

Анализ эффективности использования механизмов энергосбережения TWT и WUR в гетерогенных сетях Wi-Fi*

Е.А. Степанова, Д.В. Банков, Е.М. Хоров

{stepanova, bankov, khorov}@iitp.ru

ИШПИ РАН, МФТИ

Аннотация В последнее время многие исследования направлены на повышение энергоэффективности сетей Wi-Fi, чтобы адаптировать их для популярных сейчас сценариев Интернета вещей. Такие сценарии часто характеризуются наличием сенсоров, которые редко генерируют и передают данные и требуют очень низкий уровень энергопотребления. Для таких устройств могут быть особенно эффективны некоторые из разрабатываемых сейчас механизмов энергосбережения. Такими механизмами являются Target Wake Time (TWT) и Wake-Up Radio (WUR). TWT позволяет станциям заранее договариваться о времени обмена кадрами, а WUR представляет собой дополнительный приемник с очень низким энергопотреблением. Несмотря на то, что эти механизмы очень различны, они страдают от одной и той же проблемы — эффекта дрейфа часов, возникающего при длительном отсутствии прослушивания канала. В этой статье представлены математические модели, позволяющие оценить эффективность работы механизмов TWT и WUR в терминах энергопотребления и потребления канального времени сенсорами при наличии эффекта дрейфа часов.

1 Введение

В настоящие дни очень популярной является концепция Интернета вещей. Устройства Интернета вещей, такие как «умные» счетчики воды или газа, датчики движения или температуры, получают всё большее распространение. В то же время во многих сценариях сенсоры установлены в пределах уже существующей сети передачи данных, а именно, сети Wi-Fi. Вместо того, чтобы развертывать дополнительную сеть передачи данных для сенсоров, экономически более выгодно объединить сенсоры и пользовательские устройства в одну гетерогенную сеть Wi-Fi.

Реализация гетерогенных сетей является нетривиальной задачей из-за того, что различные устройства предъявляют разные требования к скорости передачи данных, задержке и уровню энергопотребления. К примеру,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01356 а

пользовательские устройства значительно менее чувствительны к уровню энергопотребления, чем сенсоры, так как теоретически могут заряжаться каждый день. В то же время пользовательские устройства могут генерировать потоки данных высокой интенсивности и, как следствие, нуждаются в высокой пропускной способности канала и низких задержках на передачу данных. Эффективность работы сенсоров часто определяется их энергопотреблением, так как сенсоры должны работать на одной батарее годами, в то же время они практически не чувствительны к высоким задержкам на передачу данных. Поэтому возникает следующая проблема: как удовлетворить требования по качеству обслуживания как пользовательских устройств, так и сенсоров, передающих данные в одной сети Wi-Fi? Следует обратить внимание на то, что стандарт Wi-Fi в первую очередь нацелен на обеспечение качества обслуживания пользовательских устройств, и основная проблема состоит в том, как предоставить необходимый уровень энергопотребления для сенсоров.

Для того, чтобы повысить эффективность передачи данных в широком круге сценариев, особенно в плотных сетях, комитет IEEE 802.11 LAN/MAN разрабатывает дополнение IEEE 802.11ax [1], которое послужит основой новому поколению сетей Wi-Fi. Среди всех нововведений, представленных в дополнении, можно выделить несколько технологий, которые представляют особую ценность для сценариев Интернета вещей. К таким механизмам можно причислить улучшенный механизм энергосбережения TWT (от англ. Target Wake Time). Поэтому можно рассматривать IEEE 802.11ax как одно из решений для гетерогенных сетей.

В настоящий момент комитет IEEE 802 LAN/MAN разрабатывает еще одно дополнение IEEE 802.11ba [2] к стандарту Wi-Fi, нацеленное на значительное понижение энергопотребление конечного устройства. В рамках этого дополнения каждое устройство должно иметь два приемника: основной, который используется для приема и передачи стандартных пакетов, и дополнительный, который используется для передачи специальных управляющих кадров от точки доступа к станциям. Такой дополнительный радиointерфейс называется WUR (от англ. Wake-Up Radio) и он совместим с другими дополнениями к стандарту Wi-Fi, что позволяет настроить совместную работу WUR и механизма TWT в рамках дополнения IEEE 802.11ax.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 кратко описаны механизмы энергосбережения и метод случайного доступа к каналу. Обзор работ, посвященных механизмам TWT и WUR, а также эффекту дрейфа часов, приведен в разделе 3. В разделе 4 ставится задача и приводится описание объекта исследования. В разделе 5 представлены разработанные математические модели передачи данных от сенсоров к точке доступа при использовании механизма TWT и интерфейса WUR. Результаты исследования эффективности механизмов TWT и WUR при помощи математических и имитационных моделей приведены в разделе 6. Раздел 7 содержит заключение.

2 Методы доступа к каналу и энергосбережения в сетях Wi-Fi

Метод доступа устройств к каналу.

В сетях Wi-Fi для доступа к каналу устройства используют по умолчанию стандартный метод случайного доступа к каналу EDCA (от англ. Enhanced Distributed Channel Access), который упрощенно работает следующим образом. Каждая станция имеет одну очередь кадров на передачу. Когда кадр поступает в пустую очередь, станция прослушивает канал и, если канал свободен, передаёт данный кадр.

Если канал занят, станция взводит счётчик отсрочки, инициализируя его целым числом, выбранным равновероятно из промежутка от 0 до $CW_r - 1$, где CW_r — конкурентное окно, а r — счётчик повторных попыток передачи. Изначально r равен нулю, и CW_0 равно параметру CW_{min} (по умолчанию 16). Значение счетчика отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда канал пробыл свободным в течение промежутка времени Δ . Когда канал занят, счётчик отсрочки замораживается. После того, как канал освободился и пробыл свободным в течение интервала $AIFS$, отсчет возобновляется. Когда значение счетчика отсрочки становится равным нулю, станция передаёт кадр. Станция, получившая кадр, должна через интервал времени $SIFS$ отправить подтверждение (кадр ACK) станции-отправителю. Получив ACK, станция считает кадр успешно переданным и переходит к следующему кадру в очереди, если таковой имеется. Если ACK не пришёл в течение интервала $AckTimeout$ после отправки кадра, станция считает попытку передачи неуспешной. В этом случае станция увеличивает счётчик попыток передачи и выбирает новое значение счётчика отсрочки в новом окне, которое задаётся следующей формулой:

$$CW_r = \begin{cases} CW_{min} & r = 0, \\ \min \{2 \times CW_{r-1}, CW_{max}\} & r > 0, \end{cases}$$

где CW_{max} — максимальное значение конкурентного окна, по умолчанию равное 1024. Если счётчик повторных попыток передачи достигает ограничения RL (от англ. Retry Limit), станция отбрасывает кадр.

Когда несколько станций работают в одном канале и их счётчики отсрочки заканчиваются одновременно, кадры, отправленные этими станциями, могут вступить в коллизию на получателе. Чем больше станций одновременно пытаются передать кадры, тем больше вероятность коллизии и тем больше времени нужно для того, чтобы эти коллизии разрешить.

Следует обратить внимание на то, что чем больше попыток передачи выполняет станция и чем больше времени станция тратит на прослушивание канала, тем больше энергии она потребляет. Этот параметр особенно важен для сенсоров, хотя и для пользовательских устройств его значимость нельзя преуменьшить. Механизмы экономии энергии настолько важны для устройств Wi-Fi, что уже в первой представленной версии стандарт Wi-Fi содержал первую базовую процедуру энергосбережения.

Механизм Target Wake Time.

Механизм TWT использует состояния, определяемые в рамках базовой процедуры энергосбережения. Согласно ей устройство может работать в активном или энергосберегающем режимах. При работе в энергосберегающем режиме устройство может находиться в одном из двух состояний: в состоянии сна или в состоянии бодрствования. В состоянии сна станция отключает свой радио-интерфейс, то есть перестает передавать и принимать данные, что позволяет ей значительно экономить энергию. В состоянии бодрствования станция поддерживает радио-интерфейс включенным и тратит энергию на прослушивание канала и прием передач других станций. Если станция работает в активном режиме, она все время находится в состоянии бодрствования.

Механизм TWT позволяет паре устройств заранее договариваться о моменте времени (а именно, о времени пробуждения TWT), в который оба устройства будут бодрствовать, и о длительности обслуживания TWT (TWT SP), которая отсчитывается от назначенного TWT. Именно в течение TWT SP станции могут производить обмен кадрами. Такая договоренность позволяет станциям перейти в состояние сна на все время кроме TWT SP, не пробуждаясь для получения биконов, что позволяет значительно уменьшить энергопотребление на их прослушивание. Далее будем рассматривать TWT только между станцией и точкой доступа.

Чтобы настроить механизм TWT, точка доступа и станция обмениваются специальными кадрами настройки TWT. Эти кадры содержат информацию о запросах, согласии или отказе в установлении TWT с некоторыми параметрами, а также значения параметров, таких как TWT SP или момент пробуждения. Кроме того, список параметров включает в себя флаг Триггер, определяющий режим, в котором выполняется обмен кадрами.

TWT с триггер-кадрами. Если флаг Триггер взведен, точка доступа опрашивает станцию в запланированное время, отправляя ей специальный триггер-кадр. В то же время станция просыпается в назначенный момент и ждет триггер-кадр от точки доступа в течение TWT SP. Через временной интервал SIFS после приема триггер-кадра от точки доступа станция отправляет ответный кадр данных. После того, как обмен кадрами будет завершен, станция может перейти в состояние сна при отсутствии новых кадров для приема или передачи.

TWT без триггер-кадров. Если флаг Триггер не взведен, станции просыпаются в запланированное время, передают необходимые кадры, используя стандартный метод случайного доступа к каналу в сетях Wi-Fi, а после завершения обмена данными переключаются в состояние сна.

Несмотря на то, что длительное отсутствие прослушивания канала при использовании механизма TWT позволяет значительно снизить энергопотребление сенсора, оно также вызывает потерю синхронизации между часами станции и точки доступа. Рассинхронизация является следствием погрешности в работе часов любых устройств, причем, из-за необходимости максимально снизить стоимость сенсоров, погрешность их часов значитель-

но превосходит аналогичную погрешность для пользовательских устройств и точки доступа. В частности, стандарт Wi-Fi разрешает абсолютное отклонение часов, не превышающее 100 ppm, то есть 100 мкс от 1 с. Таким образом, максимальное относительное отклонение от назначенного времени пробуждения может достигать $\delta T = T \cdot 200$ ppm, где T — период пробуждения датчика. Поэтому при использовании механизма TWT потеря синхронизации приводит к тому, что назначенное время пробуждения может значительно отличаться от реального, что приводит к ненужному прослушиванию канала и, как следствие, затратам энергии. Для уменьшения энергопотребления, вызванного таким ненужным прослушиванием канала, комитет IEEE 802 LAN/MAN разрабатывает дополнение IEEE 802.11ba [2] к стандарту Wi-Fi.

Основы технологии IEEE 802.11ba.

В настоящее время для уменьшения энергопотребления устройств разрабатываются не только различные механизмы на уровне доступа к каналу, но и специальные приемники, потребляющие очень мало энергии, но обладающие ограниченным функционалом. Таким приемником является WUR (от англ. Wake-Up Radio), описанный в дополнении IEEE 802.11ba [2] к стандарту Wi-Fi. WUR позволяет получать от точки доступа специальные кадры пробуждения.

Каждая точка доступа и станция имеют основной интерфейс, используемый в основном канале шириной 20 МГц для приема и передачи обычных (не WUR) кадров. Также точка доступа кроме основного радио-интерфейса имеет передатчик WUR, а станция — приемник WUR, чтобы при помощи интерфейса WUR можно было передавать кадры пробуждения от точки доступа для станции. Для понижения энергопотребления передатчика WUR используется простейший вид амплитудной манипуляции ООК (от англ. on-off keying), а также передача ведется в полосе шириной 4 МГц.

Для того, чтобы проинформировать станцию о необходимости переключения основного интерфейса в бодрствующее состояние (к примеру, если у точки доступа есть буферизованные кадры для станции), точка доступа отправляет кадр пробуждения WUR. Отметим, что переключение основного интерфейса станции в бодрствующее состояние занимает некоторое время, о максимальной длительности которого станция предупреждает точку доступа при настройке WUR. Для того, чтобы проинформировать точку доступа о пробуждении, станция может отправить ей какой-либо кадр, используя для этого основной интерфейс. Это может быть как кадр данных, так и кадр, являющийся запросом буферизованных данных, такой как кадр PS-roll.

Благодаря использованию приемника WUR станция может постоянно поддерживать свой основной интерфейс в состоянии сна, кроме непосредственно моментов обмена кадрами. В то же время, пока основной интерфейс спит, WUR бодрствует и потребляет энергию, хотя его энергопотребление в разы меньше, чем у основного интерфейса. Для того, чтобы решить данный вопрос, 802.11ba предлагает процедуру рабочего цикла. При исполь-

зовании процедуры рабочего цикла точка доступа WUR и станция заранее договариваются о периодических временных интервалах, в течение которых интерфейс WUR будет бодрствовать. В оставшееся время WUR может находиться в спящем состоянии. Процедура рабочего цикла для интерфейса WUR позволяет точке доступа уменьшить время его бодрствования, а также разнести во времени периоды активности интерфейсов WUR различных станций. Однако использование процедуры рабочего цикла для понижения энергопотребления приводит в увеличению задержки на передачу данных.

3 Обзор литературы

В настоящее время существует большое количество обзорных статей [3–5], в которых упоминается существование механизма TWT. Авторы [6] реализовали механизм TWT на платформе имитационного моделирования ns-3 [7] и показали, что использование механизма TWT действительно позволяет уменьшить энергопотребление сенсоров, однако данное исследование проведено в рамках стандарта IEEE 802.11ah.

На данный момент опубликовано очень мало статей, в которых исследуется эффективность механизма TWT для экономии энергии. В то же время появляется все больше статей, в которых предлагается использовать механизм TWT для реализации детерминированного доступа в сетях Wi-Fi. К примеру, в [8] упоминается, что механизм TWT может использоваться для уменьшения числа коллизий. Авторы [9] показывают, что механизм TWT может быть эффективно использован для планирования канальных ресурсов и многопользовательских передач. Такое использование TWT может помочь регулировать уровень конкуренции за канал между станциями одной сети, а также избегать интерференции между сетями соседних точек доступа.

Обратим внимание на то, что кадры WUR достаточно длинные и их передачи занимают среду, а также на их прием сенсоры тратят энергию, поэтому исследуется вопрос о том, как передавать меньше кадров WUR, не снижая эффективности работы сети. Также вспомним, что кадры пробуждения WUR могут быть как индивидуальными, так и ширококвещательными. Авторы [10] оценивают задержку на передачу данных включая передачу кадров WUR и предлагают периодически ширококвещательно рассылать кадры пробуждения, чтобы переводить в бодрствующее состояние сразу все станции WUR. Такой путь уменьшает количество отправляемых кадров WUR, но увеличивает конкуренцию за канал и, как следствие, потребление энергии.

В работе [11] предлагается группировать кадры пробуждения и исследуется возможность такой группировки в рамках сетей IEEE 802.11ah, которые поддерживают использование OFDMA для передач кадров в направлении вверх. В предлагаемой авторами схеме кадры пробуждения отправляются после триггер-кадра, который выделяет ресурсы для передачи станций. Также авторы приводят различные схемы группового обмена кадрами для уменьшения задержки на передачу данных. В то же время авторы сравни-

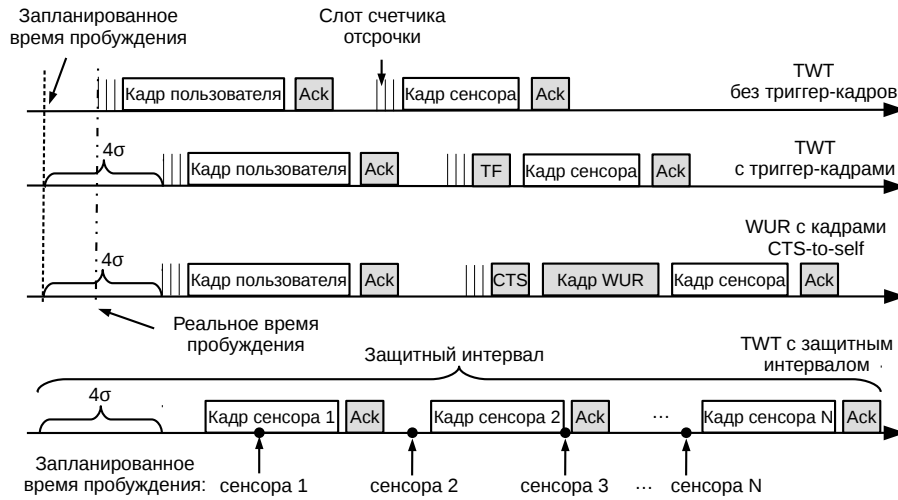


Рис. 1. Рассматриваемые сценарии.

вают различные передачи с триггер-кадрами и не рассматривают передачи без них.

4 Описание исследуемого сценария

Рассмотрим сеть Wi-Fi, работающую в рамках дополнения IEEE 802.11ax и состоящую из одной точки доступа, некоторого фиксированного количества M станций, работающих в режиме насыщения, и некоторого количества N сенсоров, использующих механизм TWT для обмена кадрами с точкой доступа. Рассматривается передача кадров к точке доступа. В запланированное время каждый сенсор имеет один кадр данных для передачи, причем кадры данных всех сенсоров имеют одинаковый размер. Из-за эффекта дрейфа часов реальное время передачи может отличаться от назначенного на некоторое случайное отклонение, нормально распределенное с дисперсией σ^2 .

Рассмотрим четыре метода, позволяющих организовать передачу кадров от сенсоров к точке доступа, как показано на рис. 1. На рисунке использовано обозначение TF — триггер-кадр.

1. TWT без триггер-кадров. При использовании этого метода сенсор просыпается в назначенное время и начинает передачу данных с использованием механизма EDCA. В этом случае сенсор конкурирует за доступ к каналу со станциями, работающими в режиме насыщения.

2. TWT с триггер-кадрами. При использовании этого метода сенсор просыпается в назначенное время и начинает прослушивание канала для получения триггер-кадра. Точка доступа генерирует триггер-кадр через $4 \cdot \sigma$

после назначенного времени для того, чтобы вероятность потери триггер-кадра из-за дрейфа часов была менее 0.01%. Отправляя триггер-кадр, точка доступа соревнуется за доступ к каналу с насыщенными станциями. После получения триггер-кадра от точки доступа сенсор в ответ отправляет ей данные без соревнования за канал.

3. TWT с защитным интервалом. Этот вариант подробно описан в статье [12]. Точка доступа группирует передачи сенсоров и назначает передачи между сенсорами через равные промежутки времени в два раза большие длительности успешной передачи кадра данных. Точка доступа запрещает передачи насыщенных станций в течение временного интервала, который начинается за $4 \cdot \sigma$ до первой запланированной передачи и заканчивается с последней успешной передачей сенсора.

4. WUR с CTS-to-self. При использовании этого механизма сеть Wi-Fi работает также в соответствии с дополнением 802.11ba с использованием рабочего цикла. Рабочие циклы различных станций назначаются индивидуально таким образом, чтобы избежать пересечений в назначенных передачах. Как и во втором методе, точка доступа начинает соревнование за канал через $4 \cdot \sigma$ после назначенного времени. Она передает кадр CTS-to-self, информирующий соседние станции о том, что канал будет занят на время, необходимое для получения данных от сенсора. После передачи кадра CTS-to-self точка доступа использует свой интерфейс WUR для отправки кадра пробуждения сенсору. Когда сенсор получает кадр пробуждения, он переключает свой основной интерфейс из спящего в активное состояние и с его помощью отправляет кадр данных.

В рамках описанного выше сценария формулируется следующая задача: *Исследовать эффективность различных подходов к передаче данных точке доступа в терминах энергопотребления и потребления канальных ресурсов с учетом влияния эффекта дрейфа часов.*

5 Математическая модель

Для оценки эффективности предложенных подходов к понижению энергопотребления сенсоров построим математические модели процесса передачи кадра от сенсора к точке доступа. Так как передачи сенсоров разнесены во времени, рассмотрим сеть, состоящую из N станций, работающих в режиме насыщения и называемых далее «станциями», и одного сенсора, имеющего один кадр для передачи точке доступа.

Передача станций, работающих в режиме насыщения. Предположим, что все станции находятся в зоне видимости друг друга. Счетчики отсрочки всех станций работают синхронно. Для описания процесса передачи станций воспользуемся методом, описанным в [13], и используем понятие виртуального слота. Виртуальным слотом будем называть временной интервал между двумя последовательными отсчетами счетчика отсрочки. Так как помимо насыщенных станций в сети передает одновременно только

один сенсор, влияние передач этого сенсора на вероятность передачи насыщенных станций считаем пренебрежимо малой.

Пусть τ — вероятность передачи станции в виртуальном слоте, а p — вероятность коллизии при условии передачи станции. Тогда, согласно [13], эти вероятности выражаются следующим образом:

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - p^{RL})(1 - 2p)}{CW_{min} \cdot (1 - (2p)^{RL})(1 - p) + (1 - p^{RL})(1 - 2p)};$$

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

Решив предложенную систему, можно найти вероятность передачи станции в виртуальном слоте.

Передача сенсора. Пусть $TX(t, r)$ — это вероятность передачи сенсора в виртуальном слоте t со значением счетчика повторных попыток передач r , рассчитываемая следующим образом:

$$TX(t, r) = \begin{cases} \frac{1}{CW_{min}}, & r = 0, 0 \leq t < CW_{min}; \\ 0, & r = 0, t \geq CW_{min}; \\ 0, & r \geq RL; \\ \sum_{i=t-CW_r}^{t-1} \frac{C^*(i, r-1)}{CW_r}, & 0 < r < RL, \end{cases}$$

где CW_r — конкурентное окно, соответствующее счетчику повторных попыток передачи r , RL — верхняя граница на счетчик повторных попыток передачи, $C^*(i, r)$ — вероятность коллизии передачи сенсора в слоте i со счетчиком повторных попыток передачи r . Первая и вторая формулы означают, что первая попытка передачи выполняется всегда в одном из слотов, выбранном из конкурентного окна размером CW_{min} . Третья формула означает, что после совершения RL попыток передачи кадр отбрасывается и попытки его передачи больше не совершаются. Последняя формула соответствует тому, что попытка k передачи происходит, если попытка $k - 1$ передачи оказалась коллизией, и выполняется в одном из слотов, выбранных из конкурентного окна CW_k .

Зная вероятность передачи сенсора $TX(t, r)$, можно найти вероятность передачи сенсора в слоте t :

$$TX(t) = \sum_{r=0}^R TX(t, r).$$

Используя данную вероятность, можно найти вероятности успешной и коллизией передачи сенсора в слоте t :

$$S^*(t) = TX(t) \cdot (1 - \tau)^N,$$

$$C^*(t) = TX(t) \cdot (1 - (1 - \tau)^N).$$

Тогда среднее канальное время, затрачиваемое на отправку кадра от сенсора точке доступа в сценарии TWT без триггер-кадров, рассчитывается по формуле:

$$T_{channel} = \sum_t (S^*(t) \cdot T_s + C^*(t) \cdot T_c), \quad (1)$$

где $T_s = T_{Data} + SIFS + T_{Ack}$ — длительность успешного виртуального слота, $T_c = T_{Data} + T_{AckTimeout} = T_{Data} + SIFS + T_{Ack}$ — длительность коллизионного виртуального слота, T_{Data} и T_{Ack} — длительности передачи кадра данных и кадра Ack соответственно. Здесь сделано предположение, что параметр AckTimeout равен $T_{AckTimeout} = SIFS + T_{Ack}$.

Для нахождения энергии, затрачиваемой сенсором на отправку кадра, необходимо знать состояние каждого из виртуальных слотов, предшествующих отправке кадра сенсором. Это связано с тем, что в зависимости от занятости канала виртуальный слот длится разное время и сенсор затрачивает на его прослушивание разную энергию. Определим всевозможные варианты виртуальных слотов с точки зрения некоторой рассматриваемой станции:

1. успешный для станции слот — слот, в котором рассматриваемая станция совершила успешную попытку передачи;
2. коллизионный для станции слот — слот, в котором рассматриваемая станция совершила коллизионную попытку передачи;
3. успешный для чужой станции слот — слот, в котором успешно передавала любая станция, отличная от выбранной;
4. коллизионный для чужой станции слот — слот, занятый коллизионной передачей любой станции, отличной от выбранной;
5. пустой слот — слот, в котором станция не зафиксировала передачу.

Соответственно, используя приведенные ниже формулы, рассчитаем вероятности того, что виртуальный слот пуст, занят успешной или коллизионной передачей насыщенной станции соответственно:

$$Em(t) = (1 - TX(t)) \cdot (1 - \tau)^N;$$

$$S(t) = (1 - TX(t)) \cdot N \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N-1};$$

$$C(t) = (1 - TX(t)) \cdot [(1 - (1 - \tau)^N) - N \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N-1}].$$

Таким образом энергопотребление сенсора W можно рассчитать по формуле:

$$W = \sum_t S^*(t) \cdot \left[W_s^* + \sum_{i=0}^{t-1} \{ C^*(i) \cdot W_c^* + S(i) \cdot W_s + C(i) \cdot W_c + Em(i) \cdot W_{em} \} \right], \quad (2)$$

где W_s^* , W_c^* , W_s , W_c и W_{em} — это энергия, затрачиваемая сенсором на свой успешный, свой коллизионный, чужой успешный, чужой коллизионный и пустой слоты соответственно. Данные энергии для сценария TWT

без триггер-кадров рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
W_s^* &= T_{Data} \cdot N_{TX} + SIFS \cdot N_{idle} + T_{Ack} \cdot N_{RX}, \\
W_c^* &= T_{Data} \cdot N_{TX} + (SIFS + T_{Ack}) \cdot N_{idle}, \\
W_s &= (T_{Data} + T_{Ack}) \cdot N_{RX} + SIFS \cdot N_{idle}, \\
W_c &= T_{Data} \cdot N_{RX} + (SIFS + T_{Ack}) \cdot N_{idle}, \\
W_{em} &= SIFS \cdot N_{idle},
\end{aligned} \tag{3}$$

где N_{TX} , N_{RX} и N_{idle} — мощность сенсора при передаче, приеме и прослушивании пустого слота соответственно.

TWT с триггер-кадрами и WUR. Подсчет затрачиваемого на передачу сенсора канального времени для сценариев WUR и TWT с триггер-кадрами выполняется по формуле 1, но длительность успешного слота рассчитывается для каждого сценария отдельно. Длительность коллизионного слота остается неизменной, так как длительность коллизии рассчитывается по наибольшей длительности из вступивших в коллизию кадров, которой для всех сценариев является длительность кадра данных.

В сценарии TWT с триггер-кадрами длительность успешного слота становится равной $T_s = T_{Trig} + SIFS + T_{Data} + SIFS + T_{Ack}$, где T_{Trig} — длительность передачи триггер-кадра. В сценарии с WUR она рассчитывается следующим образом $T_s = T_{CTS} + \frac{CW_{min}-1}{2} \cdot \Delta + T_{WUR} + T_{switch} + T_{Data} + T_{Ack}$, где Δ — длительность пустого виртуального слота, T_{WUR} и T_{CTS} — длительности WUR кадра пробуждения и кадра CTS-to-self соответственно, T_{switch} — время, необходимое сенсору на перевод своего основного интерфейса из спящего в активное состояние.

Подсчет энергопотребления сенсора для сценариев WUR и TWT с триггер-кадрами основывается на вероятностях, вычисляемых аналогично вероятностям из сценария TWT без триггер-кадров, но имеющих другой смысл. В сценариях TWT с триггер-кадрами и WUR попытку передачи выполняет точка доступа, поэтому вероятности TX , S^* и C^* являются соответственно вероятностями передачи, успеха или коллизии при передаче точкой доступа триггер-кадра или кадра CTS-to-self соответственно.

В сценарии с триггер-кадрами энергопотребление сенсора состоит из двух частей: соревнования за канал, рассчитываемого по формуле 2 при условии, что формулы 3 изменяются на

$$\begin{aligned}
W_s^* &= T_{Trig} \cdot N_{RX} + T_{Data} \cdot N_{TX} + 2 \cdot SIFS \cdot N_{idle} + T_{Ack} \cdot N_{RX}, \\
W_c^* &= T_{Data} \cdot N_{RX} + (SIFS + T_{Ack}) \cdot N_{idle},
\end{aligned}$$

а также из дополнительной энергии, которую сенсор тратит на прослушивание канала в течение временного интервала T_{wake} между моментом пробуждения и получением триггер-кадра. Эта энергия может быть приближенно подсчитана следующим образом:

$$W_{wake} = \frac{T_{wake}}{\langle T \rangle} \cdot \langle W \rangle, \tag{4}$$

где $\langle T \rangle$ — средняя длительность виртуального слота, а $\langle W \rangle$ — среднее энергопотребление сенсора за виртуальный слот. Данные параметры рассчитываются на момент, когда сенсор еще не начал передачу, поэтому $TX(t) = 0$ и вероятности успеха, коллизии и пустого слота для насыщенных станций перестают зависеть от времени. Обозначим эти вероятности S_{const} , C_{const} и Em_{const} соответственно и рассчитаем:

$$\langle T \rangle = S_{const} \cdot T_s + C_{const} \cdot T_c + Em_{const} \cdot \Delta,$$

$$\langle W \rangle = S_{const} \cdot W_s + C_{const} \cdot W_c + Em_{const} \cdot W_{idle},$$

где длительность успешного слота $T_s = T_{Data} + SIFS + T_{Ack}$, длительность коллизионного слота $T_c = T_{Data} + T_{AckTimeout}$, энергопотребление сенсора при успешном слоте $W_s = T_{Data} \cdot N_{RX} + SIFS \cdot N_{idle} + T_{Ack} \cdot N_{RX}$, энергопотребление сенсора при коллизионном слоте $W_c = T_{Data} \cdot N_{RX} + T_{AckTimeout} \cdot N_{idle}$ и энергопотребление сенсора при пустом слоте $W_{idle} = \Delta \cdot N_{idle}$.

Аналогично сценарию TWT с триггер-кадром в сценарии с WUR энергопотребления сенсора состоит из двух частей: прослушивания канала до получения кадра пробуждения и борьбы за канал. Главным отличием является то, что прослушивание выполняется интерфейсом WUR, который не распознает отправленные основным интерфейсом кадры, а точка доступа WUR отправляет только индивидуальные кадры пробуждения, поэтому среднее энергопотребление в формуле 4 постоянно, равно энергопотреблению WUR интерфейса при прослушивании канала N_{WUR-RX} и является параметром WUR интерфейса. Энергопотребление в процессе соревнования за канал рассчитывается по формуле 2 при условии, что энергии в формулах 3 изменяются на:

$$W_s^* = T_{CTS} \cdot N_{WUR-RX} + T_{Data} \cdot N_{TX} + SIFS \cdot N_{idle} + T_{Ack} \cdot N_{RX},$$

$$W_c^* = W_{WUR-RX}.$$

TWT с защитным интервалом. Сценарий TWT с защитным интервалом значительно отличается от остальных сценариев и требует иного математического описания.

В данном сценарии затрачиваемое канальное время будет равно длительности защитного интервала, которая выбирается в зависимости от предпочтительной вероятности доставки кадров сенсорами. В данной работе затрачиваемое канальное время рассчитывается для вероятности доставки кадра в 99.99%, а длительность защитного интервала приблизительно вычисляется по формуле

$$T_{channel} = 4 \cdot \sigma + (N - 1) \cdot \mu + 3 \cdot \sigma,$$

где μ — интервал между последовательными TWT различных станций и $4 \cdot \sigma$ — изначально выбранный фиксированный интервал до первого назначенного TWT для гарантированного получения кадров, отправленных до назначенного TWT.

Энергопотребление сенсора в сценарии с защитным интервалом должно рассчитываться исходя из того, что сенсоры не конкурируют за канал со

станциями, работающими в режиме насыщения, а конкурируют только между собой. Для того, чтобы приближенно оценить энергопотребление сенсора примем следующее допущение: так как шаг между TWT выбирается в соответствии с результатами анализа, проведенного в статье [14], то считаем, что вероятность коллизии между сенсорами пренебрежимо мала. Средняя энергия, затрачиваемая сенсором k на передачу одного кадра в отсутствие других сенсоров, рассчитывается по формуле:

$$W_{TX} = \frac{CW_{min} - 1}{2} \cdot \Delta \cdot N_{idle} + T_{Data} \cdot N_{TX} + SIFS \cdot N_{idle} + T_{Ack} \cdot N_{RX}. \quad (5)$$

Однако необходимо учесть передачи других сенсоров, во время которых может проснуться сенсор k и потратить энергию на прослушивание чужой передачи. Для того, чтобы приближенно рассчитать эту энергию, рассмотрим ситуацию, когда сенсор k проснулся во время передачи другого сенсора. В этом случае сенсор k должен будет прослушивать канал до конца чужой передачи и отсчитать счетчик отсрочки до начала передачи своего кадра. Предположим, что отсчет счетчика отсрочки не прерывается передачей других сенсоров. Тогда энергия, затрачиваемая на прослушивание таких передач, равна:

$$W_{RX} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu_k)^2}{2\sigma^2}} \sum_{i \neq k}^N \int_{x-T}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(y-\mu_i)^2}{2\sigma^2}} (T - (x - y)) \cdot N_{RX} dy dx, \quad (6)$$

где $\mu_i = i * l - TWT$ сенсора i , l — временной шаг между TWT различных сенсоров, $T = T_{Data} + SIFS + T_{Ack}$ — длительность успешного слота. Учитывая формулы (5 и 6), энергопотребление сенсора в сценарии TWT с защитным интервалом можно оценить следующим образом:

$$W = W_{TX} + W_{RX}.$$

6 Результаты моделирования

Для валидации разработанных математических моделей предложенные методы энергосбережения были реализованы на платформе имитационного моделирования ns-3 [7]. В рассматриваемом эксперименте сеть Wi-Fi работает в полосе шириной 20 МГц и состоит из 10 сенсоров и 10 станций, работающих в режиме насыщения. Для передачи данных используется самая надежная сигнально-кодовая конструкция MCS0, из-за чего длительность передачи данных в сети равна 1480 мкс. WUR кадры передаются на скорости LDR и их длительность составляет 920 мкс. При подсчете энергопотребления сенсора считается, что основной интерфейс при прослушивании канала, в котором не зафиксирована передача, потребляет мощность 55 мВт, при приеме кадра потребляет мощность 110 мВт, а при передаче кадра потребляет мощность 308 мВт [15]. Также в данной работе считается,

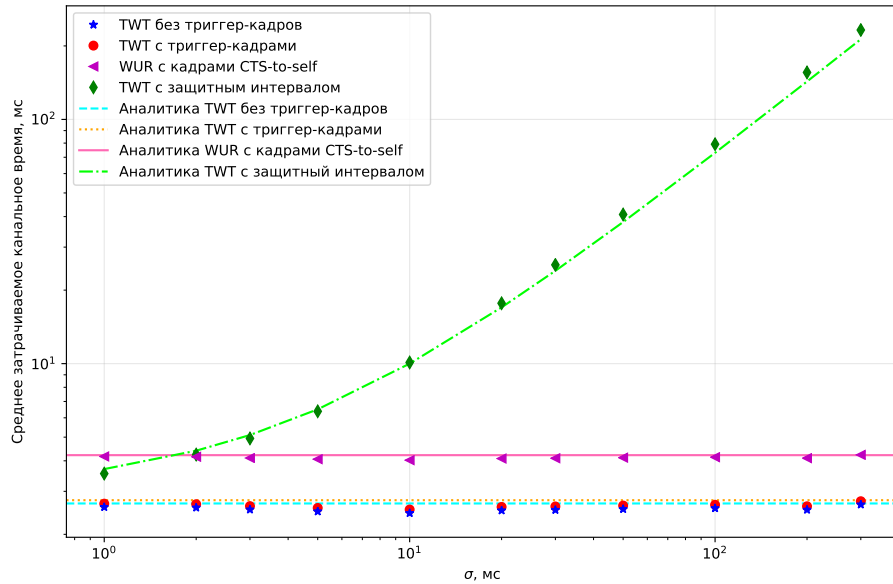


Рис. 2. Зависимости затрачиваемого канального времени от величины стандартного отклонения часов.

что интерфейс WUR на прием кадра затрачивает мощность 1 мВт, являющуюся максимально разрешенной в рамках дополнения IEEE 802.11ba [2], а на прослушивание пустого канала интерфейс WUR затрачивает в два раза меньшую мощность 0,5 мВт.

Перейдем к рассмотрению результатов, полученных при помощи разработанных аналитических и имитационных моделей. На рис. 2 представлено сравнение зависимостей удельного затрачиваемого канального времени от величины стандартного отклонения часов для каждого из четырех сценариев. Отметим, что полученные имитационные результаты достаточно хорошо согласуются с аналитическими несмотря на упрощения, принятые при построении математических моделей. Далее величину стандартного отклонения часов будем называть параметром дрейфа часов.

Как можно увидеть на рис. 2, в сценарии с защитным интервалом канальное время увеличивается с ростом параметра дрейфа часов. И, несмотря на то, что удельное затрачиваемое канальное время на каждый сенсор значительно меньше длительности защитного интервала и уменьшается с ростом числа сенсоров, оно все равно велико по сравнению со временем, затрачиваемым при использовании других методов. Это связано с тем, что при использовании других методов затрачиваемое сенсорами канальное время зависит только от длительности успешной передачи и от количества попыток, выполняемых сенсором для доставки кадра. К примеру, при использовании WUR потребление канального времени почти на 50% выше, чем при

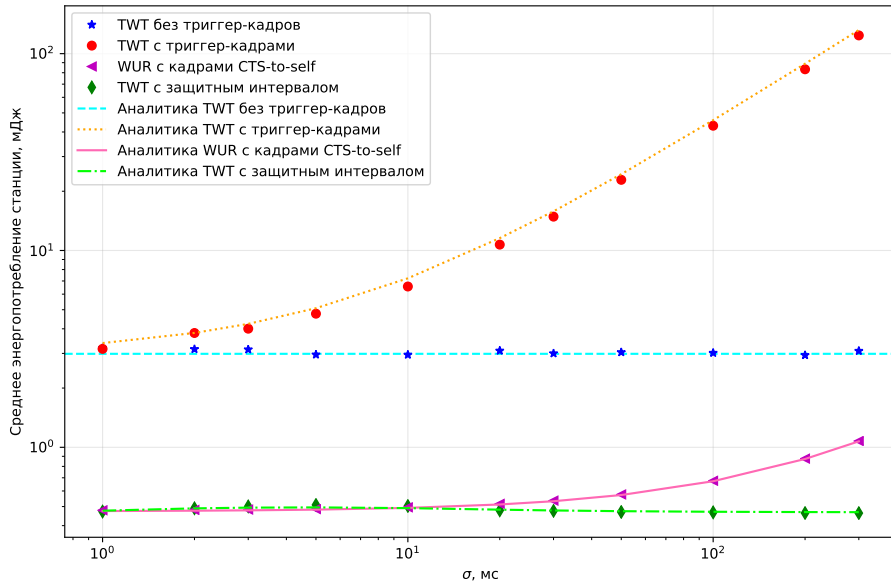


Рис. 3. Зависимости средней энергии, затрачиваемой сенсором, от величины стандартного отклонения часов.

использовании TWT без защитного интервала из-за значительной длины кадра пробуждения.

На рис. 3 представлены зависимости средней энергии, затрачиваемой сенсором, от величины параметра дрейфа часов. Энергопотребление сенсора в сценарии TWT без триггер-кадров определяется числом повторных попыток передачи кадра сенсора. Из-за того, что передачи различных сенсоров в данном сценарии не пересекаются во времени, а также в сети передают насыщенные станции, то при любых значениях параметра дрейфа часов среднее число попыток передач остается постоянным. В сценарии TWT с триггер-кадрами энергопотребление растет с увеличением параметра дрейфа часов. Это связано с затратами энергии на прослушивание канала до получения триггер-кадра.

При малых значениях параметра дрейфа часов механизм WUR предоставляет наименьший уровень энергопотребления в рассмотренных сценариях. Однако при его больших значениях эффективность механизма WUR деградирует из-за затрат энергии на прослушивание канала интерфейсом WUR. В то же время самый низкий уровень энергопотребления при больших значениях параметра дрейфа часов показывает сценарий с защитным интервалом. Однако для достижения такого низкого уровня энергопотребления требуется резервирование канала в течение длительного времени, что запрещено стандартом Wi-Fi.

7 Заключение

В данной статье для оценки эффективности подходов к снижению энергопотребления сенсоров были разработаны математические модели передачи кадров от сенсора к точке доступа при наличии станций, работающих в режиме насыщения. Для валидации полученных математических моделей были разработаны также имитационные модели обмена кадрами сенсора и точки доступа при наличии станций, генерирующих насыщенные потоки данных.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что использование TWT с защитным интервалом хоть и приводит к значительному снижению энергопотребления сенсоров, но отнимает слишком много временных ресурсов у канала, что недопустимо для сетей Wi-Fi. Использование TWT с триггер-кадрами обеспечивает достаточно низкий уровень потребляемых канальных ресурсов, а также позволяет обеспечить заданную вероятность доставки кадра данных от сенсора к точке доступа, но приводит к значительному росту энергопотребления сенсоров. Также заданную вероятность доставки кадра данных позволяет достичь использование интерфейса WUR совместно с кадрами CTS-to-self, причем данный подход обеспечивает достаточно низкий уровень энергопотребления сенсоров. Однако длительность успешного обмена кадрами при использовании интерфейса WUR выше, чем при использовании TWT без триггер кадров из-за значительной длительности кадра пробуждения и необходимости в резервировании канала на время, необходимое для переключения основного интерфейса из состояния сна в состояние бодрствования.

Тем не менее, несмотря на более высокое потребление канальных ресурсов, использование WUR представляется целесообразным в сетях, в которых присутствует большое количество чувствительных к энергопотреблению устройств.

Список литературы

1. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs / Evgeny Khorov, Anton Kiryanov, Andrey Lyakhov, Giuseppe Bianchi // IEEE Communications Surveys and Tutorials. — In press.
2. IEEE P802.11baTM Draft 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 9: Wake-Up Radio Operation, 2019. — March.
3. A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities / Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Alexander Krotov, Andrey Guschin // Computer Communications. — 2015. — Vol. 58. — P. 53–69.
4. Park Minyoung. IEEE 802.11 ah: sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things // IEEE Communications Magazine. — 2015. — Vol. 53, no. 9. — P. 145–151.

5. Afaqui M Shahwaiz, Villegas EG, Aguilera EL. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi // IEEE Wireless Communications. — 2016. — Vol. 99. — P. 2–9.
6. Accurate Energy Modeling and Characterization of IEEE 802.11 ah RAW and TWT / Serena Santi, Le Tian, Evgeny Khorov, Jeroen Famaey // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 11. — P. 2614.
7. The ns-3 Network Simulator. — Access mode: <http://www.nsnam.org/>.
8. Tian Le, Famaey Jeroen, Latré Steven. Evaluation of the IEEE 802.11ah restricted access window mechanism for dense IoT networks // World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2016 IEEE 17th International Symposium on A / IEEE. — 2016. — P. 1–9.
9. Nurchis Maddalena, Bellalta Boris. Target wake time: scheduled access in IEEE 802.11 ax WLANs // IEEE Wireless Communications. — 2019. — Vol. 26, no. 2. — P. 142–150.
10. Tang Suhua, Obana Sadao. Energy Efficient Downlink Transmission in Wireless LANs by Using Low-Power Wake-Up Radio // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2017. — Vol. 2017.
11. Hong Hanseul, Kim Young, Kim Ronny. A Low-Power WLAN Communication Scheme for IoT WLAN Devices Using Wake-Up Receivers // Applied Sciences. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 72.
12. Степанова Е.А., Банков Д.В., Хоров Е.М. Исследование механизма Target Wake Time в сетях Wi-Fi. — 2018. — P. 367–377.
13. 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.
14. Clock Drift Impact on Target Wake Time in IEEE 802.11ax/ah Networks / Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Ekaterina Stepanova // Engineering and Telecommunication (EnT), International Conference on / IEEE. — 2018. — P. 1–6.
15. Ghosh Chittabrata. Supporting Authentication/Association for Large Number of Stations. — 2015. — Access mode: <http://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1100-02-00ax-discussion-on-deep-and-shallow-sleep-states.pptx>.