWT, если не получилось начать успешную передачу до его наступления. Таким образом, использование Политики 2 позволяет достигать более низких значений PLR по сравнению с использованием Политики 1, и, как следствие, более высокой максимально достижимой пропускной способности пользователей при удовлетворении ограничения $PLR \leq 10^{-3}$. Аналогично можно отметить, что использование Политики 3 позволяет достичь наибольшего количества возможных попыток передачи видеок кадров, однако данные попытки передачи выполняются с помощью EDCA вне привязки к моментам R-TWT, что может приводить к увеличению числа коллизий, и, как следствие, к увеличению PLR . В связи с этим можно отметить, что зависимости PLR видеок кадров от периода R-TWT для Политики 2 и Политики 3 в нескольких местах пересекаются и в двух последовательных точках локального минимума наименьшее значение PLR достигается при использовании разной политики.

Общий вид зависимостей PLR от периода R-TWT схож для всех политик, т.е. локальные минимумы и максимумы достигаются при близких или даже одинаковых значениях периода R-TWT. Такое поведение кривых связано с тем, что небольшое изменение периода T_{R-TWT} может уменьшить или увеличить количество возможных попыток передачи точки доступа за период генерации видеок кадра T_{VR} , что явным образом сказывается на PLR видеок кадров. Рассмотрим на примере переход из локального максимума в минимум. Отметим, что $TXOP_{limit}^{VR} = 4$ мс, при этом при использовании рассматриваемых параметров передачи для отправки I-кадра точка доступа должна выполнить успешную передачу двух A-MPDU, в то время как для отправки R-кадра достаточно передачи одного A-MPDU, поэтому будем рассматривать доставку I-кадра. Рассмотрим локальный минимум при $T_{R-TWT} = 520$ мкс. Если успешная передача первого A-MPDU началась в момент R-TWT, то после завершения передачи A-MPDU подтверждения BAck и AIFS^{VR} до наступления следующего момента R-TWT остается менее 160 мкс, что меньше минимальной длительности обмена кадрами в сети. Таким образом, передачу второго A-MPDU точка доступа может начать сразу после завершения передачи первого A-MPDU, и эта передача не сможет попасть в коллизию из-за использования механизма R-TWT. В то же время отметим, что передача первого A-MPDU может начаться как незадолго до момента R-TWT, так и после, при этом приоритетный доступ к каналу для второго A-MPDU будет сохранен. В случае локального минимума при $T_{R-TWT} = 600$ мкс такой свободы значительно меньше, так как время до ближайшего момента R-TWT больше и приближается к 200 мкс. В связи с этим при использовании Политики 2 при рассмотренных периодах R-TWT достигаются практически одинаковые значения PLR , в то время как при использовании Политики 3 PLR при периоде $T_{R-TWT} = 600$ мкс более чем в 3 раза превышает значение PLR при периоде $T_{R-TWT} = 520$ мкс. Перейдем к пояснению локального максимума, достигаемого при периоде $T_{R-TWT} = 550$ мкс. В рассматриваемом случае после завершения передачи A-MPDU, начатой в момент R-TWT, до следующего момента R-TWT останется около 400 мкс, что позволяет выполнить попытку передачи кадра пользовательской станции. Таким образом, передача второго A-MPDU не будет защищена передачей первого A-MPDU, т.е. будет выполняться независимо и может попасть в коллизию. Отметим, что сдвиг начала передачи первого A-MPDU до 100 мкс относительно момента R-TWT не сможет изменить описанную ситуацию, поэтому рассмотренная точка соответствует локальному максимуму PLR .

Отдельно отметим, что максимальная пропускная способность пользователей была получена при использовании Политики 3, $TXOP_{limit} = 700$ мкс и $T_{R-TWT} = 810$ мкс. Это связано с тем, что значение $T_{R-TWT} = 810$ мкс соответствует локальному минимуму PLR , при этом в случае начала передачи первого A-MPDU в момент R-TWT от момента освобождения канала до следующего момента R-TWT останется менее 50 мкс, в связи с чем большой сдвиг начала передачи в интервале до момента R-TWT позволит сохранить бесконкурентную отправку второго A-MPDU. При этом при использовании Политики 2 при тех же параметрах PLR выше, т.к. точка доступа ожидает момента R-TWT для отправки A-MPDU, что приводит к меньшему по сравнению с использованием Политики 3 временному интервалу, в течение которого нужно начать передачу первого A-MPDU, чтобы передача второго A-MPDU произошла без коллизии. Также использование $TXOP_{limit} = 700$ мкс значительно снижает вероятность того, что пользовательская станция завершит свою передачу сразу перед моментом R-TWT, что дополнительно уменьшает вероятность коллизии для передач точки доступа.

Подводя итог всему вышесказанному, при использовании механизма R-TWT рекомендуем использовать стратегию «с пересечениями» моментов R-TWT, так как она позволяет значительно снизить PLR при доставке ВР-кадров. В качестве базовой политики передачи кадров можно использовать Политику 3, так как в допустимом диапазоне значений PLR это позволяет достичь при почти любых периодах R-TWT меньших значений PLR , чем при использовании Политики 2, и при любых периодах R-TWT меньших значений PLR , чем при использовании Политики 1. В то же время длительность периода R-TWT должна выбираться в соответствии с длительностью передаваемых при его использовании A-MPDU, и целое число периодов R-TWT должно превосходить длительность самого большого A-MPDU, в котором передается I-кадр, менее, чем на длительность минимального обмена кадрами в сети, чтобы гарантировать возможность бесконкурентной передачи по R-TWT следующего A-MPDU ВР-трафика. Длительность параметра $TXOP_{limit}$ следует выбирать в соответствии с выбранным периодом R-TWT так, чтобы минимизировать вероятность того, что пользовательская станция завершит передачу прямо перед моментом R-TWT.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование различных способов передачи ВР-кадров в сети Wi-Fi при помощи механизма R-TWT. Для этого была разработана дискретно-событийная имитационная модель передачи данных в сети Wi-Fi, учитывающая особенности механизма R-TWT и позволяющая найти зависимости пропускной способности пользовательских станций и доли не доставленных за фиксированное время ВР-кадров от периода R-TWT. Анализ численных результатов показал, что использование стратегии «с пересечением» момента R-TWT, т.е. использование возможности точки доступа пересекать своей передачей момент R-TWT для доставки соответствующих этому R-TWT кадров, позволяет на порядки снизить долю потерянных ВР-кадров и добиться, чтобы доля потерянных ВР-кадров не превосходила 10^{-3} . Показано, что при использовании стратегии «с пересечением» ожидание ближайшего R-TWT для выполнения попытки передачи приводит только к увеличению задержки доставки кадров и, как следствие, к увеличению их потерь, в то время как на пропускную способность пользователей выбор политики практически не оказывает влияния. Однако зависимость доли не доставленных за фиксированное время ВР-кадров от периода R-TWT отличается для различных политик передачи, в связи с чем отличаются и значения максимальной пропускной способности пользователей, достигаемой при удовлетворении ограничения на долю не доставленных за заданное время ВР-кадров. В связи с этим разработанная модель позволяет найти параметры настройки механизма R-TWT и EDCA, такие как политика передачи кадров, период R-TWT и ограничение на длительность передачи пользователей $TXOP_{limit}$, позволяющие максимизиро-

вать пропускную способность пользовательских станций при удовлетворении ограничения на долю не доставленных за заданное время ВР-кадров. Далее планируется модифицировать разработанную модель для исследования различных способов составления расписания R-TWT SP и их влияния как на пропускную способность пользователей, так и на долю не доставленных за заданное время ВР-кадров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Performance Evaluation of Wi-Fi 7 Networks with Restricted Target Wake Time / Bankov D.V., Lyakhov A.I., Stepanova E.A., and Khorov E.M. // Problems of Information Transmission. — 2024. — Vol. 60, no. 3. — P. 233–254.
2. Riterman A., Bankov D., Lyakhov A. Model of a Preemptive Channel Access Method in Multi-Station Wi-Fi Networks // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 3. — P. 219–239.
3. Wi-Fi: Twenty-Five Years and Counting / Geraci G., Meneghello F., Wilhelmi F., Lopez-Perez D., Val I., Giordano L.G., Cordeiro C., Ghosh M., Knightly E., and Bellalta B. // arXiv preprint arXiv:2507.09613. — 2025.
4. Charfi E., Saddoud A., Fourati L.C. From Wi-Fi 7 to Wi-Fi 8: A survey of technological evolution, emerging applications, challenges, and future aspects // Computer Networks. — 2025. — P. 111590.
5. Industry 4.0 and Beyond: The Role of 5G, Wi-Fi 7, and Time-Sensitive Networking (TSN) in Enabling Smart Manufacturing / John J., Noor-A-Rahim M., Vijayan A., Poor H.V., and Pesch D. // Future Internet. — 2024. — Vol. 16, no. 9. — P. 345.
6. Overview and Performance Evaluation of Wi-Fi 7 / Chen Cheng, Chen Xiaogang, Das Dibakar, Akhmetov Dmitry, and Cordeiro Carlos // IEEE Commun. Stand. Mag. — 2022. — Vol. 6, no. 2. — P. 12–18.
7. WiFi TSN: Enabling deterministic wireless connectivity over 802.11 / Cavalcanti D., Cordeiro C., Smith M., and Regev A. // IEEE Communications Standards Magazine. — 2022. — Vol. 6, no. 4. — P. 22–29.
8. Adame T., Carrascosa-Zamacois M., Bellalta B. Time-sensitive networking in IEEE 802.11 be: On the way to low-latency WiFi 7 // Sensors. — 2021. — Vol. 21, no. 15. — P. 4954.
9. What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11 be ultra high reliability / Galati-Giordano L., Geraci G., Carrascosa M., and Bellalta B. // IEEE Communications Magazine. — 2024. — Vol. 62, no. 8. — P. 126–132.
10. George A.S., George A.S.H., Baskar T. Wi-fi 7: the next frontier in wireless connectivity // Partners Universal International Innovation Journal. — 2023. — Vol. 1, no. 4. — P. 133–145.
11. Reshef E., Cordeiro C. Future directions for Wi-Fi 8 and beyond // IEEE Communications Magazine. — 2022. — Vol. 60, no. 10. — P. 50–55.
12. Avallone S., Imputato P., Magrin D. Controlled Channel Access for IEEE 802.11-Based Wireless TSN Networks // IEEE Internet of Things Magazine. — 2023. — Vol. 6, no. 1. — P. 90–95.
13. Guérin E., Begin T., Lassous I.G. An overview of MAC energy-saving mechanisms in Wi-Fi // Computer Communications. — 2023. — Vol. 203. — P. 129–145.
14. A Channel Reservation Mechanism in IEEE 802.11 be for Multi-cell Scenarios / Liu S., Wang D., Yang M., Yan Z., and Li B. // International Conference on Smart Grid and Internet of Things / Springer. — 2022. — P. 241–253.
15. 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.
16. Coordinated SR and Restricted TWT for Time Sensitive Applications in WiFi 7 Networks / Haxhibeqiri J., Jiao X., Shen X., Pan C., Jiang X., Hoebeke J., and Moerman I. // IEEE Communications Magazine. — 2024. — Vol. 62, no. 8. — P. 118–124.

17. Aligning rTWT with 802.1 Qbv: a Network Calculus Approach / Barroso-Fernández C., Martín-Pérez J., Ayimba C., and De La Oliva A. // Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing. — 2023. — P. 352–354.
18. Dedicated Restricted Target Wake Time for Real-Time Applications in Wi-Fi 7 / Belogaev A., Shen X., Pan C., Jiang X., Blondia C., and Famaey J. // 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) / IEEE. — 2024. — P. 1–6.
19. R-TWT in Wi-Fi 7 and Beyond: Enabling Bounded Latency, Energy Efficiency, and Reliability / Mozafariahrar E., Wilhelmi F., Galati-Giordano L., Imputato P., Menth M., and Avallone S. / ETFA. — 2025.
20. Time-Sensitive IIoT Flows over Wi-Fi: a Network Calculus Approach / Barroso-Fernández C., Martín-Pérez J., Ayimba C., and De La Oliva A. // IEEE Internet of Things Journal. — 2025.
21. Gu Z., Park J., Choi J. ScNeuGM: Scalable Neural Graph Modeling for Coloring-Based Contention and Interference Management in Wi-Fi 7 // arXiv preprint arXiv:2502.03300. — 2025.
22. Shlapak M.V., Stepanova E.A., Lyakhov A.I. Efficiency Analysis of TWT and R-TWT Mechanisms while Serving Delay-Sensitive Traffic // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 61, no. 4.

Study of virtual reality traffic delivery methods using R-TWT mechanism

D. V. Bankov, A. I. Lyakhov, E. A. Stepanova

Currently, virtual reality (VR) devices are becoming more and more popular. For user convenience, these devices should be portable and able to exchange large amounts of data quickly and reliably through a wireless communication channel. To meet these requirements for the quality of service for VR traffic, the Wi-Fi 7 technology proposes a new mechanism called Restricted Target Wake Time (R-TWT). Using simulation, this paper investigates different VR traffic delivery methods in the Wi-Fi network using the R-TWT mechanism in combination with the basic random access mechanism.

KEYWORDS: VR traffic, R-TWT, QoS, Wi-Fi.