

# Об эффективности предварительного доступа к каналу для обслуживания трафика реального времени в сетях Wi-Fi\*

К.С. Чемров, Д.В. Банков, Е.М. Хоров

chemrov@wireless.iitp.ru, bankov@iitp.ru, khorov@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук,  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

**Аннотация** Обслуживание приложений реального времени — один из важнейших сценариев использования сетей Wi-Fi нового поколения, в частности, стандарта IEEE 802.11be. В данной работе предлагается использовать предварительный доступ к каналу (ПДК) для удовлетворения требований таких приложений на задержку и надежность. Данный метод сравнивается с методом, основанным на уменьшении длительности передачи несрочных кадров в сети. Для обоих подходов была разработана математическая модель передачи данных, с помощью которой было показано, что для интенсивности трафика реального времени ниже определенного значения выгоднее использовать ПДК, причём для типичных параметров трафика и сети выигрыш может достигать 60%.

## 1 Введение

В разных сферах деятельности человека стремительно развиваются приложения реального времени (англ. Real-Time Applications, RTA). К ним относятся облачные вычисления, видеостриминговый сервис, дистанционное управление, автоматизация производства, виртуальная и дополненная реальность. Устройства, обслуживающие данные приложения, становятся доступнее, из-за чего их трафик растёт с каждым годом. RTA требуют от технологии передачи данных низкой задержки (время доставки не более 1–10 мс) и высокой надежности (доля потерянных кадров менее  $10^{-5}$ ) [1, 2]. Для многих устройств использование проводных сетей невозможно или создаёт неудобства, что ставит непростую задачу достижения установленных требований в беспроводных сетях.

---

\* Исследование выполнено в МИЭМ НИУ ВШЭ за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-19-00580)

Комитет по стандартизации IEEE 802 LAN/MAN рассматривает RTA как очень важный сценарий использования сетей Wi-Fi следующего поколения. В 2018 году была создана специализированная рабочая группа по RTA (англ. RTA Topic Interest Group, RTA TIG). RTA TIG классифицировала сценарии, связанные с приложениями, чувствительными к задержке, и предложила много перспективных методов обеспечения их работы в сетях Wi-Fi [3]. Таким образом, RTA стали одним из главных объектов изучения и усовершенствования в ходе разработки следующего основного дополнения к стандарту Wi-Fi: 802.11be, также известного как Extremely High Throughput (EHT) [4].

Достижение низкой задержки в сетях Wi-Fi представляет собой непростою задачу. Устройства Wi-Fi используют метод множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA), который не позволяет прерывать передачи других станций. Поэтому даже устройство с высокоприоритетным и срочным кадром в очереди на передачу может ожидать до 5 мс, когда канал освободится. Также, дополнительные задержки вызывают повторные попытки передачи из-за коллизий — наложения кадров вследствие одновременного доступа к каналу несколькими станциями.

Предварительный доступ к каналу (ПДК) является простым и обратно совместимым способом уменьшить среднее время ожидания чужой передачи. В случае периодичного или предсказуемого RTA-трафика можно использовать механизм RTS/CTS для ПДК. Однако возникает вопрос о влиянии такого метода на пропускную способность станций, передающих менее срочные данные. Настоящая работа посвящена исследованию ПДК для передачи кадров RTA, а также эффективности сети при использовании такого подхода.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В Разделе 2 кратко описываются предложенные в литературе методы повышения качества обслуживания RTA в сетях Wi-Fi. Раздел 3 содержит информацию об исследуемых методах доступа к среде. Формальная постановка задачи и сценарий, в котором проводилось моделирование, приведены в Разделе 4. Разделы 5 и 6 содержат описание математической модели и полученные численные результаты соответственно. В Разделе 7 приведено заключение статьи.

## 2 Обзор литературы

Решения по использованию RTA в Wi-Fi изучаются как в рабочих группах IEEE 802.11, так и в научных работах. Решение, основанное на использовании технологии ортогонального множественного доступа с частотным разделением (англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), было исследовано в [5, 6] и представлено в RTA TIG. Технология OFDMA была введена в дополнении 802.11ax и развивается в рамках стандарта 802.11be. Она позволяет точке доступа выделять частотные ресурсы сразу нескольким станциям одновременно. Это позволяет использовать алгоритмы вы-

деления ресурсов для детерминированного и случайного доступа с целью достижения ограничений RTA.

Иной подход приоритизации трафика реального времени разработан в [7]. Предлагается ввести отдельную категорию доступа для RTA-трафика и использовать дополнительный радиointерфейс, работающий только в служебном канале. RTA-устройство отправляет в нем сигнал занятости при появлении кадров в очереди. Все устройства, получившие данный сигнал, должны немедленно прекратить передачу не-RTA-кадров. Сравнение данного и предыдущего методов проведено в работе [8].

Еще один пример повышения качества обслуживания RTA — использование многоканального доступа (англ. Multi-Link) [9]. Авторы предлагают станции бороться за доступ одновременно на нескольких частотных каналах и передавать данные на первом освободившемся. Такое решение может значительно понизить задержку доступа к среде.

Рассматриваются и более простые способы. Например, если станция ожидает появления срочного кадра, она может заранее начать отсчитывать отсрочку [10]. Это позволит уменьшить время доступа к каналу. В [11] предлагается ввести специальную категорию доступа (англ. Access Category, AC) в EDCA, (англ. Enhanced Distributed Channel Access) для трафика, чувствительного ко времени. QoS (англ. Quality-of-Service) параметры такой категории доступа должны гарантировать передачу RTA-кадров перед обычными.

В настоящей работе также рассматривается выделение категории доступа, QoS параметры которой можно выбрать более лояльно по отношению к не-RTA-трафику благодаря ПДК. Данное решение не требует использовать новые технологии, дополнительные радиointерфейсы или поддерживать передачу в нескольких частотных каналах. Это делает ПДК простым в реализации и совместимым с большинством существующих устройств методом поддержки RTA в сети Wi-Fi.

### 3 Исследуемые подходы к обслуживанию трафика, чувствительного к задержке

#### 3.1 Доступ к каналу в сетях Wi-Fi

В современных сетях Wi-Fi доступ к каналу осуществляется согласно EDCA. Устройства поддерживают очередь из кадров, ожидающих передачу. Когда новый кадр поступает в пустую очередь, среда прослушивается и, если она не занята, кадр сразу передается. В противном случае, устройство инициализирует счетчик отсрочки (англ. backoff) случайным целым значением из равномерного распределения на отрезке  $[0, CW_r - 1]$ , где  $r$  — число повторных попыток передачи, а  $CW_r$  — конкурентное окно (англ. Contention Window). При неудачных попытках оно экспоненциально увеличивается:

$$CW_r = \begin{cases} CW_{min}, & r = 0; \\ \min\{2CW_{r-1}, CW_{max}\}, & r \in (0, RL]. \end{cases}$$

По достижении предельного числа попыток передач (англ. Retry Limit, RL) станция отбрасывает кадр данных и начинает передавать следующий.

Счетчик отсрочки замораживается в случае занятого канала и размораживается, когда среда свободна в течение интервала времени  $AIFS$  (англ. Arbitration Interframe Space). По истечении каждого промежутка времени  $T_e$  счетчик уменьшается на единицу. Передача осуществляется, когда счетчик обнуляется.

Спустя интервал времени  $SIFS$  (англ. Short Interframe Space) принимающая станция должна передать кадр подтверждения (англ. acknowledgment, ACK), если кадр с данными был принят успешно. Если станция после отправки не получила ACK в течение промежутка времени  $AckTimeout$ , она считает передачу неуспешной.

EDCA различает несколько категорий доступа, для которых у станций отдельные очереди и функции отсрочки.  $AIFS$  равен  $SIFS + T_e \cdot AIFSN$ , где  $AIFSN$  — целое число от 2 до 15. Когда станция получает доступ к каналу, она имеет право занимать его на некоторый интервал времени, который не должен превышать заданного ограничения  $TXOP\ limit$ . Для каждой категории доступа определяются свои значения  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$ ,  $AIFSN$  и  $TXOP\ limit$ . Таким образом, варьирование QoS параметров для разных категорий доступа позволяет расставить приоритеты по типу трафика.

### 3.2 Механизм RTS/CTS

Для повышения эффективности использования канала при передаче больших кадров в сетях Wi-Fi используется механизм RTS/CTS (рис.1). Он заключается в отправке запроса на передачу (англ. Request-to-Send, RTS) передающим устройством и в ответ кадра разрешения передачи (англ. Clear-to-Send, CTS) принимающим устройством. Кадр RTS короткий, поэтому попадание в коллизию двух кадров RTS отнимает меньше времени, чем попадание длинных кадров данных.

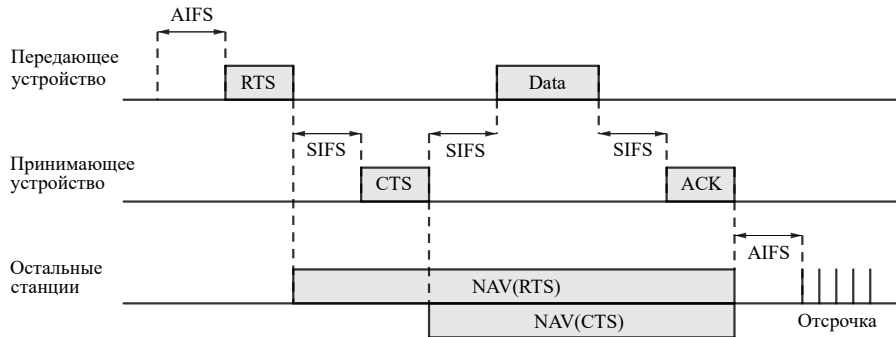


Рис. 1: Механизм RTS/CTS

В кадрах RTS/CTS дополнительно устанавливается длительность виртуальной занятости канала, в течение которой другие станции устанавливают NAV — индикатор периодов времени, когда передача не инициируется, независимо от того, чувствует ли станция занятость среды.

### 3.3 Подходы к обслуживанию RTA

Можно выделить отдельную категорию доступа для трафика, чувствительного ко времени. При этом минимальный и максимальный размер конкурентного окна должен быть не больше минимальной разницы  $AIFSN$ :

$$CW_{RTA} \triangleq CW_{max}^{RTA} = CW_{min}^{RTA} \leq \min\{AIFSN_{non-RTA} - AIFSN_{RTA}\} \triangleq \Delta_{AC}.$$

Тогда станция гарантированно выиграет доступ к каналу на фоне менее срочного трафика, но все равно остаётся задержка, связанная с ожиданием окончания чужой передачи. Чтобы уменьшить эту величину можно рассмотреть два подхода. Во-первых, устанавливать для категории доступа, не чувствительной ко времени, низкий  $TXOP\ limit$  в соответствии с требуемым ограничением на задержку. Однако уменьшение длительности кадров приводит к уменьшению пропускной способности сети.

В данной работе предлагается альтернативный метод, который заключается в предварительном доступе к каналу до появления кадра в очереди. Ожидая через время  $T_b$  поступления срочных данных (рис. 3), станция начинает попытку отправки RTS, который, в случае своевременной передачи, освободит канал. Таким образом, вероятность того, что срочный кадр появится, когда среда занята, может быть значительно уменьшена. Но при таком подходе мы сталкиваемся с ухудшением эффективности сети из-за отнимаемого предварительным доступом канального времени.

## 4 Сценарий и постановка задачи

В работе рассматривается сеть Wi-Fi, состоящая из точки доступа,  $N$  обычных станций и одной RTA-станции. Обычные работают в режиме насыщения, т. е. всегда имеют кадры в очереди на передачу. Они передают трафик одинаковой категории доступа с параметрами  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$ ,  $AIFSN$  и  $TXOP\ limit$ . RTA-станция генерирует срочные данные с некоторым периодом  $T_{period}$ . Предполагаемое время появления кадра — периодический процесс, а реальное время  $t_a$  распределено вокруг предполагаемого нормально, со стандартным отклонением  $\sigma$ . Категория доступа для RTA-трафика имеет параметры  $CW_{RTA}$  и  $AIFSN_{RTA}$ , который на  $\Delta_{AC}$  меньше, чем  $AIFSN$ .

Для уменьшения длительности коллизии  $T_c$  и повышения эффективности сети станции используют механизм RTS/CTS, поэтому  $T_c = T_{RTS} + AckTimeout$ . Коллизии с RTA-кадрами исключены выбранными QoS параметрами. Длины кадров с данными и подтверждением соответственно равны  $T_{data}$  и  $T_{ACK}$ . Тогда длительность успешной передачи обычного кадра

$T_s = T_{RTS} + SIFS + T_{CTS} + SIFS + T_{data} + SIFS + T_{ACK}$ , она всегда равна значению *TXOP limit*. Размер RTA-кадров фиксирован и длительность их передачи (с учетом *ACK*) равна  $T_{SR}$ .

RTA-трафик имеет следующие требования к качеству обслуживания: задержка при передаче кадров не должна превышать  $D_{max}$ , а вероятность потери пакета из-за превышения времени доставки не должна быть выше  $PLR_{QoS}$  (англ. Packet Loss Rate).

В таких условиях исследуются два сценария, описанные в разделе 3.3. В первом случае в зависимости от  $D_{max}$  изменяется *TXOP limit*, чтобы добиться требуемого значения  $PLR_{QoS}$ . Во втором сценарии, учитывая помимо  $D_{max}$  значение  $\sigma$ , выбирается время  $T_b$ , за которое нужно начинать доступ каналу с помощью механизма RTS/CTS. Предполагается, что станция может поддерживать канал в занятом состоянии, например, отправляя сигнал занятости среды. При этом, если кадр с данными не появляется, время владения каналом продлевается повторной отправкой RTS. При успешной передаче данных канал освобождается отправкой кадра CFEnd (англ. Contention Free-End). Если данные случайным образом пришли до отправки RTS, попытки ПДК отменяются и срочный кадр становится первым в очереди на передачу.

Задача работы заключается в поиске оптимальных  $TXOP\ limit = T_s$  и  $T_b$  для данных сценариев обслуживания RTA и определении условий, в которых ПДК оказывается более эффективным методом. В рамках оптимизационной задачи рассматриваются две функции. Целевая — средняя эффективность  $E$ , под которой понимается доля времени, когда передаются полезные данные обычными станциями. Функция ограничения — квантиль задержки  $Q$ , то есть время, за которое с вероятностью  $1 - PLR_{QoS}$  будет отправлен кадр. Таким образом, формально определяются задачи для сценария с ПДК и без (simple):

$$\begin{cases} E_{\text{ПДК}}(T_b, T_s) \Rightarrow \max \text{ по } T_b \text{ и } T_s; \\ Q_{\text{ПДК}}(T_b, T_s) \leq D_{max}; \end{cases} \quad \begin{cases} E_{\text{simple}}(T_s) \Rightarrow \max \text{ по } T_s; \\ Q_{\text{simple}}(T_s) \leq D_{max}. \end{cases} \quad (1)$$

## 5 Математическая модель

### 5.1 Модель станций с насыщенным трафиком

Поведение сети из станций, работающих в режиме насыщения, описывается аналогично тому, как это сделано в работах [12,13]. Все время разделяется на виртуальные слоты неравной длительности. Каждый такой слот начинается с уменьшения счетчика отсрочки. Если ни одна станция не обнулила счетчик, слот называется пустым и имеет длительность  $T_e$ . Если обнулила ровно одна или больше одной, то слот успешный или коллизийный соответственно. В длительности последних кроме времени передачи  $T_s$  или коллизии  $T_c$  входит *AIFS*.

Пусть  $\tau$  — вероятность того, что определенная станция передает в выбранном слоте, а  $p$  — вероятность коллизии, при условии передачи кадра.

Выделим одну станцию, вероятность того, что остальные не передают равна  $(1 - \tau)^{N-1}$ , тогда

$$p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}. \quad (2)$$

Определить  $\tau$  можно как отношение среднего числа слотов, когда станция передает, к общему количеству слотов:

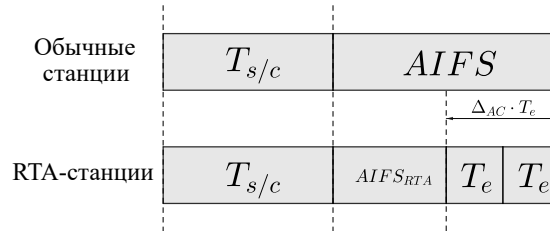
$$\tau = \frac{\sum_{r=0}^{RL} p^r}{\sum_{r=0}^{RL} \frac{CW_{r-1}}{2} p^r}, \quad (3)$$

где  $p^r$  — вероятность  $r + 1$  попытки передачи, а  $\frac{CW_{r-1}}{2}$  — среднее значение счетчика отсрочки.

Решив систему уравнений (2) и (3), можно найти  $p$  и  $\tau$ , необходимые для нахождения следующих величин.  $P_e = (1 - \tau)^N$ ,  $P_s = N\tau(1 - \tau)^{N-1}$  и  $P_c = 1 - P_e - P_s$  — вероятности того, что выбранный слот пустой, успешный и коллизийный соответственно.

## 5.2 Задержка отправки RTA-кадра

Станция за время  $T_b$  до предполагаемого поступления кадра в очередь генерирует RTS. Если канал в этот момент пуст, что происходит с вероятностью  $P_{te}$ , то станция сразу передает RTS. В случае, если канал занят успешной (с вероятностью  $P_{ts}$ ) или коллизийной (с вероятностью  $P_{tc}$ ) передачей, станция ожидает освобождения канала и отсчитывает счётчик отсрочки перед передачей RTS. Передав RTS, станция владеет канал до прихода кадра данных.



**Рис. 2:** Сравнение виртуальных слотов

Под задержкой  $D$  понимается время от момента поступления кадра в очередь до окончания передачи. Во-первых, эта величина зависит от того, во время какого виртуального слота начинается отправка RTS. При этом, по сравнению с обычными станциями, для RTA-станции больше пустых слотов, а длительность коллизийных и успешных сокращена (рис.2). Это связано

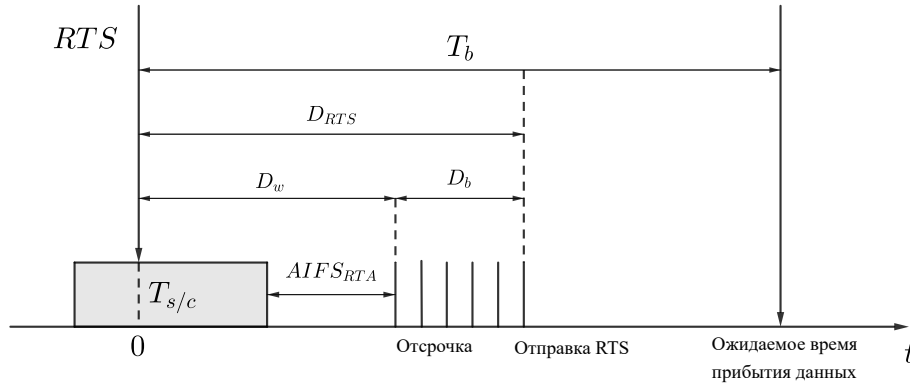
с различием в  $AIFS$ : пока обычные станции ждут остаток  $\Delta_{AC} \cdot T_e$ , срочные кадры могут передаваться. Среднее количество пустых слотов больше на  $\Delta_{AC} \cdot (P_s + P_c)$ , а в длительность остальных входит  $T_{s/c}$  ( $T_s$  или  $T_c$ ) и  $AIFS_{RTA}$ . Таким образом, отношение среднего времени, когда канал пуст, успешен или коллизионен, к общему времени равно вероятности появления кадра в соответствующем слоте:

$$P_{te} = \frac{P_e T_e + (P_s + P_c) \cdot \Delta_{AC} \cdot T_e}{P_e T_e + P_s(T_s + AIFS) + P_c(T_c + AIFS)},$$

$$P_{ts} = \frac{P_s(T_s + AIFS_{RTA})}{P_e T_e + P_s(T_s + AIFS) + P_c(T_c + AIFS)},$$

$$P_{tc} = \frac{P_c(T_c + AIFS_{RTA})}{P_e T_e + P_s(T_s + AIFS) + P_c(T_c + AIFS)}.$$

В первом случае кадр RTS отправляется сразу. Иначе у него появляется случайная задержка  $D_{RTS}$ , которая состоит из ожидания освобождения канала  $D_w$  (включая  $AIFS_{RTA}$ ) и обнуления счетчика отсрочки  $D_b$  (рис. 3):  $D_{RTS} = D_w + D_b$ .



**Рис. 3:** Задержка отправки RTS

RTS с равной вероятностью может прийти в любой момент занятого канала, то есть величина  $D_w$  имеет равномерную функцию распределения (4). Под нотацией  $s/c$  понимается принадлежность величин к случаю появления RTS в успешном или коллизионном слоте.

$$F_{w,s/c}(t) = \mathbb{P}(D_w \leq t|s/c) = \begin{cases} 0, & t < AIFS_{RTA}; \\ \frac{t}{T_{s/c}}, & AIFS_{RTA} \leq t < T_{s/c} + AIFS_{RTA}; \\ 1, & t \geq T_{s/c} + AIFS_{RTA}. \end{cases} \quad (4)$$



Так как счетчик отсрочки принимает целые числа, величина  $D_b$  имеет дискретное равномерное распределение:

$$\mathbb{P}(D_b = i) = \frac{1}{CW_{RTA}}, \quad i = \overline{0, CW_{RTA} - 1}. \quad (5)$$

Используя (4) и (5), можно определить распределение задержки передачи RTS:

$$F_{RTS,c/s}(t) = \mathbb{P}(D_{RTS} \leq t|c/s) = \mathbb{P}(D_w \leq t - D_b) = \sum_{i=0}^{CW-1} \frac{1}{CW} F_{w,c/s}(t - i \cdot T_e).$$

Учитывая появление в трех возможных типах слотов:

$$F_{RTS}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ P_{te} + P_{ts} \cdot F_{RTS,s}(t) + P_{tc} \cdot F_{RTS,c}(t), & t \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Если взять время генерирования RTS за 0, то математическое ожидание времени прибытия данных  $t_a$  совпадет с  $T_b$ . Тогда плотность вероятности  $t_a$  имеет вид:

$$f_{t_a}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - T_b)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (7)$$

В случае, когда RTS передается до появления кадра данных, канал свободен для RTA-станции и в задержку входит только время передачи:  $D = T_{SR}$ . Иначе может быть два варианта. Во-первых, срочные данные могут поступить до поступления RTS в очередь, т.е. в момент  $t < 0$ . В этом случае задержка будет распределена аналогично (6):  $F_{RTS}(t - T_{SR})$ . Вероятность такого исхода можно найти из (7):

$$\mathbb{P}(t_a \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f_{t_a}(t) dt.$$

Во-вторых, при  $t_a > 0$  из-за задержки RTS RTA-станция может не завладеть каналом до появления данных ( $t_a < D_{RTS}$ ). Тогда  $D$  будет состоять из остатка  $D_{RTS}$  и времени передачи кадра (рис.4), т.е.  $D = D_{RTS} - t_a + T_{SR}$ .

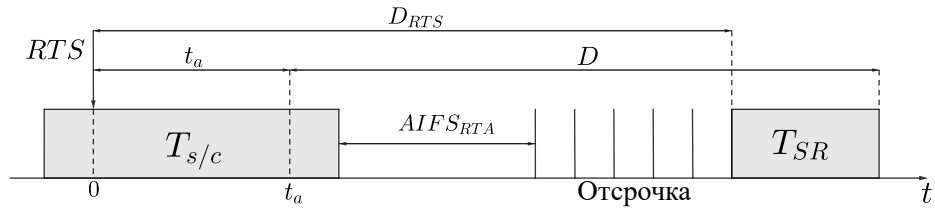


Рис. 4: Задержка отправки данных при  $t_a > 0$

Объединение описанных случаев дает функцию распределения задержки в методе ПДК:

$$F_{D,}(x) = F_{RTS}(x - T_{SR}) \int_{-\infty}^0 f_{t_a}(t)dt + \int_0^{\infty} f_{t_a}(t)F_{RTS}(t + x - T_{SR})dt. \quad (8)$$

В методе без ПДК вместо кадра RTS за доступ к каналу конкурирует кадр данных, и поэтому задержка его передачи распределена согласно (6):

$$F_{D,simple}(x) = F_{RTS}(x - T_{SR}). \quad (9)$$

### 5.3 Эффективность использования канала

В сети без устройства со срочным трафиком средняя эффективность находится как отношение среднего времени передачи полезных данных в слоте к среднему размеру слота:

$$E_{w/o RTA} = \frac{P_s \cdot T_{payload}}{P_e T_e + P_s(T_s + AIFS) + P_c(T_c + AIFS)}, \quad (10)$$

где  $T_{payload}(T_s) = T_s - (T_{RTS} + SIFS + T_{CTS} + T_{header} + SIFS + T_{ACK})$  — время передачи полезной информации в одном кадре.

Добавляя в сеть станцию, обслуживающую RTA, необходимо учесть, что раз в период  $T_{period}$  она занимает канал на время  $T_{RTA}$ :

$$E = \left(1 - \frac{T_{RTA}}{T_{period}}\right) \cdot E_{w/o RTA}. \quad (11)$$

Без ПДК в отнимаемое канальное время входит только длительность кадра и  $AIFS$ :  $T_{RTA} = T_{SR} + AIFS_{RTA}$ .

Успешный предварительный доступ к каналу увеличивает  $T_{RTA}$  на  $t_a - D_{RTS}$ . Если RTS появился в пустой слот, остается  $t_a$ , распределенная нормально. Иначе математическое ожидание такого прироста находится из плотностей вероятности (7) и  $f_{RTS,s/c} = \frac{dF_{RTS,s/c}(t)}{dt}$ :

$$\int_0^{\infty} \int_0^x (x-t) \cdot f_{t_a}(x) \cdot f_{RTS,s/c}(t) dt dx = \int_0^{\infty} f_{t_a}(x) \int_0^x F_{RTS,s/c}(t) dt dx.$$

Учитывая случаи трех возможных типов слота, можно найти среднее значение  $t_a - D_{RTS}$ :

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} f_{t_a}(x) \left( P_{te} \cdot x \cdot + \int_0^x (P_{ts} \cdot F_{RTS,s}(t) + P_{tc} \cdot F_{RTS,c}(t)) dt \right) dx = \\ = \int_0^{\infty} f_{t_a}(x) \int_0^x F_{RTS}(t) dt dx. \end{aligned}$$

Также в случае ПДК до поступления данных необходимо прибавить длительность передачи RTS/CTS и CFEnd. Объединение с рассмотренным выше дает:

$$T_{RTA} = T_{SR} + AIFS_{RTA} + \int_0^{\infty} f_{t_a}(x) \int_0^x F_{RTS}(t) dt dx + \\ + (T_{RTS} + SIFS + T_{CTS} + SIFS + T_{CFEnd}) \cdot \int_0^{\infty} f_{t_a}(x) F_{RTS}(x) dx.$$

Таким образом, зная  $T_{RTA}$ , по формуле (11) можно найти эффективности сети для двух исследуемых методов.

#### 5.4 Оптимизация

Для решения задачи (1), поставленной в Разделе 4, найдём квантиль задержки  $Q$ , соответствующий вероятности доставки пакета  $1 - PLR_{QoS}$ . Получим уравнения на функцию распределения  $F_D(t)$ :

$$F_{D, simple}(Q_{simple}(T_s)) = 1 - PLR_{QoS}, \\ F_{D, ПДК}(Q_{ПДК}(T_b, T_s)) = 1 - PLR_{QoS}.$$

Данные уравнения определяют функциональную зависимость между параметрами  $T_s$  и  $T_b$  и максимально допустимой задержкой  $D_{max}$ .

В случае с ПДК и без фиксируются все параметры, кроме  $T_b$  и  $TXOP\ limit = T_s$ . Формула (10) приводится к виду:

$$E_{w/o\ RTA}(T_s) = 1 - \frac{P_e T_e + P_s(AIFS + const) + P_c(T_c + AIFS)}{P_e T_e + P_s(T_s + AIFS) + P_c(T_c + AIFS)}.$$

Видно, что для обычного метода надо просто максимизировать  $T_s$  так, чтобы выполнить ограничение на квантиль задержки. При этом основной вклад в задержку — это  $T_s$ , поэтому поиск оптимального значения сводится к решению:

$$Q_{simple}(T_s) = D_{max}.$$

В сценарии с ПДК также нужно максимизировать  $T_s$ . Увеличение  $T_b$  понижает квантиль задержки, но повышает отнимаемое у обычных станций канальное время. Поэтому зафиксировав  $T_s$ , можно найти оптимальное  $T_b$  как минимальное значение, при котором выполняется ограничение на задержку:

$$Q_{ПДК}(T_b) = D_{max}.$$

$T_e$	$SIFS$	$T_{SR}$	$T_{RTS}$	$T_{ACK}$	$T_{CFEnd}$	$AckTimeout$	$T_{header}$
9 мкс	16 мкс	191, 2 мкс	67, 2 мкс	53, 6 мкс	67, 2 мкс	53 мкс	40 мкс
$AIFSN$	$\Delta_{AC}$	$CW_{RTA}$	$CW_{min}$	$CW_{max}$	$RL$	$N$	$PLR_{QoS}$
4	2	2	16	1024	7	10	$10^{-5}$

Таблица 1: Параметры моделирования

## 6 Численные результаты

Численные параметры моделирования приведены в таблице 1. Длительность всех кадров была вычислена для сигнально-кодовой конструкции (СКК) MCS 0. В модели предполагалось, что данная СКК достаточно надежная и кадры не теряются из-за случайного шума в канале.

На рис. 5 представлены результаты аналитического и имитационного моделирования двух методов обслуживания RTA-трафика для некоторых значений стандартного отклонения  $\sigma$  и максимальной задержки  $D_{max}$ : графики зависимости квантиля задержки  $Q$  от  $TXOP\ limit$  и средней эффективности использования канала  $E$  от периода поступления RTA-кадров  $T_{period}$ .

В методе с ПДК выбран  $TXOP\ limit = 5$  мс для достижения максимального выигрыша в эффективности. При этом на левых графиках рис. 5 видно, что при меньших значениях квантиль также почти не поднимается выше  $D_{max}$ . Это следствие выбора времени генерации RTS в зависимости от  $TXOP\ limit$ :  $T_b = TXOP\ limit - const$ , где  $const$  оптимизируется в зависимости от параметров  $\sigma$  и  $D_{max}$ .

Из правых графиков рис. 5 видно, что есть некоторое значение периода RTA-кадров  $T_{period}^*$ , выше которого эффективнее использовать метод предварительного доступа. Найти это значение можно из уравнения:

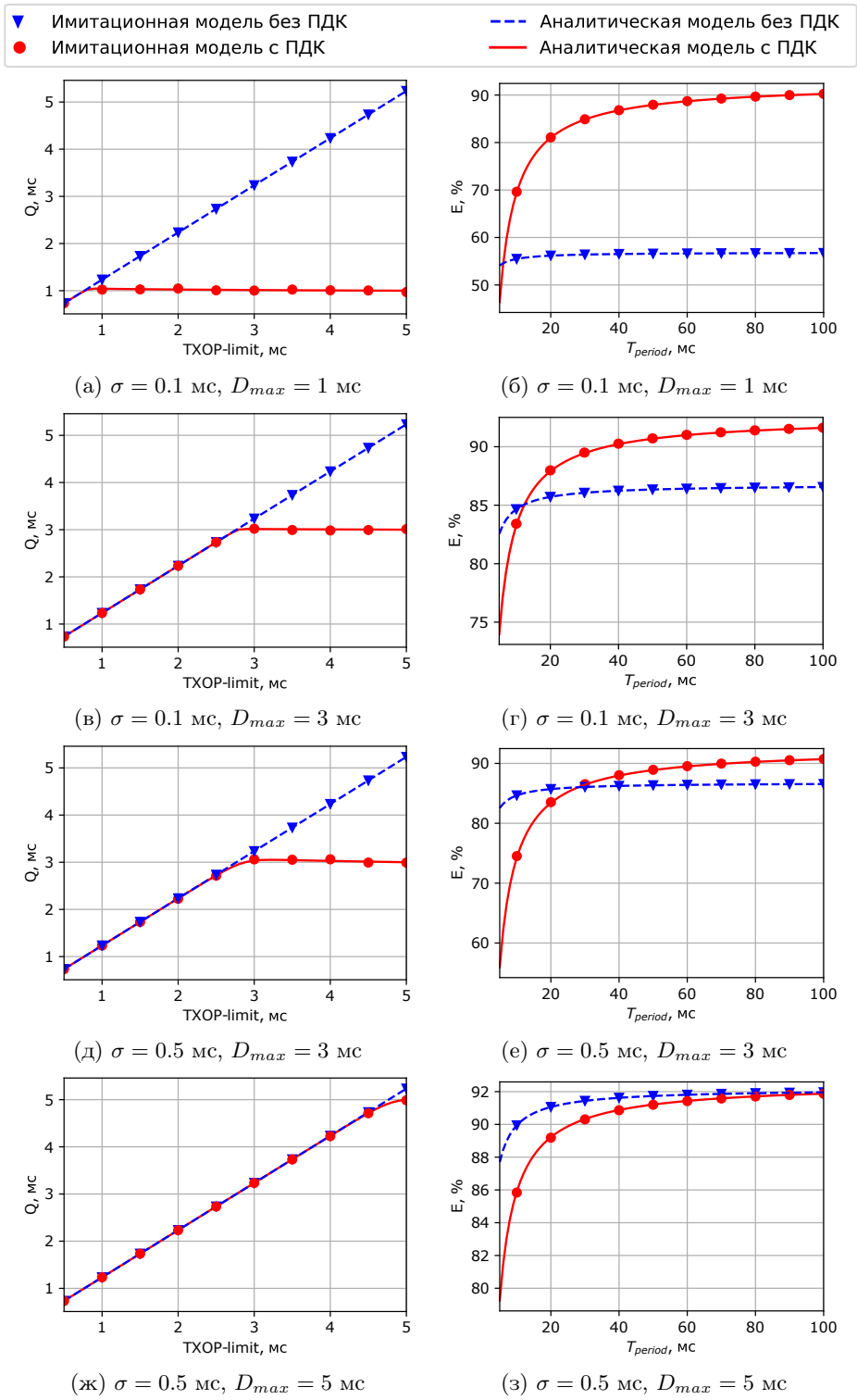
$$E_{simple}(T_{period}^*) = E_{ПДК}(T_{period}^*).$$

Из рис. 5б и 5г видно, что с ростом максимальной задержки растёт и  $T_{period}^*$  с 6 мс до 12.5 мс. А рис. 5г и 5е показывают, что увеличение стандартного отклонения времени появления RTA-кадров  $\sigma$  также увеличивают период, при котором эффективнее использовать ПДК до 28 мс.

Выигрыш в эффективности тоже зависит от значений  $\sigma$  и  $D_{max}$ . В случае  $\sigma = 0.1$  мс и  $D_{max} = 1$  мс (рис. 5б) он достигает  $\approx 60\%$ . А при увеличении  $D_{max}$  и  $\sigma$  (рис. 5г и 5е) выигрыш падает до 6% и 5% соответственно. Первое объясняется меньшей разницей  $TXOP\ limit$ , а второе необходимостью раньше начинать доступ к каналу.

При ограничении  $D_{max} = 5$  мс (рис. 5ж) не получается выбрать значительно больший  $TXOP\ limit$  в методе с ПДК. А выигрыша в эффективности нет даже при  $T_{period} = 100$  мс (рис. 5з). Это объясняется тем, что большое значение  $D_{max}$  не требует сильно ограничивать  $TXOP\ limit$ .

Таким образом, для более строгих ограничений обслуживания RTA и интенсивности поступления срочных кадров ниже определённого значения



**Рис. 5:** Зависимости квантиля задержки от *TXOP limit* (слева) и эффективности от периода РТА-кадров (справа)

лучше использовать ПДК. Но повышение разброса времени появления данных уменьшает допустимую частоту кадров и выигрыш в эффективности.

## 7 Заключение

В данной работе изучен предварительный доступ к каналу (ПДК) в качестве метода обслуживания трафика реального времени. Было проведено сравнение такого подхода с более простым способом, заключающимся в ограничении интервала времени, на который обычная станция может занимать канал. В обоих сценариях RTA-трафик выделялся в отдельную категорию доступа, гарантирующую победу в борьбе за доступ к каналу на фоне менее срочного трафика.

Была разработана математическая модель, позволяющая определить оптимальное время, за которое нужно начинать доступ к каналу с помощью механизма RTS/CTS. С помощью модели также можно оценить выигрыш в эффективности и требуемый период поступления RTA-кадров.

Для обслуживания срочного трафика с невысокими требованиями на задержку лучше уменьшать время передачи обычных станций в сети. Предлагаемый в настоящей работе метод оказался эффективнее для более строгих ограничений на максимальную задержку. Однако важно, чтобы срочные кадры поступали не чаще, чем с определенным периодом. При этом увеличение стандартного отклонения времени прибытия данных отрицательно сказывается на эффективности использования ПДК.

## Список литературы

1. Discussion on Target Use Cases. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1978-04-0rta-discussion-on-target-use-cases-of-rta.pptx>.
2. Use Cases, Requirements and Potential Wireless Approaches for Industrial Automation Applications. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1889-01-0rta-use-cases-and-requirements-potential-wireless-approaches-for-industrial-automation-applications.pptx>.
3. IEEE 802.11 Real Time Applications TIG Report. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-2009-06-0rta-rta-report-draft.docx>.
4. Khorov Evgeny, Levitsky Ilya, Akyildiz Ian F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7 // IEEE Access. — 2020.
5. OFDMA Resource Allocation for Real-Time Applications in IEEE 802.11ax Networks / Evgeny Avdotin, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov // Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 2019 IEEE International / IEEE. — 2019.
6. Resource Allocation Strategies for Real-Time Applications in Wi-Fi 7 / Evgeny Avdotin, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov // 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.

7. Enabling real-time applications in Wi-Fi networks / Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Mark Sandal // International Journal of Distributed Sensor Networks. — 2019. — Vol. 15, no. 5. — P. 1550147719845312.
8. Авдотьин Е.С., Банков Д.В., Хоров Е.М. Сравнение двух методов поддержки приложений реального времени в сетях Wi-Fi // Сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИПФИ РАН «Информационные технологии и системы 2019». — 2019. — С. 43–51.
9. Multi-Link for Low Latency. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/20/11-20-0093-02-00be-multi-link-for-low-latency.pptx>.
10. Reducing Channel Access Delay for RTA Traffic. — Access mode: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/19/11-19-1960-01-00be-reducing-channel-access-delay-for-rta-traffic.pptx>.
11. Genc Eda, Del Carpio Luis Felipe. Wi-Fi QoS Enhancements for Downlink Operations in Industrial Automation Using TSN // 2019 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS) / IEEE. — 2019. — P. 1–6.
12. Bianchi Giuseppe. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function // IEEE Journal on selected areas in communications. — 2000. — Vol. 18, no. 3. — P. 535–547.
13. Vishnevsky Vladimir, Lyakhov Andrey. 802.11 LANs: saturation throughput in the presence of noise // International Conference on Research in Networking / Springer. — 2002. — P. 1008–1019.