

Математические модели современных механизмов энергосбережения в сетях Wi-Fi

Д.В. Банков*, А.И. Ляхов*, Е.А. Степанова***, Е.М. Хоров*

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

***Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Поступила в редколлегию 21.06.2023, Принята 10.07.2023

Аннотация—Стандарт Wi-Fi описывает ряд механизмов энергосбережения, основной идеей которых является периодическое отключение приемопередающего интерфейса для экономии энергии на прослушивании канала. В современных сетях Wi-Fi к таким механизмам относятся механизм целевого времени активности TWT (от англ.: Target Wake Time) и пробуждающий интерфейс WUR (от англ.: Wake-Up Radio). Несмотря на принципиальные различия данных механизмов, они оба используют планирование периодов активности, чередующихся с длительными интервалами отключения основного интерфейса. Отключение основного интерфейса приводит не только к экономии энергии, но и к потере синхронизации часов энергосберегающих станций с часами точки доступа из-за влияния эффекта дрейфа часов, что может негативно влиять на эффективность этих механизмов. В данной работе разработаны математические модели передачи кадров от точки доступа к энергосберегающим станциям с использованием механизмов TWT и WUR. Модели учитывают влияние дрейфа часов и позволяют оценить эффективность рассматриваемых механизмов с точки зрения средней потребляемой мощности и средней задержки доставки кадра.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Энергосбережение, TWT, WUR, дрейф часов, сети Wi-Fi.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_2.1_313

1. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент технология Wi-Fi является одной из самых универсальных технологий беспроводной передачи данных, позволяющей широкому кругу устройств обслуживать различные виды трафика: от единичных кадров раз в сутки для устройств Интернета вещей до насыщенных потоков для участников видеоконференций. Из-за этого все чаще отличительной чертой сетей Wi-Fi является гетерогенность. Подавляющее большинство устройств Wi-Fi являются портативными, т.е. работают от аккумуляторов/батарей, что приводит к возникновению проблемы энергосбережения. Особенно острой данная проблема является для сетей Интернета вещей, поскольку их устройства (датчики, счетчики, актуаторы и т.д.) должны годами работать от одного заряда батареи.

Еще с первой версии стандарта Wi-Fi клиентские станции могли работать в энергосберегающем режиме. В нем станция периодически переключается между состоянием сна, в котором ее радиointерфейс выключен для экономии энергии, и состоянием бодрствования, в котором радиointерфейс активен и может выполнять обмен кадрами. Базовый механизм энергосбережения при передаче кадра от точки доступа энергосберегающей станции (далее PS-станции, от англ.: Power Saving) работает следующим образом. Точка доступа буферизует кадры для станции, находящейся в состоянии сна, и информацию о них рассылает в специальных кадрах — биконах. После получения бикона станция, используя стандартный метод случайного доступа

к каналу, отправляет точке доступа кадр PS-Poll, являющийся запросом на получение кадров. В ответ на него точка доступа отправляет станции буферизованные для нее кадры. Таким образом, при использовании базового механизма PS-станция должна периодически просыпаться, чтобы прослушивать биконы и конкурировать за доступ к каналу. Однако, если трафик для PS-станции достаточно редкий, энергия, затрачиваемая на прослушивание биконов, вносит значительный вклад в энергопотребление станции.

Эта проблема привела к созданию механизма целевого времени активности TWT (от англ.: Target Wake Time) и пробуждающего интерфейса WUR (от англ.: Wake-Up Radio). Механизм TWT впервые был представлен в дополнении IEEE 802.11ah к стандарту Wi-Fi, опубликованном в 2017 году. Далее механизм TWT был модифицирован для новых сценариев в дополнении IEEE 802.11ax и продолжает развиваться в дополнении IEEE 802.11be. Механизм TWT позволяет станции и точке доступа заранее запланировать время обмена кадрами, чтобы в оставшееся время станция могла находиться в спящем режиме. Отметим, что дополнение IEEE 802.11ax к стандарту Wi-Fi, представляя механизм TWT, описывает ряд режимов работы механизма, которые определяют способ начала обмена кадрами, способ завершения периода активности и т.д., однако стандарт не регламентирует, какой режим следует использовать в каком сценарии. Пробуждающий интерфейс WUR, представленный в дополнении IEEE 802.11ba, является дополнительным радиоинтерфейсом, потребляющим в сотни раз меньшую энергию, чем основной интерфейс. Для обмена данными точка доступа при помощи интерфейса WUR отправляет станции специальный кадр пробуждения, получив который, станция включает основной радиоинтерфейс, а после обмена кадрами отключает его. Отметим, что интерфейс WUR может как быть активным постоянно, так и отключаться периодически аналогично основному радиоинтерфейсу для еще большего энергосбережения. Оба механизма войдут в сборку IEEE 802.11 2024 года, поэтому возникает вопрос: *какой из механизмов энергосбережения использовать и в каком режиме?*

Также важно отметить, что часы реальных устройств несовершенны и это приводит к появлению эффекта дрейфа часов. Он проявляется в том, что значение часов может отклоняться на случайную величину, предельное значение которой определяется временем, прошедшим с момента последней синхронизации. В то же время работа механизмов TWT и WUR основана на длительном отключении основного интерфейса, что приводит к значительным временным интервалам без синхронизации часов, т.е. к увеличению максимально возможного отклонения часов. Поскольку механизмы TWT и WUR в своей работе используют планирование интервалов активности, значительное отклонение часов может оказать критическое влияние на их эффективность.

В данной статье разрабатываются математические модели передачи кадров от точки доступа энергосберегающим станциям, учитывающие эффект дрейфа часов и позволяющие оценить эффективность различных режимов работы механизма TWT и WUR в терминах потребляемой мощности и задержки доставки кадров и рекомендовать использование определенного режима в зависимости от параметров сети и передаваемого трафика.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткое описание исследуемых механизмов энергосбережения. В разделе 3 представлен обзор существующих работ. Раздел 4 содержит математические модели передачи кадров от точки доступа станциям, использующим рассматриваемые режимы механизмов энергосбережения. В разделе 5 проведена оценка точности разработанных математических моделей и исследована эффективность механизмов TWT и WUR в зависимости от параметров трафика в сети. Заключение содержится в разделе 6.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Метод случайного доступа EDCA

Перед тем, как перейти к описанию механизмов энергосбережения, упрощенно опишем базовый механизм случайного доступа к каналу в сетях Wi-Fi EDCA (от англ.: Enhanced Distributed Channel Access), который используется станциями для передачи кадров в сети. Станция прослушивает канал, и если кадр приходит в пустую очередь для передачи, а канал свободен, то станция сразу передает данный кадр. Если же кадр для передачи оказался в очереди, а канал при этом занят, то станция взводит счетчик случайной отсрочки, равновероятно выбирая целочисленное значение из интервала $[0, CW_{min} - 1]$, где CW_{min} — начальное значение конкурентного окна. Уменьшение значения счетчика на единицу происходит, когда канал был свободным в течение: а) интервала T_{AIFS} после успешной передачи в канале; б) интервала T_{EIFS} после задетектированной неудачной передачи; в) интервала Δ , если канал был свободен. Пока канал занят, значение счетчика остается неизменным. Станция передает кадр данных, когда значение счетчика отсрочки становится равным нулю. Если кадр доставлен успешно, то через межкадровый интервал T_{SIFS} после завершения приема кадра станция, его получившая, отправляет в ответ специальный кадр подтверждения Ack (от англ.: Acknowledgement). Если в ответ на отправленный кадр данных через интервал $T_{AckTimeout}$ станция не получает кадр Ack, то передача считается неудачной и выполняется повторная попытка передачи. При каждой следующей попытке передачи станция выбирает новое значение счетчика отсрочки из интервала $[0, CW_r - 1]$, где конкурентное окно:

$$CW_r = \begin{cases} CW_{min}, & r = 0, \\ \min \{2 \times CW_{r-1}, CW_{max}\}, & 0 < r \leq R, \end{cases} \quad (1)$$

r и R — значение счетчика повторных попыток передачи и его наибольшее значение, при достижении которого кадр больше не передается, CW_{max} — наибольшее значение конкурентного окна.

2.2. Базовый механизм энергосбережения

Станция может перейти в режим энергосбережения, предварительно уведомив об этом точку доступа и дождавшись от нее подтверждения. В режиме энергосбережения станция периодически отключает свой радиointерфейс для экономии энергии, поэтому точка доступа буферизует предназначенные для такой станции кадры. Информация о станциях, для которых есть буферизованные кадры, рассылается точкой доступа в биконах в виде таблицы TIM (от англ.: Traffic Indication Map). Отметим, что точка доступа генерирует биконы строго периодически в моменты ТВТТ (от англ.: target beacon transmission time), однако передаваться они могут с некоторой задержкой относительно ТВТТ, если канал окажется занят, даже несмотря на приоритизацию доступа к каналу путем использования короткого межкадрового интервала PIFS вместо AIFS. Если станция узнала из бикона о наличии буферизованных кадров, то для их получения она должна отправить точке доступа специальный кадр PS-Poll, используя метод случайного доступа EDCA. После получения кадра PS-Poll точка доступа понимает, что PS-станция перешла в состояние бодрствования и ожидает буферизованные кадры, которые могут быть отправлены как в ответ на полученный PS-Poll, так и позже, в таком случае PS-Poll подтверждается кадром Ack. Если кадры для PS-станции поступают в очередь на передачу точки доступа не в каждом бикон-интервале (временной интервал между последовательно передаваемыми биконами), а также для уменьшения конкуренции за доступ к каналу между PS-станциями после получения очередного бикона вводится период прослушивания биконов (от англ.: Listen Interval), который позволяет PS-станции по согласованию с точкой доступа

прослушивать не каждый бикон, а лишь некоторые с заданной периодичностью. Также отметим, что с определенной периодичностью точка доступа вместо обычного бикона передает DTIM-бикон (от англ.: Delivery TIM), сразу после которых для PS-станций передаются многоадресные кадры. Поэтому период прослушивания биконов следует устанавливать в соответствии с DTIM-периодом (период между отправкой последовательных DTIM-биконов) таким образом, чтобы прослушивать DTIM-биконы.

2.3. Target Wake Time

Механизм TWT предназначен для того, чтобы пара устройств (далее станция и точка доступа) заранее выбрала время обмена кадрами. Для этого определяется момент времени, начиная с которого PS-станция должна быть активна, и временной интервал TWT SP (от англ.: service period), в течение которого она должна быть готова к обмену кадрами. В оставшееся время станция может находиться в состоянии сна для экономии энергии.

Отметим, что механизм TWT имеет множество параметров настройки, далее опишем некоторые из них. При использовании явного назначения TWT SP станция и точка доступа в текущем TWT SP кроме обмена кадрами данных договариваются о начале следующего TWT SP, в то время как при неявном назначении сразу при установлении TWT выбирается период следования TWT SP относительно момента начала первого. Явное и неявное назначение TWT SP относится к TWT одной станции, в то время как групповое назначение TWT SP необходимо для группировки TWT разных станций и применяется в сетях Интернета вещей. При его использовании станции объединяются в группу, среди них выбирается станция, для которой назначается начало TWT SP, а оставшиеся станции вычисляют начало своего TWT SP по заданному для группы шагу между TWT SP и своему номеру в группе относительно начала первого TWT SP. Параметр $T_{minWake}$ определяет минимальное время после начала TWT SP, в течении которого PS-станция должна быть в состоянии бодрствования даже в случае, когда ей не приходят кадры от точки доступа. Станция может перейти в состояние сна до окончания интервала $T_{minWake}$ только в случае, если она получит от точки доступа кадр, в котором указывается, что дальнейшего обмена кадрами не будет. Таким образом можно выделить два режима работы механизма TWT: активный и пассивный, определяющие способ завершения PS-станцией TWT SP. При использовании **активного TWT** PS-станция переходит в состояние сна только после получения кадра от точки доступа, причем это может быть как кадр буферизованных данных, так и пустой кадр (Null-кадр). В случае использования **пассивного TWT** при отсутствии у точки доступа кадра данных PS-станция переходит в состояние сна через заранее определенное фиксированное время $T_{minWake}$. Таким образом при использовании пассивного TWT PS-станция экономит энергию, которая затрачивалась бы на получение пустых кадров, но тратит энергию на прослушивание канала в течение интервала $T_{minWake}$.

2.4. Wake-Up Radio

Механизм WUR обеспечивает более оперативный обмен кадрами, чем механизм TWT, за счет использования дополнительного радиointерфейса, функционал которого описывает дополнение IEEE 802.11ba [2] к стандарту Wi-Fi. Особенностью интерфейса WUR является его низкая потребляемая мощность, которая по стандарту не может превышать значение в 1 мВт, что в сотни раз меньше потребления основного интерфейса [3]. Если точка доступа в сети IEEE 802.11ba хочет отправить PS-станции данные, то она при помощи интерфейса WUR отправляет станции специальный кадр пробуждения, получив который станция переводит свой основной интерфейс из состояния сна в состояние бодрствования, а после обмена кадрами опять отключает.

Подробное описание механизма WUR в сетях Wi-Fi можно найти в работе [16], далее перечислим самые важные его особенности. Для достижения низкой потребляемой мощности интерфейс WUR передает сигнал в полосе 4 МГц, а для обеспечения обратной совместимости с остальными устройствами в сети кадр начинается со стандартной для сетей Wi-Fi преамбулы, передаваемой в полосе 20 МГц. Также отметим, что при помощи интерфейса WUR возможны только однонаправленные передачи кадров от точки доступа станциям без явных подтверждений, так как точка доступа имеет передатчик WUR, а станции — приемник.

Рассматривая работу интерфейса WUR с точки зрения энергопотребления, можно выделить два режима работы: активный и использующий процедуру рабочего цикла (от англ.: duty cycle). Режим **активного WUR** заключается в том, что интерфейс WUR PS-станции постоянно включен и прослушивает канал, а при использовании **WUR с рабочим циклом** станция отключает интерфейс WUR в соответствии с согласованным с точкой доступа расписанием для экономии энергии.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема энергосбережения в сетях Wi-Fi уже давно привлекает внимание научного сообщества, существует много работ [7–13], посвященных этой теме, в которых не только исследуются новейшие механизмы энергосбережения, но и предлагаются новые подходы к реализации давно существующих. Например, авторы [14] предлагают внести изменения в программное обеспечение устройств Wi-Fi, позволяющие динамически изменять период прослушивания би-конов в рамках базового механизма энергосбережения, основываясь на информации о состоянии заряда батареи станции, а также предлагают способ более эффективного использования буфера точки доступа.

К настоящему моменту существует достаточно много работ, которые изучают механизм TWT. Однако мало работ, в которых данный механизм сравнивается с другими механизмами энергосбережения [15–17]. Первые работы, исследовавшие TWT в рамках дополнения IEEE 802.11ah, показывают эффективность использования TWT как механизма энергосбережения [18, 19], а также изучают режим группировки TWT [20] в контексте влияния дрейфа часов и совместное использование механизмов TWT и окна ограниченного доступа RAW (от англ.: Restricted Access Window) [21]. Обширным классом работ, посвященных механизму TWT, являются работы, в которых предлагается использовать механизм TWT для уменьшения конкуренции за доступ к каналу, или даже организации полностью детерминированного доступа к каналу путем планирования передач при помощи механизма TWT [22–29]. Отметим, что такое использование механизма TWT не противоречит его изначальному предназначению как механизма энергосбережения, ведь снижение конкуренции за доступ к каналу позволяет станциям передавать без повторов, т.е. экономить энергию.

Рассматривая механизм WUR, обратим внимание на то, что идея использования дополнительного маломощного интерфейса, позволяющего экономить энергию на прослушивании канала и минимизирующего задержку доставки кадров, родилась достаточно давно и на данный момент существует огромное количество работ, посвященных как конструкциям приемников и передатчиков WUR, так и протоколам уровня доступа к каналу, которые качественно систематизированы авторами работы [33]. Также отметим, что после выхода дополнения IEEE 802.11ba к стандарту Wi-Fi фокус внимания исследователей сместился в сторону разработки как приемников WUR, удовлетворяющих стандарту [34, 35], так и анализа особенностей формирования кадра WUR [36].

Из-за предельно низкой мощности приемника WUR данный механизм обладает целым рядом недостатков, на исправлении которых и концентрируются исследователи. Из-за низкой скорости передачи кадров WUR кадры пробуждения имеют большую длительность, поэтому

авторы работ [37, 38] предлагают подходы, позволяющие уменьшить размер кадров WUR. Авторы [39] подошли к данной проблеме с другой стороны и предложили способ использования групповых кадров пробуждения, что позволяет уменьшить суммарное потребление канального времени интерфейсом WUR. Иной проблемой, вызванной малой мощностью приемника, являются ошибки декодирования кадров пробуждения, что приводит как к пропущенным, так и к ненужным пробуждениям. Эту проблему решают авторы работы [40] путем применения кодов с исправлением ошибок. Авторы работы [41] обращают внимание на то, что чувствительности приемников основного интерфейса и WUR значительно отличаются, поэтому станция может находиться в зоне покрытия точки доступа с точки зрения основного интерфейса и вне зоны покрытия интерфейса WUR, поэтому в данной работе исследуется влияние ретрансляции кадров пробуждения на эффективность механизма WUR.

Отметим, что дополнение IEEE 802.11ba к стандарту Wi-Fi совместимо с основным стандартом, поэтому возникают исследования механизма WUR в сетях, в которых кроме устройств WUR есть и обычные станции Wi-Fi. Авторы работы [42] исследуют влияние трафика обычных станций на эффективность механизма WUR и приходят к выводу, что для отправки кадров WUR необходимо использовать приоритизацию доступа к каналу. Авторы [43] исследуют использование WUR в сетях IEEE 802.11ax и показывают, как планирование доступа к каналу в сетях IEEE 802.11ax совместно с использованием механизма WUR позволяет уменьшить задержку доставки кадра при обеспечении низкого уровня энергопотребления.

Несмотря на то, что на данный момент существует большое количество работ, исследующих различные аспекты механизмов TWT и WUR, влияние эффекта дрейфа часов, возникающего из-за потери синхронизации при длительном отсутствии прослушивания канала основным интерфейсом, исследовано недостаточно. Статья [20] изучает влияние дрейфа часов на эффективность режима группировки TWT в рамках IEEE 802.11ah, в то время как статья [17] оценивает его влияние на эффективность механизмов TWT и WUR для восходящего трафика. В работе [44] при помощи имитационного моделирования начато исследование влияния эффекта дрейфа часов на эффективность механизмов TWT и WUR в терминах энергопотребления и задержки передачи кадров с учетом нисходящего трафика для PS-станций и наличия в сети насыщенных станций. Однако для более глубокого изучения механизмов TWT и WUR путем варьирования как периодов пробуждения, так и интенсивности поступления и длин передаваемых в сети кадров в рассматриваемом сценарии целесообразно использовать математических моделей. Поэтому целью данной работы является *разработка математических моделей сетей Wi-Fi с нисходящим трафиком для PS-станций при использовании механизмов TWT и WUR, учитывающих влияние эффекта дрейфа часов.*

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

4.1. Сценарий

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из точки доступа, N станций, передающих кадры длительности T_{Data} точке доступа в режиме насыщения, и S PS-станций, получающих кадры от точки доступа и использующих один из режимов механизмов энергосбережения: активный или пассивный режим TWT, активный WUR или WUR с рабочим циклом. Все станции находятся в зоне радиовидимости друг друга. Часы PS-станций подвержены влиянию эффекта дрейфа часов, их отклонение относительно часов точки доступа имеет усеченное нормальное распределение с дисперсией σ^2 . Предельное значение отклонения часов принимаем равным $m \cdot T_{drift} = 4\sigma$, где T_{drift} — время, прошедшее с последней синхронизации, $m = 100 \text{ ppm} = 0.01\%$ (от англ.: parts per million, миллионная доля) — параметр дрейфа часов. Вероятностью отклонения часов станции более 4σ пренебрегаем, так как рассматриваемый диапазон отклонений покрывает 99,99% возможных значений, что является достаточной точностью для данного ис-

следования. Для синхронизации PS-станции прослушивают DTIM-биконы. На точку доступа для каждой PS-станции поступает пуассоновский поток кадров размера L байт с интенсивностью λ . Все кадры, поступившие на точку доступа для передачи спящей PS-станции, точка доступа буферизует и далее агрегирует их в один, используя общий заголовок канального уровня, и передает, используя фиксированную сигнально-кодую конструкцию СККО. Для отправки кадра данных PS-станциям точка доступа использует приоритетные параметры доступа к каналу $AIFS = PIFS$, $CW_{min} = CW_{max} = 1$.

4.2. Исследуемые режимы энергосбережения

В данной статье рассматриваются активный и пассивный режимы работы TWT, активный WUR и WUR с рабочим циклом. Данные режимы были описаны в разделе 2, поэтому в данном разделе только предлагается подход к их использованию с учетом влияния дрейфа часов.

Для синхронизации собственных часов с часами точки доступа PS-станции прослушивают DTIM-биконы, что позволяет ограничить предельное значение отклонения часов значением $m \cdot T_{DTIM}$, T_{DTIM} — DTIM-интервал, т.е. период отправки DTIM-биконов. Отметим, что прослушивание DTIM-биконов необходимо не только для синхронизации часов, но и для актуализации информации о сети.

Если точка доступа и PS-станция используют механизм TWT, то PS-станция должна перейти в активное состояние к моменту T_{AP} на рис. 1 и 2, который соответствует началу запланированного TWT SP по часам точки доступа. Принимая во внимание влияние эффекта дрейфа часов, точка доступа планирует пробуждение PS-станции $T_{schedule}$ заранее за $m \cdot T_{drift}$ перед моментом T_{AP} , что соответствует предельному отклонению часов PS-станции за интервал времени T_{drift} , прошедший с момента последней синхронизации. Таким образом фактическое время пробуждения PS-станции T_{real} с учетом влияния дрейфа часов окажется не позже начала TWT SP по часам точки доступа.

Из-за того, что в сети, кроме PS-станций, есть пользовательские устройства, передающие насыщенные потоки кадров, к началу TWT SP канал может оказаться занят чужой передачей. В таком случае процесс отправки точкой доступа кадра для PS-станции («кадр данных» на рис. 1) может затянуться из-за конкуренции с насыщенными станциями за доступ к каналу, что приведет к значительным энергозатратам PS-станции на прослушивание канала. Чтобы этого избежать, предлагается на точке доступа использовать приоритетный доступ к каналу для

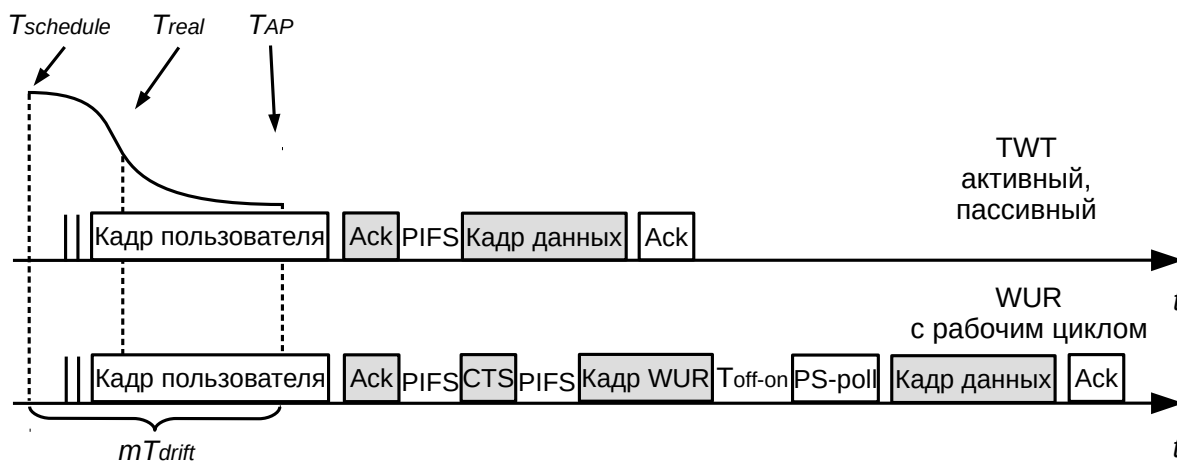


Рис. 1. Пример работы PS-станции при наличии у точки доступа кадра на передачу.

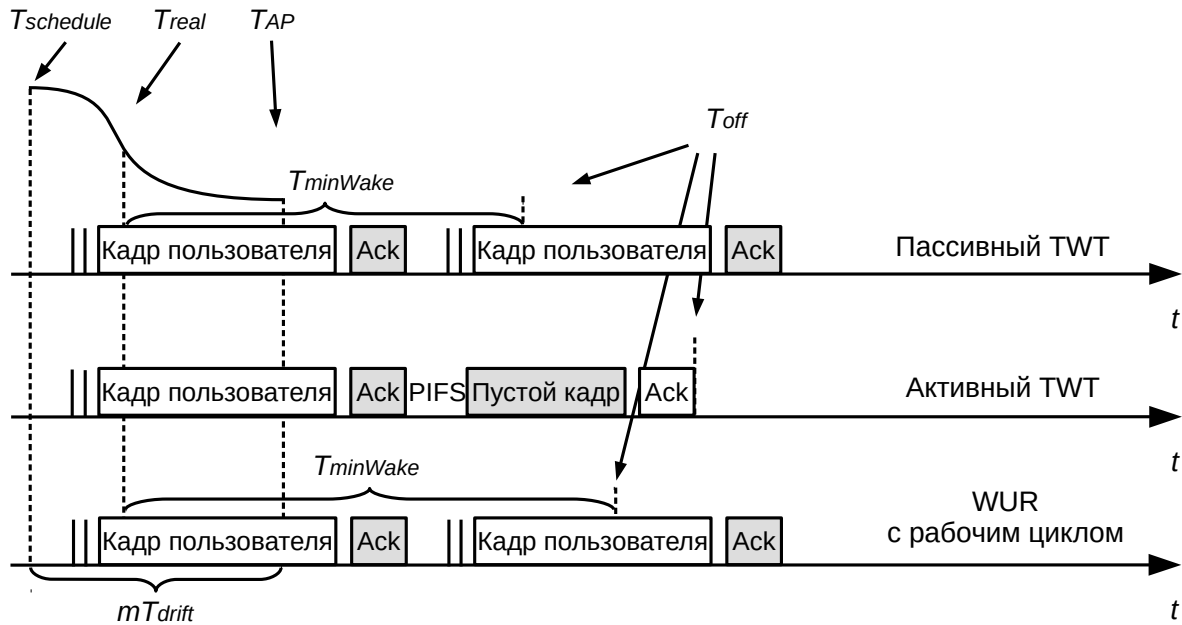


Рис. 2. Пример работы PS-станции при отсутствии у точки доступа кадра на передачу.

отправки кадров PS-станциям путем использования интервала *PIFS* при получении доступа к каналу — см. рис. 1.

Отметим, что при использовании режима активного TWT PS-станция завершает период активности (момент T_{off} на рис. 2) после получения кадра от точки доступа, поэтому передача кадра данных или пустого кадра выполняется в каждом TWT SP. При использовании пассивного режима механизма TWT PS-станция переходит в режим сна или после получения кадра данных от точки доступа, если такой кадр ей поступил, или после фиксированного временного интервала $T_{minWake}$. Таким образом, при использовании пассивного TWT PS-станция экономит энергию на получении пустых кадров, но тратит энергию на прослушивание канала.

При использовании механизма WUR также рассматривается два режима работы: активный и использующий процедуру рабочего цикла. При использовании активного режима интерфейс WUR станции постоянно находится в активном состоянии, поэтому точка доступа начинает процесс обмена кадрами сразу после поступления в очередь кадра данных для PS-станции. В случае WUR с рабочим циклом кадры для PS-станции буферизуются в течении периода сна интерфейса WUR, и точка доступа начинает получать доступ к каналу в запланированный момент времени T_{AP} на рис. 1, при этом интерфейс WUR PS-станции пробуждается заранее аналогично описанному для основного интерфейса при использовании механизма TWT. Если кадр для PS-станции не поступил на точку доступа к запланированному времени, то интерфейс WUR находится в бодрствующем состоянии фиксированное время $T_{minWake}$, после окончания которого возвращается в состояние сна.

Процесс обмена кадрами при использовании интерфейса WUR одинаков для обоих режимов, и предлагается начинать его с отправки точкой доступа кадра CTS-to-self, который резервирует канал для дальнейшего обмена кадрами, см. рис. 1. Защита кадра пробуждения, передаваемого интерфейсом WUR, необходима, так как кадр WUR может быть подтвержден только основным интерфейсом после пробуждения, что приводит к сложностям с определением коллизий и реализацией повторных передач. Как и для механизма TWT, точка доступа использует межкадровый интервал *PIFS* для отправки кадра CTS-to-self, чтобы уменьшить время нахождения PS-станции в активном состоянии. После отправки кадра CTS-to-self точка

доступа отправляет PS-станции кадр пробуждения, получив который PS-станция в течение времени T_{off-on} переводит основной интерфейс в активное состояние. Для того, чтобы явно проинформировать точку доступа о готовности к обмену кадрами, PS-станция отправляет точке доступа кадр PS-Poll, в ответ на который получает кадр данных и отправляет кадр Ack. После успешного получения буферизованных кадров от точки доступа основной интерфейс PS-станции переходит в состояние сна.

4.3. Общая часть математических моделей

Для оценки эффективности рассматриваемых режимов работы механизмов TWT и WUR построим модель сети Wi-Fi, описав обмен кадрами при помощи случайного процесса с дискретным временем. Единицей времени является виртуальный слот — интервал времени между двумя последовательными изменениями значения счетчика отсрочки. Все станции сети находятся в зоне радиовидимости друг друга, поэтому отсчет счетчиков отсрочки считаем синхронным. Считая, что кадр Ack передается на минимальной скорости и насыщенные станции передают кадры одинаковой длины, примем длительность коллизии равной длительности успешного обмена кадрами и $T_{EIFS} = T_{SIFS} + T_{Ack} + T_{AIFS}$. Считаем, что передачи PS-станций разнесены во времени и не влияют друг на друга, а также не влияют на вероятность передачи насыщенных станций. В таком случае для расчета вероятности передачи τ в виртуальном слоте какой-либо из насыщенных станций можно воспользоваться подходом, изложенным в статье [45]:

$$\begin{cases} \tau &= \frac{2 \cdot (1-2p)(1-p^R)}{CW_{min}(1-(2p)^R)(1-p) + (1-2p)(1-p^R)}, \\ p &= 1 - (1 - \tau)^N, \end{cases}$$

где p — вероятность коллизии данной станции в виртуальном слоте при условии ее передачи. Тогда вероятность того, что виртуальный слот пуст, равна:

$$P_e = (1 - \tau)^N,$$

и вероятность того, что канал свободен в случайный произвольно выбранный момент времени:

$$P_{ce} = \frac{\Delta \cdot P_e}{\Delta \cdot P_e + (T_b + T_{AIFS})(1 - P_e)}, \tag{2}$$

$$T_b = T_{Data} + T_{SIFS} + T_{Ack}, \tag{3}$$

где T_{Data} — длительность передачи кадра насыщенной станции, T_{Ack} — длительность передачи кадра подтверждения, T_{SIFS} и T_{AIFS} — длительности соответствующих межкадровых интервалов, T_b — длительность обмена кадрами для насыщенных станций без учета следующего за кадром Ack межкадрового интервала. Заметим, что в рассматриваемом сценарии точка доступа использует интервал PIFS вместо AIFS для отправки кадров энергосберегающим станциям, а также при отправке биконов, поэтому перед их отправкой вероятность того, что канал окажется свободным:

$$P_{ce}^* = \frac{\Delta \cdot P_e}{\Delta \cdot P_e + (T_b + T_{PIFS})(1 - P_e)}. \tag{4}$$

Общей частью энергопотребления для всех рассматриваемых режимов TWT и WUR являются энергозатраты W_{DTIM} , связанные с получением DTIM-биконов при синхронизации часов. Отметим, что с учетом влияния дрейфа часов PS-станция должна планировать пробуждение заранее, т.е. за $m \cdot T_{DTIM}$ перед ТВТТ, чтобы не пропустить его передачу, см. рис 3.

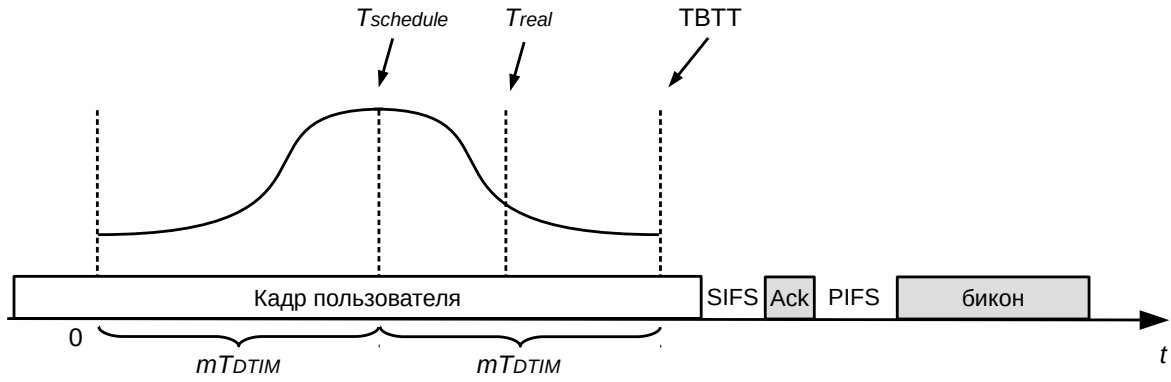


Рис. 3. Пример занятости канала при пробуждении PS-станции для приема бикона.

При таком планировании пробуждения PS-станция проснется в случайный момент времени в интервале $(0, 2m \cdot T_{DTIM})$ до ТВТТ, тогда в среднем от момента пробуждения до ТВТТ PS-станция будет прослушивать канал в течение интервала $m \cdot T_{DTIM}$ и затратит на это прослушивание энергию W_{DTIM}^{wake} :

$$W_{DTIM}^{wake} = m \cdot T_{DTIM} \overline{M^*}_{slot}, \quad (5)$$

$$\overline{M^*}_{slot} = P_{ce}^* M_{idle} + (1 - P_{ce}^*) M_{RX}, \quad (6)$$

где $\overline{M^*}_{slot}$ — средняя потребляемая мощность станции в процессе отсчета отсрочки при использовании интервала PIFS между передачами, M_{RX} и M_{idle} — мощности PS-станции при приеме кадра и в пустом канале соответственно. Отметим, что в (6) используется P_{ce}^* , так как для отправки биконов точка доступа использует приоритетный доступ к каналу при помощи короткого межкадрового интервала PIFS.

Если в момент ТВТТ канал окажется занят передачей насыщенной станции, вероятность чего равна $1 - P_{ce}^*$, то точка доступа отправит бикон через PIFS после окончания передачи кадра Ack или соответствующего момента времени в случае коллизии. Отметим, что если станция пробуждается в течение передачи кадра, то из-за того, что преамбула была пропущена, станция не понимает, что передается кадр Wi-Fi, но определяет канал занятым по уровню шума. Пренебрегая вероятностью PS-станции проснуться в момент начала передачи кадра и после начала передачи кадра Ack, считаем, что до начала передачи кадра Ack потребляемая мощность PS-станции соответствует мощности при пустом канале, а при получении кадра Ack затрачивается M_{RX} . Из-за того, что момент ТВТТ может наступить равновероятно в любой момент в течение обмена кадрами насыщенной станции и точки доступа, в среднем PS-станция после наступления ТВТТ будет прослушивать канал в течение $\frac{1}{2}(T_b + T_{PIFS})$ и затратит W^{TBTT} :

$$W^{TBTT} = (1 - P_{ce}^*) \left(\left(\frac{T_{Data} + T_{SIFS} + T_{PIFS}}{2} \right) M_{idle} + \frac{T_{Ack}}{2} M_{RX} \right). \quad (7)$$

Таким образом, энергопотребление PS-станции от момента пробуждения до окончания получения DTIM-бикона рассчитывается как:

$$W_{DTIM} = W_{DTIM}^{wake} + W^{TBTT} + T_{beacon} M_{RX}, \quad (8)$$

где T_{beacon} — длительность передачи DTIM-бикона.

Введем параметр T — период пробуждения PS-станции, т.е. интервал времени между началами двух последовательных периодов активности PS-станции, причем в случае режима WUR

с рабочим циклом рассматривается активность интерфейса WUR. Аналогично рассмотренному ранее получению бикона станция должна проснуться за $m \cdot T_{drift}$ перед началом периода активности, чтобы не пропустить кадр от точки доступа, причем T_{drift} — временной интервал, прошедший с момента получения последнего DTIM-бикона, то есть с момента синхронизации. Пусть T_{DTIM} — период отправки DTIM-биконов точкой доступа. Если $T_{DTIM} \geq T$, то число пробуждений можно оценить как $k_{wake} = \lfloor \frac{T_{DTIM}}{T} \rfloor$. С учетом того, что начало первого TWT SP после DTIM-бикона может быть равновероятно в интервале $(0, T]$, считаем, что в среднем между окончанием DTIM-бикона и началом TWT SP проходит интервал $\frac{T}{2}$. Таким образом среднее время от момента последней синхронизации до k -ого пробуждения в течение DTIM-интервала вычисляется как:

$$T_{drift} = \frac{2k + 1}{2} T. \quad (9)$$

С учетом (2), энергопотребление станции от момента пробуждения $T_{real} \in [0, 2m \cdot T_{drift}]$ до начала периода обслуживания по часам точки доступа T_{AP} (см. рис. 1–2):

$$W_{wake} = \frac{\bar{M}_{slot}}{k_{wake}} \sum_{k=0}^{k_{wake}-1} \int_0^{m \cdot T(1+2k)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-m \cdot T(\frac{1}{2}+k))^2}{2\sigma^2}} (m \cdot T(1+2k) - x) dx, \quad (10)$$

$$\bar{M}_{slot} = P_{ce} M_{idle} + (1 - P_{ce}) M_{RX}, \quad (11)$$

где \bar{M}_{slot} — средняя потребляемая мощность станции в процессе отсчета отсрочки при использовании интервала AIFS между передачами. Уравнение (10) учитывает, что от момента пробуждения до начала периода обслуживания PS-станция вынуждена прослушивать канал, в котором могут присутствовать передачи насыщенных станций.

Пусть $d(T)$ — вероятность того, что кадр для PS-станции поступил на точку доступа в течение периода T :

$$d(T) = 1 - e^{-T\lambda}. \quad (12)$$

Далее для упрощения записей пусть $d(T) = d$ для фиксированного периода T . Длительность передаваемого кадра данных вычисляется как:

$$T_{Data} = T_{preamble} + N_{sym} \cdot T_{sym}, \quad (13)$$

$$N_{sym} = \lceil \frac{16 + L \cdot 8 + 6}{K_{sym}} \rceil,$$

где $T_{preamble}$ — это длительности передачи заголовка на физическом уровне, T_{sym} и K_{sym} — длительность и размер 1 OFDM символа, причем K_{sym} зависит от сигнально-кодовой конструкции, L — количество бит полезной нагрузки на уровне доступа к каналу. Точка доступа использует механизм агрегации для кадров PS-станций, поэтому при подсчете длительности передачи в (13) используется средняя полезная нагрузка за период пробуждения T при условии поступления кадра на точку доступа:

$$\bar{L} = \frac{\lambda T \cdot L}{d}. \quad (14)$$

4.4. Активный TWT

Найдем энергопотребление, затрачиваемое PS-станцией от начала TWT SP T_{AP} до перехода в спящее состояние после получения кадра от точки доступа. С вероятностью $1 - P_{ce}$ в момент T_{AP} канал окажется занят, в таком случае PS-станция будет прослушивать канал до момента его

освобождения, через T_{PIFS} после которого примет кадр от точки доступа. С вероятностью P_{ce} в момент T_{AP} канал окажется пуст, тогда кадр передается на границе ближайшего слота, где с вероятностью P_c может произойти коллизия передачи точки доступа с передачей насыщенной станции:

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^N. \quad (15)$$

Будем считать, что станция синхронизируется на прием самого длинного из участвующих в коллизии кадров, поэтому длительность коллизии T_c определяется как:

$$T_c = \max(T_{Data}, T_{DataPS}). \quad (16)$$

Так как преамбула кадра Wi-Fi является надежно передаваемой последовательностью символов, пренебрежем вероятностью нераспознавания преамбулы в случае коллизии. Тогда при прослушивании коллизии в канале станция потребляет мощность M_{RX} , что соответствует мощности приема. После завершения коллизии точка доступа приоритетным образом получает доступ к каналу и успешно выполняет повторную передачу. Учитывая вышесказанное, среднее энергопотребление PS-станции, при условии, что за период T на точку доступа для нее не поступил кадр данных, рассчитывается как:

$$W^- = (1 - d) \left[(1 - P_{ce}^*) \frac{W_{busy} + T_{PIFS} M_{idle}}{2} + P_{ce}^* P_c W_{col} + T_{null} M_{RX} + W_{Ack} \right], \quad (17)$$

$$W_{busy} = (T_{Data} + T_{SIFS}) M_{idle} + T_{Ack} M_{RX},$$

$$W_{col} = T_c M_{RX} + T_{EIFS}^{AP} M_{idle},$$

$$W_{Ack} = T_{SIFS} \cdot M_{idle} + T_{Ack} M_{TX},$$

где W_{busy} , W_{col} , W_{Ack} — энергопотребление PS-станции, затрачиваемое на прослушивание канала при передаче кадра, преамбула которого не была получена из-за позднего пробуждения, виртуального слота с попавшей в коллизию передачей и кадра подтверждения Ack соответственно, T_{null} — длительность пустого кадра, заканчивающего TWT SP для PS-станции, T_{EIFS}^{AP} — длительность межкадрового интервала EIFS для точки доступа, M_{TX} — мощность станции при передаче кадра.

Если за период T кадр для PS-станции поступил на точку доступа, то энергопотребление PS-станции рассчитывается аналогично (17) за исключение длительности передаваемого точкой доступа кадра:

$$W^+ = d \left[(1 - P_{ce}^*) \frac{W_{busy} + T_{PIFS} M_{idle}}{2} + P_{ce}^* P_c W_{col} + T_{DataPS} M_{RX} + W_{Ack} \right]. \quad (18)$$

Таким образом, средняя потребляемая мощность станции:

$$\bar{M} = \frac{1}{T} (W_{wake} + W^- + W^+) + \frac{W_{DTIM}}{T_{DTIM}}. \quad (19)$$

Средняя задержка передачи кадра зависит не только от последовательности обмена кадрами $T_{DataPS} + T_{SIFS} + T_{Ack}$, но и от периода пробуждения T , так как кадр для PS-станции может поступить на точку доступа в любой момент в течение T . Таким образом, в среднем каждый кадр ожидает в очереди точки доступа $\frac{1}{2}T$ до момента T_{AP} . Далее рассуждения аналогичны представленным при подсчете энергопотребления. С вероятностью $1 - P_{ce}$ в момент T_{AP} канал занят и задержка увеличивается на среднее время его занятости $\frac{1}{2}(T_b + T_{PIFS})$; с вероятностью P_{ce} канал окажется свободен, в таком случае задержка может увеличиться на

длительность коллизии $T_c + T_{EIFS}^{AP}$ с вероятностью P_c . Учитывая все вышеперечисленное и используя (3), получим:

$$\bar{D} = \frac{T}{2} + (1 - P_{ce}^*) \frac{T_b + T_{PIFS}}{2} + P_{ce}^* P_c (T_c + T_{EIFS}^{AP}) + T_{DataPS} + T_{SIFS} + T_{Ack}. \quad (20)$$

4.5. Пассивный TWT

Отметим, что функционирование PS-станции в режимах активного и пассивного TWT отличается только в процессе завершения периода активности при отсутствии у точки доступа кадра данных для PS-станции, поэтому подсчет W_{DTIM} и W^+ выполняется эквивалентно приведенному для активного TWT, т.е. вычисляются по (8) и (18) соответственно.

При использовании пассивного TWT и отсутствии у точки доступа кадра для PS-станции станция ждет от начала TWT SP минимальное время пробуждения, после чего переходит в состояние сна. Минимальное время пробуждения $T_{minWake}$ является параметром механизма TWT, которое задается в процессе настройки и не изменяется между TWT SP, поэтому в рассматриваемом сценарии определяем его следующим образом:

$$T_{minWake} = 2m \cdot T_{DTIM} + T_{busy} + T_{PIFS} + T_{header}, \quad (21)$$

где T_{header} — продолжительность приема заголовка кадра. Фактически $T_{minWake}$ — наибольшее время, которое с учетом дрейфа часов и их синхронизации раз в DTIM-интервал может пройти с момента пробуждения PS-станции до начала получения предназначенного ей кадра данных. Если передача не начнется в течение $T_{minWake}$ с момента пробуждения, то PS-станция может быть уверена, что кадр в текущем TWT SP для нее передан не будет. Учитывая, что PS-станция с вероятностью $1 - P_{ce}$ может проснуться в момент, когда канал занят чужой передачей, и пренебрегая вероятностью пробуждения в момент ее начала, получаем, что до освобождения канала PS-станция потребляет мощность как при пустом канале. Следовательно, уравнение (17) принимает вид:

$$W^- = (1 - d) \left((1 - P_{ce}) \left(\frac{T_{Data}}{2} M_{idle} + \left(T_{minWake} - \frac{T_{Data}}{2} \right) \bar{M}_{slot} \right) + P_{ce} T_{minWake} \bar{M}_{slot} \right). \quad (22)$$

Учитывая, что в (22) подсчитывается энергия, затрачиваемая PS-станцией от момента пробуждения до окончания периода активности, подсчет энергии от момента пробуждения PS-станции до начала получения доступа к каналу точкой доступа, рассчитываемый в (10), должен быть скорректирован с учетом вероятности поступления кадра данных для PS-станции. Таким образом, средняя потребляемая мощность PS-станции рассчитывается как:

$$\bar{M} = \frac{1}{T} (d \cdot W_{wake} + W^- + W^+) + \frac{W_{DTIM}}{T_{DTIM}}. \quad (23)$$

4.6. Активный WUR

При использовании данного режима интерфейс WUR постоянно находится в состоянии бодрствования, поэтому из уравнения (19) пропадает часть W_{wake} , отвечающая за прослушивание канала между пробуждением и началом периода активности, а точка доступа не использует механизмы буферизации и агрегации, а передает кадры PS-станции сразу после поступления на точку доступа. В связи с этим в уравнении (13) в данном случае используется полезная нагрузка одного кадра L . Также отметим, что из-за использования интерфейса WUR отличается последовательность обмена кадрами: точка доступа отправляет дополнительные

кадры CTS-to-self, резервирующие канал для всего обмена кадрами, т.е. до окончания передачи кадра Ack от PS-станции, и кадр пробуждения WUR, а PS-станция отправляет кадр PS-Poll. Так как в данном режиме отсутствует период пробуждения, то PS-станция в среднем на обмен кадрами тратит:

$$W^+ = T_{WakeUp} \cdot M_{RX}^{WUR} + (T_{PS-Poll} + T_{Ack})M_{TX} + T_{DataPS}M_{RX} + 2 \cdot T_{SIFS} \cdot M_{idle}, \quad (24)$$

где T_{WakeUp} и $T_{PS-Poll}$ — это длительности кадров пробуждения WUR и кадра PS-Poll соответственно. Все время, за исключением процесса получения кадров пробуждения, радиointерфейс WUR прослушивает канал, поэтому:

$$W^- = \left[\frac{1}{\lambda} - T_{Wake-up} \right] M_{idle}^{WUR}. \quad (25)$$

Учитывая (24) и (25), средняя потребляемая мощность рассчитывается как:

$$\bar{M} = \lambda (W^+ + W^-) + \frac{W_{DTIM}}{T_{DTIM}}.$$

Задержка доставки кадра главным образом определяется длительностью обмена кадрами, который начинается отправкой кадра CTS-to-self, заканчивается кадром Ack и подробно описан в разделе 4.2. С вероятностью $1 - P_{ce}^*$ в момент поступления кадра данных канал окажется занят, тогда задержка увеличится на время $\frac{1}{2}(T_b + T_{PIFS})$. Если канал окажется пустым, что произойдет с вероятностью P_{ce}^* , то с вероятностью P_c может произойти коллизия, которая увеличит задержку на время $T_{Data} + T_{EIFS}^{AP}$, так как $T_{Data} > T_{CTS}$, где T_{CTS} — длительность передачи кадра CTS-to-self. Таким образом средняя задержка доставки кадра рассчитывается как:

$$\begin{aligned} \bar{D}_{activeWUR} = & (1 - P_{ce}^*) \frac{T_b + T_{PIFS}}{2} + P_{ce}^* P_c (T_c + T_{EIFS}^{AP}) + T_{CTS} + T_{PIFS} + \\ & + T_{WakeUp} + T_{off-on} + T_{PS-Poll} + T_{SIFS} + T_{DataPS} + T_{SIFS} + T_{Ack}. \end{aligned} \quad (26)$$

4.7. WUR с рабочим циклом

Для нахождения средней потребляемой мощности при использовании механизма WUR с рабочим циклом будем использовать описанный в разделе 4.5 подход и формулу (23), при этом внесем поправки для учета энергопотребления дополнительного интерфейса WUR и будем считать T периодом рабочего цикла интерфейса WUR, поэтому уравнения (9), (12), (13), (14) остаются неизменными, а уравнения (6), (18), (21), (22) претерпят изменения. Учитывая, что интерфейс WUR не распознает кадры, передаваемые основным интерфейсом, энергопотребление (6) рассчитывается как:

$$\bar{M}_{slot} = M_{idle}^{WUR}, \quad (27)$$

где M_{idle}^{WUR} — мощность интерфейса WUR при прослушивании канала без передач WUR. Полный обмен кадрами при использовании WUR представлен на рис. 1, причем с вероятностью $1 - P_{ce}^*$ канал занят и энергия тратится на ожидание его освобождения, с вероятностью P_{ce}^* канал окажется пуст и точка доступа будет передавать кадр CTS-to-self на границе слота, тогда возможна коллизия с передачей насыщенных станций с вероятностью P_c . Поэтому (18) принимает вид:

$$\begin{aligned} W^+ = d \left(\left[(1 - P_{ce}^*) \frac{T_{busy} + T_{PIFS}}{2} + P_{ce}^* P_c (T_{Data} + T_{EIFS}^{AP}) + T_{CTS} + T_{PIFS} \right] M_{idle}^{WUR} + \right. \\ \left. + T_{WakeUp} M_{RX}^{WUR} + (T_{PS-Poll} + T_{Ack}) M_{TX} + 2 T_{SIFS} \cdot M_{idle} + T_{DataPS} M_{RX} \right), \end{aligned} \quad (28)$$

где M_{RX}^{WUR} — мощность интерфейса WUR при приеме кадра WUR. Уравнение (21) определяет время, необходимое PS-станции для выявления наличия или отсутствия для нее передачи от точки доступа, поэтому оно представляет собой самый длинный возможный обмен кадрами от начала периода активности до окончания приема поля с последовательностью синхронизации для интерфейса WUR в кадре пробуждения T_{SINC}^{WUR} , приняв которую PS-станция понимает, что ведется передача кадра WUR:

$$T_{minWake} = 2m \cdot T_{DTIM} + T_{busy} + T_{PIFS} + T_{CTS} + T_{PIFS} + T_{SINC}^{WUR}. \quad (29)$$

В случае отсутствия у точки доступа кадра данных для PS-станции она, используя интерфейс WUR, прослушивает канал в течение $T_{minWake}$ и затрачивает следующую энергию:

$$W^- = (1 - d)T_{minWake}M_{idle}^{WUR}. \quad (30)$$

С учетом (26) средняя задержка на доставку кадра рассчитывается как:

$$\bar{D}_{dcWUR} = \frac{T}{2} + \bar{D}_{activeWUR}. \quad (31)$$

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки точности разработанных математических моделей были использованы имитационные модели [44], реализованные на платформе имитационного моделирования ns-3 [46]. Сравнение результатов математического и имитационного моделирования в рамках описанного в разделе 4.1 сценария было проведено при использовании приведенных в Таблице 1 параметров. Параметры соответствуют дополнениям IEEE 802.11ax, IEEE 802.11ba к стандарту Wi-Fi и докладу [3].

Таблица 1. Параметры моделирования.

Величина	Значение
Число насыщенных станций, N	5
Число PS-станций, S	5
Радиус сети	10 м
Интенсивность поступления кадров для PS-станций, λ	$(40\text{мс})^{-1}$
Размер единичного кадра для PS-станций, L	50 байт
Длительность заголовка не-WUR кадра, $T_{preamble}$	20 мкс
Длительность OFDM символа, T_{sym}	4 мкс
Размер OFDM символа, K_{sym}	24 бита
Длительность кадра насыщенной станции, T_{Data}	1480 мкс
Длительность кадра WUR, T_{WakeUp}	924 мкс
Длительность кадра PS-Poll, $T_{PS-Poll}$	52 мкс
Длительность кадра Ack, T_{Ack}	44 мкс
Длительность кадра CTS-to-self, T_{CTS}	52 мкс
Длительность Null-кадра, T_{EOSP}	144 мкс
Длительность перехода сон-бодрствование, T_{off-on}	500 мкс
Мощность основного интерфейса при передаче кадра, M_{TX}	308 мВт
Мощность основного интерфейса при приеме кадра, M_{RX}	110 мВт
Мощность основного интерфейса без задетектированной передачи, M_{idle}	55 мВт
Мощность WUR при приеме кадра WUR, M_{RX}^{WUR}	1 мВт
Мощность WUR без задетектированной передачи WUR, M_{idle}^{WUR}	0,5 мВт
Периодичность рассылки DTIM-биконов, T_{DTIM}	500 мс

Сначала рассмотрим зависимости средней потребляемой мощности (см. рис. 4) и средней задержки доставки кадра PS-станции (см. рис. 5) от периода пробуждения для каждого из

рассматриваемых режимов работы механизмов TWT и WUR. Для сравнения также приведены аналогичные зависимости для базового механизма энергосбережения, полученные при помощи имитационной модели. Для данного механизма период пробуждения установлен равным DTIM-периоду. Сравнивая результаты математического моделирования, изображенные кривыми с пометкой (мат), и результаты имитационного моделирования, изображенные точками с пометкой (им), видим, что относительная погрешность математических моделей не превышает 10%, поэтому далее численный анализ проводится при помощи математических моделей.

Рис. 4 и 5 показывают, что базовый механизм энергосбережения выигрывает по потребляемой мощности у механизма TWT при малых периодах пробуждения, одновременно сильно проигрывая в задержке доставки кадров. При сравнении базового механизма с режимами механизма WUR получаем, что механизм WUR выигрывает по обоим параметрам. Исходя из всего вышперечисленного, при дальнейшем анализе режимов работы механизмов TWT и WUR не будем выполнять сравнение с базовым механизмом из-за его низкой эффективности.

Отметим, что механизм TWT значительно проигрывает механизму WUR в энергоэффективности при малых периодах пробуждения. При увеличении периода пробуждения значение потребляемой мощности обоих режимов механизма TWT начинает стремиться к значению мощности в режиме WUR с рабочим циклом, заметно выигрывая в энергопотреблении у режима активного WUR при больших значениях периода пробуждения. В то же время именно режим активного WUR обеспечивает наименьшую задержку на доставку кадра, в отличие от остальных режимов, в которых задержка растет с увеличением периода пробуждения. Также отметим, что задержка для обоих режимов механизма TWT является одинаковой, так как режимы различаются способом завершения периода активности в отсутствии кадра на передачу и идентичны при его наличии.

Перейдем к сравнительному анализу эффективности рассматриваемых режимов работы механизмов TWT и WUR в зависимости от интенсивности λ потока кадров для каждой PS-станции, поступающего на точку доступа. Для этого зафиксируем период пробуждения, установив $T = 20$ мс.

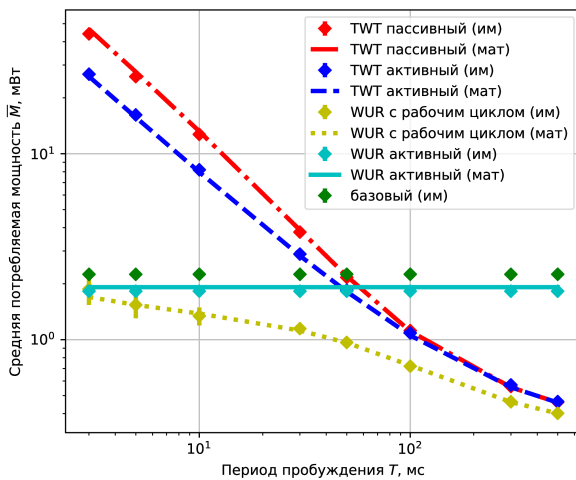


Рис. 4. Зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от периода пробуждения.

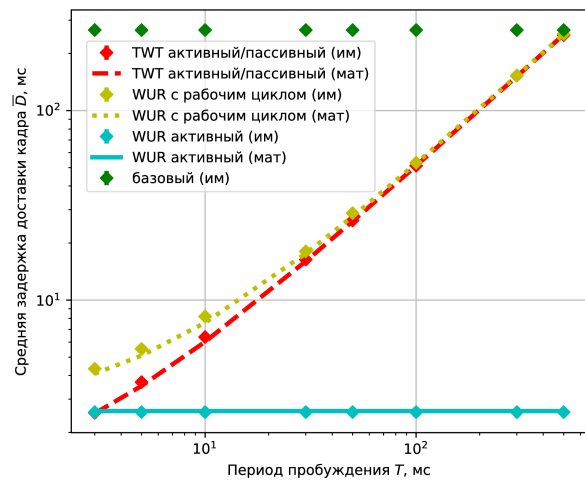


Рис. 5. Зависимость средней задержки доставки кадра данных для PS-станции от периода пробуждения.

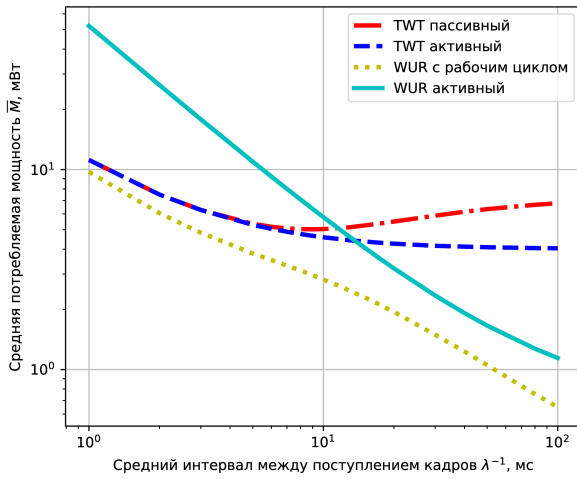


Рис. 6. Зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от λ^{-1} .

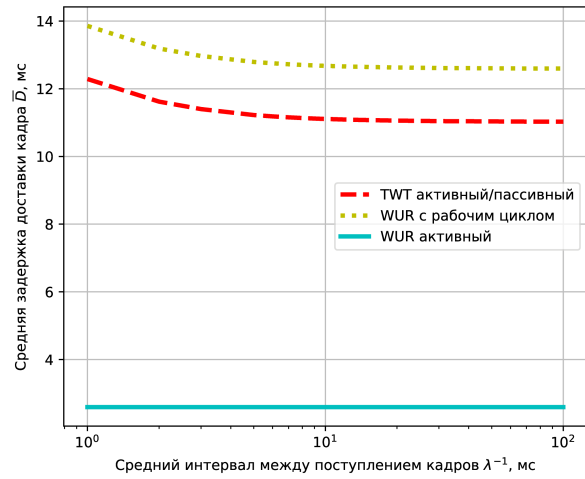


Рис. 7. Зависимость средней задержки доставки кадра данных для PS-станции от λ^{-1} .

На рис. 6 представлена зависимость средней потребляемой мощности за период пробуждения от среднего интервала λ^{-1} между поступлениями кадров для PS-станций. Сравнивая зависимости для активного и пассивного режимов TWT, явно можно заметить, что при малых интервалах между поступлениями кадров режимы практически эквивалентны из-за малой вероятности отсутствия кадра данных для PS-станции в TWT SP. При приближении интервала λ^{-1} к длительности периода пробуждения и дальнейшем его увеличении проявляется различие между эффективностью режимов, и пассивный TWT начинает проигрывать активному режиму. Заметим, что данный проигрыш вызван тем, что прослушивание канала в течение $T_{minWake}$ в определенный момент оказывается менее энергетически выгодным, чем получение небольшого кадра.

Переходя к механизму WUR, отметим, что при высокой интенсивности поступления кадров активный WUR заметно проигрывает всем остальным режимам по потребляемой мощности. Это происходит, так как основной интерфейс включается для получения каждого кадра, что позволяет снизить задержку на доставку кадра (см. рис. 7), но увеличивает время нахождения основного интерфейса в режиме бодрствования. Также дополнительный вклад вносит энергопотребление интерфейса WUR. В то же время меньше всего основной интерфейс находится в активном состоянии при использовании режима WUR с рабочим циклом, что приводит к наименьшей потребляемой мощности среди всех рассматриваемых режимов, одновременно приводя к высокой задержке доставки кадра (см. рис. 7). Следует отметить, что средняя задержка доставки кадра для режимов активного/пассивного TWT и режима WUR с рабочим циклом является возрастающей функцией от интенсивности λ поступлениями кадров. Это связано с использованием механизмов буферизации и агрегации для их доставки. Таким образом, чем больше кадров буферизовано, тем больше агрегированный кадр, дольше его доставка и, соответственно, больше задержка.

Теперь перейдем к анализу эффективности режимов энергосбережения в зависимости от длительности передачи кадра насыщенных станций T_{Data} . Для этого зафиксируем средний интервал между поступлением кадров $\lambda^{-1} = 30$ мс и период пробуждения $T = 20$ мс. Отметим, что зависимость средней задержки доставки кадра от длительности T_{Data} (см. рис. 8) имеет одинаковый вид для всех режимов, а рост вызван увеличением времени получения доступа к каналу при увеличении длительности T_{Data} . Рассмотрим подробнее зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от длительности T_{Data} , см. рис. 9. При сравнении активного

и пассивного режимов TWT отметим точку пересечения графиков: в данной точке энергозатраты на прием пустого кадра, завершающего период активности, сравниваются с затратами на прослушивание канала в течение интервала $T_{minWake}$. В рассматриваемом сценарии длительность $T_{minWake}$ определяется по формуле (21), поэтому при малых длительностях T_{Data} меньшую потребляемую мощность показывает режим пассивного TWT, а при больших длительностях эффективнее оказывается активный режим. Интересным также является тот факт, что при малых длительностях T_{Data} режим пассивного TWT выигрывает также у режима активного WUR, который тратит энергию на постоянное прослушивание канала интерфейсом WUR в дополнение к использованию основного интерфейса.

Теперь сравним аналогичные зависимости средней потребляемой мощности от длительности T_{Data} при фиксированном периоде пробуждения $T = 20$ мс и средних интервалах между поступлением кадров $1/\lambda = 8, 30$ и 100 мс (см. рис. 10, 9 и 11 соответственно). Заметим, что

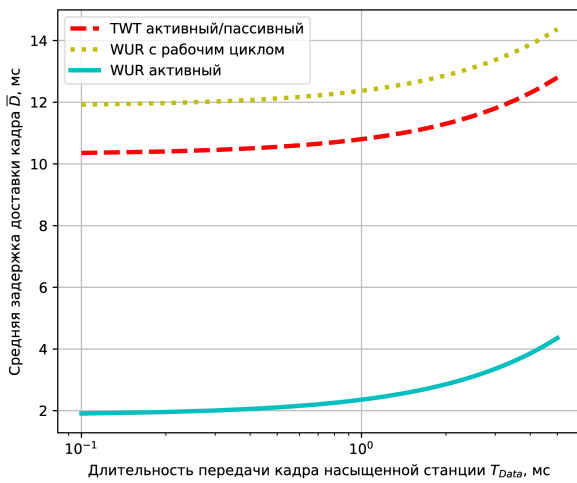


Рис. 8. Зависимость средней задержки на доставку кадра от длительности T_{Data} для $\lambda^{-1} = 30$ мс.

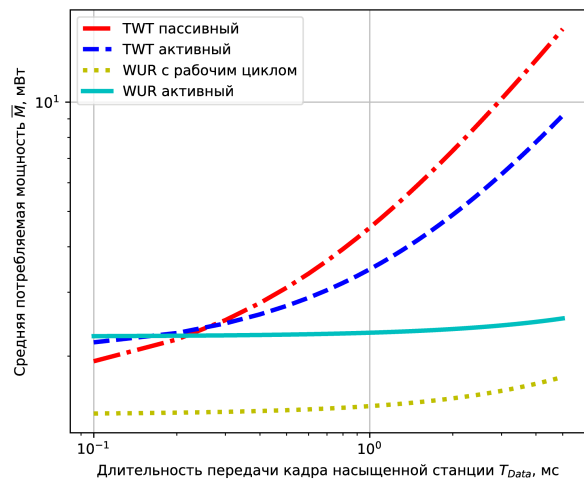


Рис. 9. Зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от длительности T_{Data} для $\lambda^{-1} = 30$ мс.

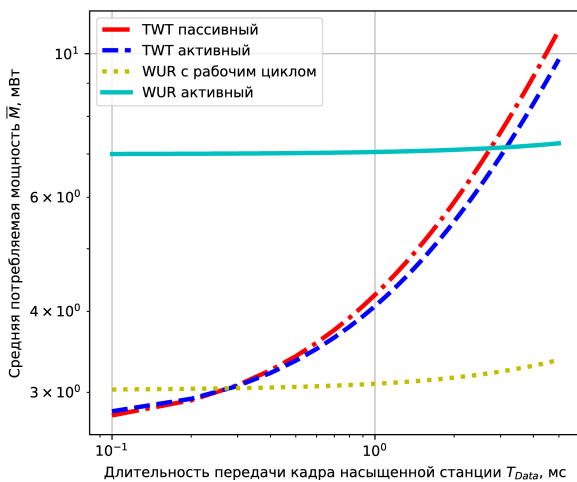


Рис. 10. Зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от длительности T_{Data} для $\lambda^{-1} = 8$ мс.

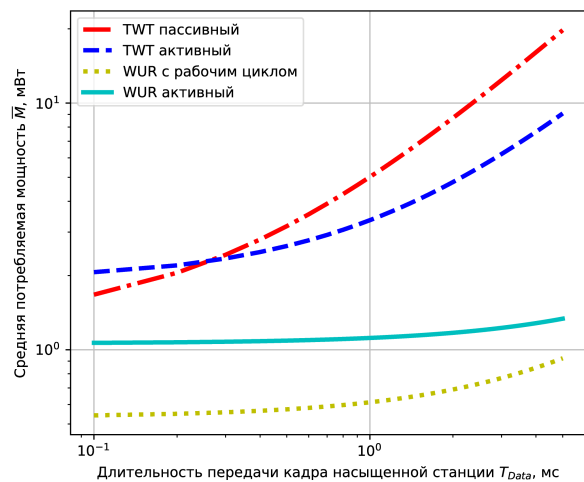


Рис. 11. Зависимость средней потребляемой мощности PS-станции от длительности T_{Data} для $\lambda^{-1} = 100$ мс.

чем больше интервал между поступлением кадров по сравнению с периодом пробуждения, тем лучшую энергоэффективность показывает механизм WUR, а особенно режим WUR с рабочим циклом. В то же время при среднем интервале между поступлениями кадров, меньшем, чем период пробуждения, и малых длительностях T_{Data} можно заметить, что оба режима механизма TWT показывают меньшую потребляемую мощность, чем режимы механизма WUR. Это вызвано наличием дополнительных кадров, необходимых для доставки кадра PS-станции при использовании интерфейса WUR: кадра CTS-to-self, кадра пробуждения WUR и кадра PS-Poll.

Подводя итог, следует отметить, что разработанные математические модели позволяют выбрать наиболее эффективный с точки зрения потребляемой мощности или задержки доставки кадра механизм энергосбережения TWT или WUR, а также его режим работы при известных параметрах передаваемого в сети трафика. Например, при очень строгих ограничениях на задержку доставки кадра следует выбирать режим активного WUR, хотя данный режим по потребляемой мощности проигрывает режиму WUR с рабочим циклом, а при некоторых параметрах трафика и механизму TWT. Если же требования к задержке не очень строгие, то следует обратить внимание на длительность передаваемых в сети кадров насыщенных станций, ведь при больших длительностях наилучшую энергоэффективность показывает режим WUR с рабочим циклом, в то время как при коротких кадрах насыщенных станций одновременно с большой интенсивностью поступления кадров для PS-станций эффективнее может оказаться механизм TWT.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование эффективности различных режимов работы механизмов энергосбережения TWT и WUR, являющихся современными механизмами энергосбережения в сетях Wi-Fi, с точки зрения потребляемой мощности и задержки доставки кадров для энергосберегающих станций. Для этого были разработаны математические модели передачи кадров от точки доступа к энергосберегающим станциям, позволяющие оценить эффективность данных механизмов в зависимости от параметров передаваемого в сети трафика, а также учитывающие влияние эффекта дрейфа часов. Анализ численных результатов показал, что ни один из рассмотренных механизмов не позволяет одновременно достичь минимальных значений по уровню потребляемой мощности и задержки доставки кадров. Если необходимо достичь наименьшей задержки, то следует использовать режим активного WUR. При менее строгих ограничениях на задержку ее можно ограничить, выбрав соответствующий период пробуждения для механизма TWT или WUR с рабочим циклом. Далее при фиксированном периоде пробуждения следует проанализировать передаваемый в сети трафик, так как при длинных кадрах насыщенных станций, а также при редком трафике для энергосберегающих станций, наименьшую потребляемую мощность показывает режим WUR с рабочим циклом, в то время как при интенсивном трафике и коротких кадрах насыщенных станций эффективнее может оказаться механизм TWT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., and Bianchi G. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2018, vol. 21, no. 1, pp. 197–216.
2. IEEE P802.11ba™ Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 3: Wake-Up Radio Operation: 2021.

3. Ghosh C. Discussion on Deep and Shallow Sleep States. 2015, Access mode: <http://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1100-02-00ax-discussion-on-deep-and-shallow-sleep-states.pptx>.
4. Khorov E., Lyakhov A., Krotov A., and Guschin A. A Survey on IEEE 802.11ah: An Enabling Networking Technology for Smart Cities. *Computer Communications*, 2015, vol. 58, pp. 53–69.
5. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., and Famaey J. Resource allocation for machine-type communication of energy-harvesting devices in wi-fi halow networks. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, pp. 2449.
6. Kureev A., Bankov D., Khorov E., and Lyakhov A. Improving Efficiency of Heterogeneous Wi-Fi Networks with Joint Usage of TIM Segmentation and Restricted Access Window. *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Montreal: IEEE, 2017, pp. 1–5.
7. Baek S., Choi B. D. Performance Analysis of Power Save Mode in IEEE 802.11 Infrastructure WLAN. *2008 International Conference on Telecommunications*. St. Petersburg: IEEE, 2008, pp. 1–4.
8. Ibrahim I. A., Salim H. TH., Khazaal H. F. Investigating the Analysis of Power Saving Mode in IEEE 802.11 for Wi-Fi Communication. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 13–19.
9. He Y., Yuan R., Ma X., Li J., and Wang C. Scheduled PSM for Minimizing Energy in Wireless LANs. *2007 IEEE International Conference on Network Protocols*. Beijing: IEEE, 2007, pp. 154–163.
10. Xie Y., Luo X., Chang R. KC. Centralized PSM: an AP-Centric Power Saving Mode for 802.11 Infrastructure Networks. *2009 IEEE Sarnoff Symposium*. Princeton: IEEE, 2009, pp. 1–5.
11. Perez-Costa X., Camps-Mur D. IEEE 802.11e QoS and Power Saving Features Overview and Analysis of Combined Performance. *IEEE Wireless Communications*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 88–96.
12. Camps-Mur D., Gomony M. D., Pérez-Costa X., and Sallent-Ribes S. Leveraging 802.11n Frame Aggregation to Enhance QoS and Power Consumption in Wi-Fi Networks. *Computer Networks*, 2012, vol. 56, no. 12, pp. 2896–2911.
13. Sidam A., Koutarapu P., Methuku M., and Vuyyala S. A Comparative Analysis on Benefits of Unscheduled Automatic Power Save Delivery over Legacy Power Save Mode in IEEE 802.11 Wireless Networks. *2022 9th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. New Delhi: IEEE, 2022, pp. 551–555.
14. Bhargava V., Raghava N. An Enhancement for IEEE 802.11 STA Power Saving and Access Point Memory Management Mechanism *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 23, pp. 3914.
15. Guérin E., Begin T., Lassous I.G. An overview of MAC energy-saving mechanisms in Wi-Fi. *Computer Communications*, 2023, vol. 203, pp. 129–145.
16. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., and Stepanova E. IEEE 802.11ba — Extremely Low Power Wi-Fi for Massive Internet of Things — Challenges, Open Issues, Performance Evaluation. *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*. Sochi: IEEE, 2019, pp. 1–5.
17. Stepanova E., Bankov D., Khorov E., and Lyakhov A. On the Joint Usage of Target Wake Time and 802.11ba Wake-Up Radio. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 221061–221076.
18. Santi S., Tian L., Famaey J. Evaluation of the Co-Existence of RAW and TWT Stations in IEEE 802.11ah Using ns-3. *Proceedings of the 2019 Workshop on Next-Generation Wireless with ns-3*. Florence: Association for Computing Machinery, 2019, pp. 9–12.
19. Santi S., Tian L., Khorov E., and Famaey J. Accurate Energy Modeling and Characterization of IEEE 802.11ah RAW and TWT. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 11, pp. 2614.
20. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., and Stepanova E. Clock Drift Impact on Target Wake Time in IEEE 802.11ax/ah Networks. *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. Moscow: IEEE, 2018, pp. 1–6.

21. Kao T.L., Wang H.C., Lu C.H., and Cheng T.H. An Energy Consumption Evaluation of non-TIM Strategy in IEEE 802.11ah. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 644, pp. 012008.
22. Nurchis M., Bellalta B. Target Wake Time: Scheduled Access in IEEE 802.11ax WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 142–150.
23. Chen, Q., Weng, Z., Chen, G. A Target Wake Time Scheduling Scheme for Uplink Multiuser Transmission in IEEE 802.11ax-Based Next Generation WLANs. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 158207–158222.
24. Chen Q. An Energy Efficient Channel Access with Target Wake Time Scheduling for Overlapping 802.11ax Basic Service Sets. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, vol. 9, no. 19, pp. 18973–18986.
25. Karaca M. Joint Optimization of Target Wake Time Mechanism and Scheduling for IEEE 802.11ax. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2021, vol. 29, no. 3, pp. 1659–1671.
26. Yang C., Lee J., Bahk S. Target Wake Time Scheduling Strategies for Uplink Transmission in IEEE 802.11ax Networks. *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Nanjing: IEEE, 2021, pp. 1–6.
27. Jin X., Long Y., Fang X., He R., Ju H. Energy Consumption Optimization under Multi-link Target Wake Time scheme in WLANs. *2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Sanshui: IEEE, 2022, pp. 1119–1124.
28. Bai J., Fang H., Suh J., Aboul-Magd O., Au E., Wang X. Adaptive uplink OFDMA random access grouping scheme for ultra-dense networks in IEEE 802.11 ax. *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Beijing: IEEE, 2018, pp. 34–39.
29. Chen Q., Zhu Y.H. Scheduling channel access based on target wake time mechanism in 802.11 ax WLANs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020, vol. 20, no. 3, pp. 1529–1543.
30. Pletcher N.M., Gambini S., Rabaey J.M. A 2GHz 52 μ W Wake-Up Receiver with-72dBm Sensitivity Using Uncertain-IF Architecture. *2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers*. San Francisco: IEEE, 2008, pp. 524–633.
31. Hambeck C., Mahlknecht S., Herndl T. A 2.4 μ W Wake-Up Receiver for Wireless Sensor Nodes with -71dBm Sensitivity. *2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*. Rio de Janeiro: IEEE, 2011, pp. 534–537.
32. Salazar C., Kaiser A., Cathelin A., and Rabaey J. 13.5A -97dBm-Sensitivity Interferer-Resilient 2.4GHz Wake-Up Receiver Using Dual-IF Multi-N-Path Architecture in 65nm CMOS. *2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC) Digest of Technical Papers*. San Francisco: IEEE, 2015, pp. 1–3.
33. Piyare R., Murphy A.L., Kiraly C., Tosato P., Brunelli D. Ultra low power wake-up radios: A hardware and networking survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 2117–2157.
34. Liu R., KT A.B., Dorrance R., Dasalukunte D., Santana Lopez M.A., Kristem V., Azizi S., Park M., and Carlton B.R. An 802.11ba 495 μ W -92.6dBm-Sensitivity Blocker-Tolerant Wake-Up Radio Receiver Fully Integrated with Wi-Fi Transceiver. *2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*. Boston: IEEE, 2019, pp. 255–258.
35. Liu R., KT A.B., Dorrance R., Dasalukunte D., Kristem V., Santana Lopez M.A., Min A.W., Azizi S., Park M., and Carlton B.R. An 802.11ba-Based Wake-Up Radio Receiver with Wi-Fi Transceiver Integration. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 1151–1164.
36. Deng D.J., Lien S.Y., Lin C.C., Gan M., Chen H.C. IEEE 802.11 ba wake-up radio: Performance evaluation and practical designs. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 141547–141557.
37. Song T., Kim T. Performance Analysis of Addressing Mechanisms in Inter-Operable IoT Device with Low-Power Wake-Up Radio. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 23, pp. 5106.
38. Benbuk A.A., Kouzayha N., Asadallah F.A., Costantine J., and Dawy Z. Ultra-Low Power Pulse width Detector for RF Wake-Up Receivers. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. Atlanta: IEEE, 2019, pp. 1461–1462.

39. Tang S., Obana S. Energy Efficient Downlink Transmission in Wireless LANs by Using Low-Power Wake-Up Radio. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, vol. 2017.
40. Rakovic V., Adamovski R., Risteski A., and Gavrilovska L. Improving Energy Efficiency and Reliability in WuR-Based IoT Systems: An Error Correction Approach. *Wireless Personal Communications*, 2020, pp. 1–12.
41. Sampayo S.L., Montavont J., Prégaldiny F., Noël T. Is wake-up radio the ultimate solution to the latency-energy tradeoff in multi-hop wireless sensor networks?. *2018 14th international conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob)*, 2018, pp. 1–8.
42. Mahendra G., Lee T.J. How IEEE 802.11 ba Wake-Up Radio Coexists With Legacy WiFi?. *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25, no. 10, pp. 3432–3436.
43. Hong H., Kim Y., Kim R. A Low-Power WLAN Communication Scheme for IoT WLAN Devices Using Wake-Up Receivers. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 72.
44. Степанова Е.А., Банков Д.В., Хоров Е.М., Ляхов А.И. Влияние дрейфа часов на эффективность механизмов энергосбережения в сетях Wi-Fi. *Информационные процессы*. 2022. Т. 22, №. 4. С. 261–275.
45. Vishnevsky V., Lyakhov A. IEEE 802.11 wireless LAN: Saturation throughput analysis with seizing effect consideration *Cluster Computing*, 2002, vol. 5, pp. 133–144.
46. The ns-3 Network Simulator. Access mode: <http://www.nsnam.org/>.

Mathematical Models of Modern Power Save Mechanisms in Wi-Fi Networks

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

The Wi-Fi standard describes a series of power save mechanisms, the main idea of which is to periodically turn off the radio to save energy on channel listening. In modern Wi-Fi networks, such mechanisms are Target Wake Time (TWT) and Wake-Up Radio (WUR). Despite the fundamental differences between these mechanisms, they both use the activity period scheduling, alternating with long intervals of turning off the main radio. Turning off the main radio not only saves energy, but also causes the loss of synchronization between the clocks of the power-saving stations with the access point clock due to the clock drift effect, which can negatively affect the efficiency of these mechanisms. In this paper, we propose mathematical models of frame transmission from an access point to power-saving stations using the TWT and WUR. The models consider the clock drift effect and can be used to evaluate the efficiency of the considered mechanisms in terms of average power consumption and average frame delivery delay.

KEYWORDS: Power Save, TWT, WUR, Clock Drift, Wi-Fi Networks