Исследование механизма Target Wake Time в сетях Wi-Fi*

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

{stepanova, bankov, khorov}@iitp.ru

ИППИ РАН, НИУ ВШЭ, МФТИ

Аннотация В современном мире все большую популярность получают такие устройства, как датчики, счетчики и сенсоры, которые особенны тем, что генерируют ненасыщенные потоки данных. Для удобства их использования необходимо, чтобы эти устройства обладали следующими свойствами: передавали данные по беспроводному каналу связи и являлись энергонезависимыми. Для обеспечения энергонезависимости сенсоров можно использовать механизмы экономии энергии, представленные в стандарте Wi-Fi. Одним из таких механизмов является Target Wake Time (TWT), основанный на передаче данных согласно расписанию и переходе в режим пониженного энергопотребления в оставшееся время. Главной проблемой этого механизма является такое явление, как дрейф часов, из-за которого передачи устройств перестают четко подчиняться расписанию. Это может вызывать коллизии передач сенсоров и, как следствие, их повышенное энергопотребление. В этой статье мы исследовали влияние дрейфа часов на эффективность механизма TWT и разработали рекомендации для настройки параметров механизма TWT.

1 Введение

В наши дни в каждом доме появляется все больше устройств, передающих информацию по беспроводному каналу связи, но не подключенных к сети электропитания. Примерами таких устройств являются некоторые современные счетчики (газа, воды или электроэнергии) или датчики (движения или влажности). Одна из главных проблем таких устройств заключается в том, что при постоянной интенсивной работе их батареи быстро разряжаются. Следует отметить, что большая часть энергии такими устройствами тратится именно на прием и передачу информации, а не на ее считывание. Замена батарей финансово не выгодна, а при установке аккумуляторов значительно увеличивается стоимость обслуживания. Кроме того специфика самих датчиков не позволяет делать их зависимыми от сети электропитания, так как они могут быть установлены в подвалах, погребах или на улице.

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

Именно поэтому очень важно использовать различные механизмы сохранения энергии для таких устройств.

В настоящее время технология Wi-Fi является одной из наиболее популярных технологий беспроводной передачи данных. По оценкам компании Cisco [1] к 2021 году половину всего трафика данных будут составлять передачи при помощи этой технологии. Именно поэтому в качестве механизма беспроводной передачи информации далее рассматриваем только технологию Wi-Fi. В стандарте Wi-Fi IEEE 802.11 описана возможность перехода станции в спящий режим, который является режимом с пониженным потреблением энергии. Оно снижается за счет того, что станция не передает информацию и не прослушивает канал. Так как датчики генерируют ненасыщенный трафик, одно измерение в час и даже реже, то переход в спящий режим в оставшееся время является хорошим решением проблемы энергосбережения. Однако этот режим не решает проблемы траты энергии на повторные попытки передачи пакета, если произошла коллизия. Она может произойти, если в сети есть большое число датчиков, генерирующих данные в одно и то же время, или станции, работающие в режиме насыщения. Это приводит к тому, что передачи датчиков следует разносить во времени.

В дополнении IEEE 802.11ах к стандарту Wi-Fi представлен механизм TWT (англ. Target Wake Time, назначенное время пробуждения), позволяющий реализовать временное разделение передач от различных датчиков. Суть механизма заключается в том, что станции могут договориться заранее о времени обмена информацией. К примеру, точка доступа будет ждать передачу от датчика каждый день в 9:00. В таком случае на время передачи датчика можно зарезервировать канал, чтобы передача прошла без коллизий. Для того, чтобы настроить механизм TWT, две станции обмениваются специальными кадрами, содержащими параметры механизма, после чего устанавливают TWT SP (англ. TWT Service Period, период обслуживания ТWT) — временной интервал, в течение которого станция должна проснуться для приема или передачи информации. Главная проблема этого механизма заключается в так называемом эффекте дрейфа часов, так как часы и у датчиков, и у точки доступа не являются идеальными. Стандарт Wi-Fi разрешает часам устройства по прошествии временного интервала отклоняться не более чем на 100 ppm = 0.01% этого интервала. Таким образом максимальное отклонение от назначенного времени пробуждения может быть равно $\delta T = T * 200 \ ppm$, где T — это интервал между пробуждениями одного датчика. Если T = 1 час, то $\delta T = 3600 * 200 * 10^{-6} = 0.72$ сек. Для успешной передачи датчика следует зарезервировать $2\delta T$ канального времени, что значительно скажется на производительности сети. Уменьшить снижение производительности сети можно путем увеличения числа станций, передающих в течение временного интервала $2\delta T$, но это в свою очередь увеличит вероятность коллизий между передачами сенсоров. Пока коллизий в канале не слишком много, их успешно может разрешить механизм случайного доступа к каналу. В связи с этим возникает задача выбора параметров механизма TWT таким образом, чтобы, доставляя наибольшее число пакетов, сенсоры тратили как можно меньше канального времени и собственной энергии.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 кратко описаны механизм TWT и метод случайного доступа к каналу. Описание объекта исследования и постановка задачи подробно представлены в разделе 3. В разделе 4 приведен обзор работ, посвященных механизму TWT и эффекту дрейфа часов. Результаты исследования эффективности механизма TWT в зависимости от собственных параметров и параметров метода случайного доступа к каналу приведены в разделе 5. Раздел 6 содержит заключение.

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

Метод доступа устройств к каналу. В сетях Wi-Fi большинство кадров передаётся согласно методу случайного доступа к каналу EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access, улучшенный распределённый доступ к каналу), в том числе в течение TWT SP в сценарии, исследуемом в данной работе. EDCA работает следующим образом. Каждая станция имеет очередь кадров на передачу. Когда кадр поступает в пустую очередь, станция прослушивает канал и, если канал свободен, передает этот кадр. Если канал занят, станция взводит счетчик отсрочки, который инициализируется целым числом, выбираемым равновероятно из промежутка от 0 до CW_r , где CW_r – конкурентное окно, а r — счетчик повторных попыток передачи. Изначально rравен нулю, и CW_0 равно параметру CW_{min} (по умолчанию 15). Когда канал занят, счетчик отсрочки замораживается. Если же канал освободился и пробыл свободным в течение интервала AIFS, счетчик отсрочки размораживается. Значение счетчика отсрочки уменьшается на единицу каждый раз, когда канал пробыл свободным в течение промежутка времени σ . Когда значение счетчика отсрочки становится равным нулю, станция передает кадр. Станция, получившая кадр, должна через интервал времен
иSIFSотправить подтверждение АСК станции-отправителю. Получив АСК, станция считает кадр успешно переданным и переходит к следующему кадру в очереди, если таковой имеется. Если же АСК не пришел в течение интервала AckTimeout после отправки кадра, станция считает попытку передачи неуспешной. В этом случае станция увеличивает счетчик попыток передачи и выбирает новое значение счетчика отсрочки в новом окне, которое задается следующей формулой:

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

где CW_{max} — максимальное значение конкурентного окна, по умолчанию равное 1023. Если счетчик повторных попыток передачи достигает ограничения RL (англ. Retry Limit, ограничение на количество повторов передачи), станция отбрасывает кадр.

Чем больше число станций одновременно пытается передать кадры, тем больше вероятность коллизии и тем большее время требуется для того, чтобы их разрешить. Механизм ТWT позволяет любой поддерживающей его станции регулировать количество станций, одновременно получающих доступ к каналу, и таким образом увеличивать вероятность доставки кадров данных и уменьшать затраты энергии и канальных ресурсов сенсорами.

TWT. Теперь опишем подробнее сам механизм TWT. Как уже было сказано ранее, для того чтобы настроить механизм TWT, две станции должны обменяться специальными кадрами. Эти кадры содержат информацию о согласии или отказе в установлении TWT, а при согласии параметры самого механизма, о которых более подробно рассказано далее.

До начала настройки TWT станции разделяются на станцию, запрашивающую TWT, и станцию, отвечающую на TWT. Это происходит автоматически и определяется тем, какая станция первая отправляет другой запрос на установление TWT. От этого разделения зависит настройка механизма. Также она зависит от параметра Flow type и типа установки следующего TWT ("implicit" или "explicit").

Параметр Flow type может принимать только два значения: 0 или 1. Если Flow type = 0, то отвечающая станция может начать передачу в TWT SP только после получения от запрашивающей станции специального менеджмент кадра (PS Poll или триггер кадра в зависимости от того, является ли запрашивающая станция точкой доступа или нет), именно после получения которого можно выполнять передачу кадра данных. Если же Flow type = 1, то нет ограничений на то, когда отвечающая станция должна начинать отправку кадров.

Тип установки TWT implicit означает, что следующий TWT SP строго периодически назначает запрашивающая станция. Тип TWT explicit означает, что следующий TWT SP устанавливает <u>отвечающая</u> станция, причем может назначать как периодически, так и апериодически.

3 Сценарий и постановка задачи

Рассмотрим сеть Wi-Fi, состоящую из точки доступа и некоторого фиксированного количества подключенных к ней сенсоров, использующих для передачи информации точке доступа механизм TWT. Сенсоры считаются подключившимися и установившими TWT, то есть обменявшимися всей вспомогательной информацией и назначившими TWT SP, в нулевой момент времени, то есть перед началом моделирования. Пусть интервалы между последовательно назначенными TWT различных станций равны μ , а временное отклонение часов сенсоров от назначенного точкой доступа TWT распределено нормально с дисперсией σ^2 .

Параметры механизма TWT настроены следующим образом. Так как точка доступа является отвечающей и не генерирует трафик для станций, то значение параметра Flow type не влияет на работоспособность сети. Но если у точки доступа могут появиться данные для передачи сенсору, то следует устанавливать Flow type = 0, так как в этом случае не возникнет ситуации, при которой точка доступа пытается передать данные спящей станции. Используется тип TWT explicit, так как отвечающей является точка доступа, которая налаживает передачу всех сенсоров.

В данном сценарии сенсоры находятся в спящем режиме все время, кроме TWT SP. Каждый из сенсоров просыпается, выполняет попытку передачи точке доступа одного пакета и опять переходит в спящий режим. Данный сценарий предусматривает как то, что все рассматриваемые станции находятся в зоне слышимости друг друга, так и то, что часть из них является скрытой для других.

Также в рассматриваемом сценарии есть эффект захвата канала. Когда несколько станций работают в одном канале и их счетчики отсрочки заканчиваются одновременно, кадры, отправленные этими станциями, вступают в коллизию на получателе (в этом случае отсутствует эффект захвата канала). При наличии эффекта захвата канала, если точка доступа принимает кадр от станции с низкой мощностью передачи и в это же время фиксирует преамбулу передачи от более мощной станции, то точка доступа может завершить принятие кадра от маломощной станции и начать принимать кадр от более мощной станции. Этот эффект может уменьшить число коллизий, так как при отсутствии переключения кадры попали бы в коллизию, в то время как при переключении на прием более мощной передачи один из кадров удается принять.

В контексте данного сценария возникает следующая задача: Исследовать зависимость среднего времени отправки сообщений группой станций и средней энергии, затрачиваемой каждой станцией, от временного шага между TWT различных станций, параметров распределения отклонения часов, параметров стандартного метода доступа к каналу и наличия или отсутствия эффекта захвата канала и скрытых станций.

4 Обзор литературы

В настоящий момент существует большое количество обзорных работ, в которых представлено подробное описание работы механизма TWT. Примерами таких работ являются [2], [3] и [4]. Авторы [5] пишут о своих намерениях в будущем реализовать механизм TWT на платформе имитационного моделирования ns-3 [6]. В работе [7] упоминается, что механизм TWT можно использовать для уменьшения числа коллизий без описания или исследования этого процесса. Работ, подробно исследовавших этот механизм в рамках технологии Wi-Fi пока не опубликовано.

Существует большое число работ, исследующих явление дрифта часов: его оценку и процесс синхронизации, как в работах [8] и [9]. В работе [10] предлагается, чтобы при каждом обмене информацией с сенсорами точка доступа оценивала и отправляла им в кадре ACK значение текущего временного отклонения для подстройки часов. Если инициатором обмена инфор-



Рис. 1. Зависимость среднего времени отправки сообщений группой станций от временного шага между их TWT.

мацией является точка доступа, то она должна в кадре данных отправить текущее значение своих часов. Этом метод неприменим в рассматриваемом нами сценарии, так как для успешной передачи необходимо знать отклонение часов заранее. Авторы работы [11] представили алгоритм, оценивающий скорость дрифта часов. Для этого сенсоры должны отслеживать и накапливать временной сдвиг между запланированными и реальными передачами каждого из своих соседей.

5 Результаты исследования

Для того, чтобы оценить эффективность механизма TWT, был проведен ряд экспериментов, в которых моделировался описанный в разделе 3 сценарий. Моделирование проводилось при помощи комплекса имитационного моделирования ns-3 [6]. Точка доступа и все станции передавали кадры размера 1024 байта на скорости 6 Мбит/сек с использованием самой надежной сигнально-кодовой конструкции MCS0. Все станции размещались случайным образом вокруг точки доступа внутри круга радиуса 5 м или 50 м в зависимости от сценария. Радиус слышимости станций равен 65 м, поэтому некоторые станции являются скрытыми для других при радиусе круга 50 м. Далее сценарий с размещением станций в круге радиуса 5 м будем называть «сценарий без скрытых станций», а другой соответственно «сценарий со скрытыми станциями».

В процессе моделирования описанного выше сценария для каждого из рассматриваемых наборов параметров было проведено 100 запусков имитационной модели.

На рис. 1 представлена зависимость среднего времени отправки сообщений группой станций от временного шага между их ТWТ. При маленьком временном шаге между TWT много станций пытаются одновременно передавать свои кадры, из-за чего возрастает число коллизий и растет среднее время передачи кадров. Из графиков 1 видно, что при увеличении CW_{min} уменьшается среднее время передачи кадров. Это происходит из-за уменьшения вероятности коллизий. Вероятность коллизий при малом временном шаге между TWT также уменьшается при увеличении величины дисперсии, так как уменьшается вероятность одновременного перехода из спящего режима нескольких станций. Это особенно заметно в сценарии без скрытых станций. Еще следует обратить внимание на то, что все зависимости при шаге TWT большем, чем две длительности успешной передачи, становятся линейными и имеют вид $T = Nsta*\mu+\sigma$, где Nsta — общее число сенсоров, μ — временной шаг между их TWT, σ — корень из дисперсии в распределении временных отклонений часов.

Из этой формулы видно, что время передачи группы станций пропорционально временному шагу между их ТWТ. Именно поэтому для минимизации использования канальных ресурсов следует устанавливать минимально возможный шаг между TWT, при котором зависимость имеет линейный вид. Теперь обратимся к рис. 2, на котором представлена зависимость среднего числа доставленных пакетов от временного шага между их TWT. Из этих графиков можно заметить, что при малом временном шаге между ближайшими TWT различных станций количество потерянных пакетов велико. Поэтому при назначении TWT следует соблюдать баланс между вероятностью доставки пакета и временем его доставки, выбирая не очень большой, но и не очень малый шаг между TWT. Следует заметить, что минимальный временной шаг, при котором гарантируется доставка данных, достигается при максимизации параметра CW_{min} .

Обратим внимание на то, что чем меньше повторных попыток передачи выполняет станция, тем меньше энергии она затрачивает. Это подтверждается рис. 3, на котором представлена зависимость средней энергии, затрачиваемой одной станцией на передачу кадра, от временного шага между TWT. Из этого графика видно, что минимум энергии достигается приблизительно в той же точке, в которой достигается максимальная вероятность переда-



Рис. 2. Зависимость среднего количества переданных сообщений группой станций от временного шага между их TWT.

чи пакета. Различие заключается в том, что для уменьшения потребления энергии требуется также уменьшение числа повторных попыток передач.

Теперь сравним представленные выше графики с эффектом захвата канала и без него. Как было сказано в разделе 3, эффект захвата канала проявляет себя в случае коллизии менее мощной передачи и более мощной. Следовательно этот эффект ярче всего себя проявляет в сценариях с большим числом коллизий, уменьшая количество потребляемых канальных ресурсов. Это особенно заметно на рис. 3, который показывает, что при $CW_{min} = 3$ максимально расходуемая энергия уменьшается в 1.2 раз при наличии эффекта захвата.

Обратим внимание на то, что длительность успешной передачи равна $T_{data} + SIFS + T_{ack} + DIFS = 1574$ мкс в рассмотренной имитационной модели. Начиная с удвоенной длительности успешной передачи количество расходуемой станциями энергии выходит на минимум. Если же рассматри-



Рис. 3. Зависимость средней затрачиваемой энергии одной станции от временного шага между ближайшими TWT станций.

вать интересующие нас сценарии с малым числом коллизий, то в них эффект захвата не дает видимого улучшения.

Из всех представленных выше графиков можно сделать следующий вывод: для уменьшения потребления энергии сенсоров и расхода канальных ресурсов следует устанавливать CW_{min} максимально возможным, а шаг между последовательными TWT задавать равным двум успешным передачам пакета.

6 Заключение

В данной работе исследовался механизм TWT (Target Wake Time) в рамках стандарта Wi-Fi IEEE 802.11ах. Этот механизм предназначен для планирования передач станций через длительные временные промежутки, в течение которых станции находятся в спящем режиме. Главной проблемой этого

механизма является дрейф часов, причем как часов сенсоров, так и часов точки доступа. Из-за этого явления моменты выхода станций из режима сна перестают четко подчиняться расписанию, что приводит к коллизиям, повторным попыткам передачи и увеличению энергопотребления станций. Также в этой статье применительно в механизму TWT исследовались проблема скрытых станций, увеличивающая число коллизий, и явление захвата канала, уменьшающее число коллизий.

Приведенный в разделе 3 сценарий был реализован на платформе имитационного моделирования ns-3. Отдельно были рассмотрены сценарии со скрытыми станциями и без оных, с эффектом захвата канала и без него для различных параметров метода доступа к каналу EDCA, различных значений дисперсии в распределении отклонений часов сенсоров и различных временных интервалов между TWT станций.

В работе было показано, что для наибольшей эффективности работы механизма TWT следует устанавливать наибольший из возможных CW_{min} , а длительность шага между назначаемыми TWT устанавливать в зависимости от выбранного для минимизации показателя эффективности работы сети: для уменьшения количества потребляемой станциями энергии нужно устанавливать как можно больший шаг между их TWT, в то время как для уменьшения среднего времени, затрачиваемого на передачу группы станций, шаг между их TWT следует устанавливать минимально возможным при максимальной вероятности доставки пакета. В качестве некоторого компромисса между этими двумя задачами можно предложить устанавливать шаг между TWT различных станций равным двум успешным передачам кадра данных.

Список литературы

- 1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021 White Access mode: Paper. https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html.
- 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.
- 3. 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.
- 4. 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.
- 5. Implementation and Validation of an IEEE 802.11 ah Module for ns-3 / Le Tian, Sebastien Deronne, Steven Latré, Jeroen Famaey // Proceedings of the Workshop on ns-3 / ACM. 2016. P. 49–56.
- 6. The ns-3 Network Simulator. Access mode: http://www.nsnam.org/.
- 7. Tian Le, Famaey Jeroen, Latré Steven. Evaluation of the IEEE 802.11 ah 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.

- 8. Römer Kay. Time synchronization in ad hoc networks // Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing / ACM. -2001. P. 173-182.
- 9. Srikanth TK, Toueg Sam. Optimal clock synchronization // Journal of the ACM (JACM).- 1987.- Vol. 34, no. 3. P. 626–645.
- WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control / Jianping Song, Song Han, Al Mok et al. // IEEE real-time and embedded technology and applications symposium / IEEE. – 2008. – P. 377–386.
- Clock drift reduction for relative time slot TDMA-based sensor networks / Randolph Tjoa, Kim Loon Chee, PK Sivaprasad et al. // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on / IEEE. – Vol. 2. – 2004. – P. 1042–1047.