

Построение аналитической модели периодического окна ограниченного доступа для коротких слотов *

Е.А. Зажигина^{1,2}, Р.Р. Юсупов^{1,2}

{zazhigina, yusupov}@wireless.iitp.ru

¹ ИППИ РАН им. А.А. Харкевича

² МФТИ

Аннотация В современном Интернете вещей появляются сценарии, предполагающие большое количество устройств, подключённых к сети. При этом чем больше устройств подключено к сети, тем сложнее им получить доступ к каналу и передать данные в силу увеличения конкуренции за доступ к каналу. Одним из механизмов ограничения конкуренции является механизм окна ограниченного доступа, который позволяет только определенной группе станций передавать данные в течение выделенного интервала времени. Для этого механизма требуется оптимально выбирать параметры окна: необходимо передавать кадры как можно быстрее за ограниченное время. В данной статье предлагается простая аналитическая модель, которая позволяет найти эти оптимальные параметры.

Ключевые слова: IEEE 802.11ah, окно ограниченного доступа, оптимизация методов доступа к каналу.

1 Введение

В современном мире увеличивается количество сценариев, требующих передачи данных посредством беспроводных сетей. Увеличивающееся разнообразие этих сценариев приводит к необходимости разработки новых методов доступа к каналу и/или совершенствованию старых. Так, появляются сценарии, требующие обеспечение доступа к каналу для большого числа одновременно подключённых устройств, к примеру сбор данных из сенсорной сети Интернета вещей. Большое число устройств, пытающихся передать кадры, приводит к увеличению конкуренции за доступ к каналу и увеличению задержки доставки кадров данных.

Одним из решений этой проблемы в сетях Интернета вещей является применение механизма окна ограниченного доступа (англ. Restricted Access

* Исследование выполнено в ИППИ РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-20077 мол_a_вед.

Window, RAW), описанного в стандарте IEEE 802.11ah. Окно ограниченного доступа представляет собой небольшой интервал времени, зарезервированный для определенной группы станций, которые конкурируют за доступ к каналу в пределах этого окна (см. рис. 1). Зарезервированное окно разделяется на один или несколько RAW-слотов, в каждом из которых может осуществлять доступ к каналу подмножество выделенной группы станций. RAW организуется при необходимости и с целью уменьшить конкуренцию за доступ к каналу среди станций группы. Передача данных внутри RAW-слота совершается согласно механизму EDCA (англ. Enhanced Distributed Channel Access), в основе которого лежит метод CSMA/CA (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, множественный доступ с прослушиванием несущей и избеганием коллизий). Перед попыткой передачи станция прослушивает среду и, получив информацию о состоянии канала, пытается избежать коллизий с помощью механизма случайной отсрочки (англ. binary exponential backoff). Подробное описание механизма EDCA может быть найдено в [1].

Выбрать параметры окна ограниченного доступа — непростая задача, так как в стандарте нет чётких рекомендаций по их выбору для конкретных нужд. В данной работе рассматривается периодическое окно ограниченного доступа для случая коротких RAW-слотов, что позволяет простым способом построить и обсчитать аналитическую модель. Согласно работам [2], [3], короткие RAW-слоты являются квазиоптимальными для разреженного потока трафика. Периодичность окна позволяет рассылать информацию о параметрах механизма RAW один раз при его установлении, что освобождает канал от рассылки дополнительной информации в биконах (англ. beacons). Цель работы заключается в построении простой модели работы механизма RAW в сценарии, когда входящий трафик разреженный, RAW-слот является коротким и требуется передача кадра от каждой станции, а не какой-то из них; и поиске оптимальных параметров метода доступа — длины RAW-слота T_{raw} , длины периода $T_{\text{период}}$ и размера конкурентного окна W_0 — при которых можно добиться минимальной средней задержки передачи и небольшого потребления канального ресурса при разреженном потоке данных.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 данной работы обзревается литература, посвященная окну ограниченного доступа, далее в разделе 3 приводится подробное описание рассматриваемого сценария и кратко описывается разработанная аналитическая модель. В разделе 4 проводится анализ численных результатов, полученных с помощью этой модели, затем в разделе 5 подводятся итоги работы.

2 Обзор литературы

В ряде работ, исследующих окно ограниченного доступа, разработаны аналитические модели, позволяющие найти параметры метода доступа к каналу для оптимизации производительности сети.

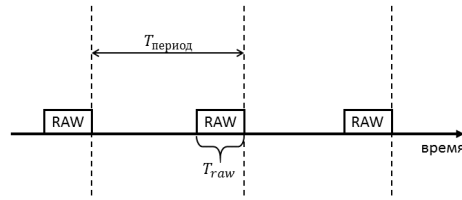


Рис. 1: Периодическое окно ограниченного доступа

В работе [2] проводится сравнение двух аналитических моделей передачи: с повторной отправкой и без. Результаты показывают, что вероятность успешной передачи и средняя задержка до первой успешной передачи оказываются почти одинаковыми для обеих моделей. Модель из [2] неприменима, т.к. в сценарии этой работы требуется доставка информации от любого из множества сенсоров, а не от каждого.

В работе [3] разработана модель, позволяющая найти пропускную способность сети при равномерном делении всех станций на группы. Заметим, что эта модель подразумевает, что сначала все станции находятся в состоянии готовности к передаче кадра с вероятностью p . Авторами найдено оптимальное число групп, при котором наблюдается максимальная пропускная способность. Недостатком предложенной в работе [3] модели является сложность обсчета переходных процессов.

В работе [4] рассматривается сценарий, когда у станций есть определенный запас энергии, исчерпав который, они отключаются. Более того, передаче кадров могут мешать случайные помехи наравне с коллизиями. Результаты исследования показывают, что желаемая вероятность успешной передачи может быть недостижима из-за введенного ограничения на энергию.

Авторы [5] рассматривают механизм Group-Synchronized Distributed Coordination Function (GS-DCF), похожий на механизм RAW. В модели предполагается, что число RAW-слотов бесконечно и функция отсрочки сохраняет свои значения между последовательными окнами. Модель из [5] не подходит для решения поставленной задачи, т.к. в задаче требуется учитывать сброс счетчика отсрочки между периодами.

В работе [6] рассматривается RAW, разделенное на подокна, в которых уже время делится равномерно между станциями, объединенными в группы. Авторы [6] показывают, что предложенное ими разделение помогает достичь лучшей пропускной способности, чем выделение RAW-слота фиксированной длины для групп разных размеров. В поставленной задаче не требуется выделение групп, поэтому модель из [6] неприменима.

Вышеперечисленные статьи рассматривают длинные окна ограниченного доступа с выделением групп станций, активных в них. Модели, предложенные в статьях, рассматривают общий случай, который не учитывает периодичность окна, которая определенно дает преимущество в том, что не

нужно отправлять данные о новом окне каждый beacon-интервал. В данной же работе изучается короткое периодическое окно ограниченного доступа с простой моделью. Также рассматривается оптимизация параметров периодического окна ограниченного доступа и параметров метода доступа EDCA.

3 Описание сценария и аналитической модели

Рассматривается сценарий, в котором группа сенсоров осуществляет редкие замеры параметров окружающей среды и передает результаты замеров. Таким образом, исходящий трафик сенсоров моделируется экспоненциальным распределением с параметром λ . В силу простоты сенсор не осуществляет измерения, когда имеет непустую очередь и занимается передачей кадра.

Для защиты сенсоров от конкуренции с другими станциями выделяется короткое периодическое окно ограниченного доступа с одним RAW-слотом. Рассматриваются короткие RAW-слоты, длина которых не может вместить более одной попытки передачи. Внутри RAW-слота при передаче кадра используется механизм EDCA. По прошествии RAW сенсоры, у которых остался кадр в очереди, засыпают до начала следующего RAW.

Дабы эффективно использовать окно ограниченного доступа, необходимо оптимально выбрать такие параметры, как длительность периода $T_{\text{период}}$, длительность RAW-слота T_{raw} , размер конкурентного окна W_0 . Если RAW-слот слишком длинный, то он будет потреблять слишком много канального ресурса. При слишком маленьком числе W_0 будет наблюдаться большое число коллизий, и данные не будут доходить в кратчайшие сроки. Определим задержку кадра как время, прошедшее от момента генерации кадра до его успешной передачи. Возникает следующая задача: **при заданном числе сенсоров, интенсивности потока кадров и ограничении на потребление канального ресурса определить, при каких параметрах метода доступа будет достигнута наименьшая средняя задержка доставки данных.**

Для решения этой задачи была разработана аналитическая модель передачи данных в периодическом окне ограниченного доступа, которая валидируется посредством имитационной модели. В силу ограничения на размер статьи далее приводится лишь краткое описание разработанной аналитической модели. При описании модели используется введённое в [7] понятие о виртуальном слоте. Успешным виртуальным слотом называется виртуальный слот, содержащий одну попытку передачи. Так как влияние шума не рассматривается, такая попытка передачи всегда успешна. Коллизионным виртуальным слотом называется виртуальный слот, содержащий более одной попытки передачи от разных станций. Пустым виртуальным слотом называется виртуальный слот, не содержащий никаких попыток передачи. Длительности успешного, коллизионного и пустого виртуального слотов обозначаются как T_S , T_C и T_E соответственно. Считается, что механизм избегания коллизий RTS-CTS не используется, т.е. $T_S = T_C$.

В силу того, что рассматриваются короткие RAW-слоты, вмещающие не более одной успешной передачи, длительность RAW-слота может быть параметризована как $T_{\text{raw}} = T_s + K * T_e$, где K — число пустых виртуальных слотов в RAW-слоте. Считая известным число активных станций n на начало RAW-слота можно, используя методы комбинаторного анализа, найти вероятности $P_s(n, K, W_0)$, $P_c(n, K, W_0)$ и $P_e(n, K, W_0)$ того, что RAW-слот будет содержать успешную попытку передачи, коллизию или не будет содержать попыток передач, соответственно. Далее рассматривается цепь Маркова с состоянием n_t , где t - число пройденных периодов, а за начало периода принимается конец RAW. Зная вероятности $P_s(n, K, W_0)$, $P_c(n, K, W_0)$, $P_e(n, K, W_0)$ и вероятность $q = 1 - e^{-\lambda * T_{\text{период}}}$ того, что за период RAW на станцию с пустой очередью поступит новый кадр, можно найти матрицу переходных вероятностей для цепи Маркова и стационарное распределение вероятностей. Зная стационарное распределение вероятностей и применяя формулу Литтла можно найти среднюю задержку доставки кадра данных.

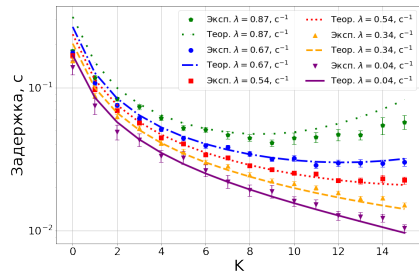
4 Численные результаты и анализ

Таблица 1: Параметры экспериментов

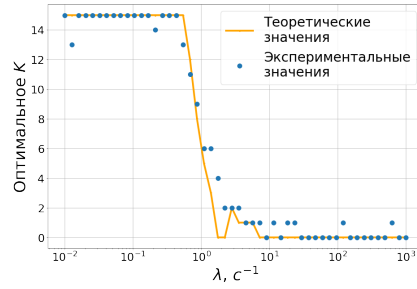
T_e	$52\mu s$
T_c	$1064\mu s$
T_s	$1064\mu s$
N	50
$\frac{T_{\text{raw}}}{T_{\text{период}}}$	0.1
RL	7

При получении численных результатов используются параметры сети, указанные в Таблице 1. Станции используют ограничение на число попыток повторной отправки кадра RL . Начальное число активных станций есть 0. Рассматривается ограничение на потребление канального ресурса $\frac{T_{\text{raw}}}{T_{\text{период}}} = 0.1$. Для данных параметров было проведено численное моделирование.

На рис. 2а изображен график зависимости задержки доставки кадра при разных λ в зависимости от длины RAW-слота, определяемой числом K , для $W_0 = 16$. Видно, что теоретические расчеты сходятся с имитацией при $\lambda < 0,87\text{с}^{-1}$. Т.к. для разных λ задержка была минимальной при различных аргументах, можно минимизировать задержку по K . Рис. 2б показывает зависимость значения K , минимизирующего задержку, от λ . Большое значение K увеличивает вероятность совершения попытки передачи внутри



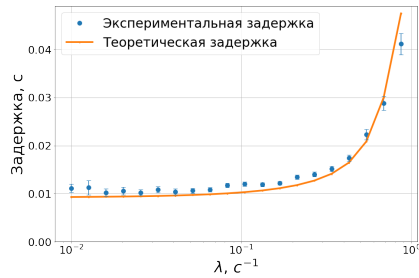
(а) Зависимость задержки от K для разных λ



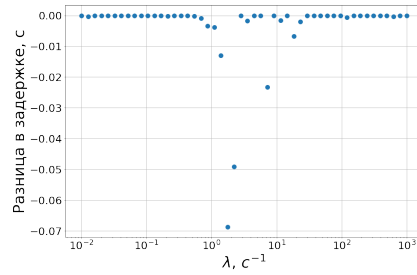
(б) Зависимость оптимального K от λ

Рис. 2: Минимизация задержки по K при $W_0 = 16$

RAW-слота, однако также увеличивает вероятность прихода нового кадра q , так как $T_{\text{период}} \geq 10 \cdot T_{\text{raw}}$. Для малых λ оказываются оптимальными большие значения K , так как активных станций мало и вероятность попадания в коллизию мала, при этом новые кадры приходят редко. При увеличении λ оптимальное K уменьшается, так как новые кадры приходят чаще и необходимо, чтобы у большего числа станций значение счетчика отсрочки выходило за пределы RAW-слота для снижения числа коллизий.



(а) Зависимость минимальной задержки от λ



(б) Разность минимизированной по K задержки

Рис. 3: Результат минимизации задержки по K посредством аналитической и имитационной моделей при $W_0 = 16$

На рис. 3 показаны результаты для задержки, минимизированной по K . Рис. 3а показывает зависимость минимизированной задержки от λ при использовании разных моделей. Доверительный интервал с уровнем доверия 95% этой измеряемой величины показан на рис. 3а. Рис. 3б показывает разность между значениями задержки, найденными посредством имитационной модели, для оптимальных K , полученных с использованием анали-

тической и имитационной моделей. Несмотря на то, что согласно рис. 3а найденная посредством аналитической модели минимальная задержка не совпадает со значением, полученным согласно имитационной модели, рис. 3б показывает, что аналитическая модель может быть использована для минимизации задержки по K , так как минимизация с использованием аналитической модели приводит к квазиоптимальному значению задержки, близкому к минимуму, найденному посредством имитационной модели.

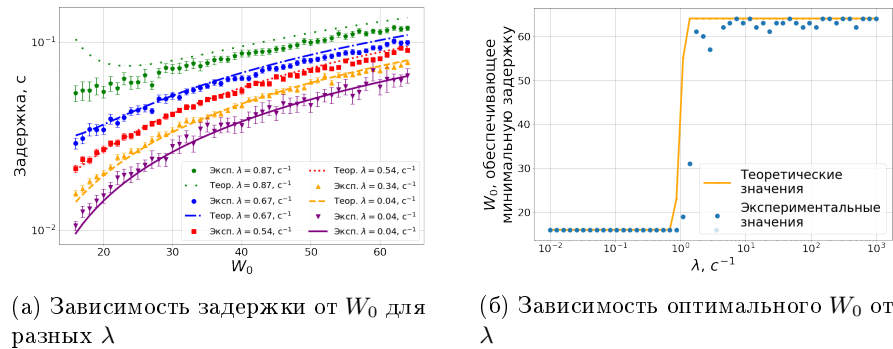
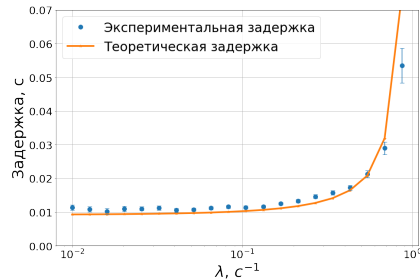


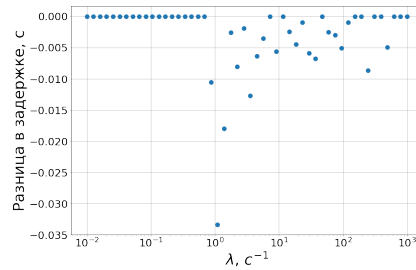
Рис. 4: Минимизация задержки по W_0 при $K = 15$

Аналогичным образом можно минимизировать задержку по W_0 , см. рис. 4. Так же, как и рис. 2а, рис. 4а показывает, что аналитическая модель сходится с результатами имитационного моделирования при малых λ , но начинает расходиться при больших значениях λ . Для малых λ увеличение значения W_0 уменьшает вероятность осуществления попытки передачи в RAW-слоте, что приводит к появлению пустых RAW-слотов, которые не были использованы, несмотря на наличие активных станций, и увеличению задержки. Однако при увеличении λ , согласно рис. 4б, увеличивается число активных станций и конкуренция за доступ к каналу, что приводит к необходимости увеличивать W_0 для уменьшения вероятности коллизии и увеличения вероятности успешной передачи в RAW-слоте. Таким образом, при малых λ большое W_0 приводит к потере канального ресурса из-за большого числа пустых RAW-слотов, а при больших λ малое значение W_0 приводит к долгому ожиданию RAW-слота с успешной передачей.

Так же, как и для рис. 3, можно минимизировать задержку по W_0 . Результаты минимизации задержки по W_0 изображены на рис. 5. Опять же, несмотря на то, что для аналитической и имитационной моделей значения минимизированной задержки не сходятся, согласно рис. 5а, значение задержки при минимизации посредством аналитической модели является квазиоптимальным, т.е. близким к значению задержки, минимизированной посредством имитационной модели, как показано на рис. 5б. Доверительные интервалы с уровнем доверия 95% для задержки отражены на рис. 5а.



(а) Зависимость минимальной задержки от λ



(б) Разность минимизированной по W_0 задержки

Рис. 5: Результат минимизации задержки по W_0 посредством аналитической и имитационной моделей при $K = 15$

5 Заключение

В данной статье был рассмотрен сценарий передачи разреженного трафика в восходящем канале в беспроводной сенсорной сети посредством механизма окна ограниченного доступа. Использование механизма окна ограниченного доступа позволяет снизить конкуренцию между станциями, чтобы получать сообщения и от «подавляемых конкуренцией» станций. Чтобы эффективно использовать такое окно, необходимо выбрать оптимальные параметры согласно принятому критерию эффективности. В данной статье была разработана аналитическая модель короткого периодического окна ограниченного доступа. Полученная модель позволяет найти такие параметры, при которых достигается наименьшая задержка доставки кадров данных при удовлетворении ограничения на долю занятого канального ресурса. Модель была валидирована с использованием методов имитационного моделирования, было показано что модель хорошо предсказывает работу механизма окна ограниченного доступа при малой интенсивности входящего трафика. Также было показано, что разработанная модель позволяет достигать квазиоптимального значения задержки даже вне области сходимости.

В дальнейшем авторами данного исследования планируется продолжить исследование оптимизации параметров метода доступа к каналу с использованием построенной аналитической модели.

Список литературы

1. Khorov Evgeny, Krotov Alexander, Lyakhov Andrey. Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11 ah Networks // 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW) / IEEE. — 2015. — P. 1149–1154.
2. Fast and Reliable Alert Delivery in Mission-Critical Wi-Fi HaLow Sensor Networks / Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Ivan Nasedkin et al. // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 14302–14313.

3. Enabling the Internet of Things with Wi-Fi HaLow — Performance Evaluation of the Restricted Access Window / Evgeny Khorov, Alexander Krotov, Andrey Lyakhov et al. // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 127402–127415.
4. Resource Allocation for Machine-Type Communication of Energy-Harvesting Devices in Wi-Fi HaLow Networks / Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Jeroen Famaey // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 9. — P. 2449.
5. Performance Analysis of Grouping Strategy for Dense IEEE 802.11 Networks / Lei Zheng, Lin Cai, Jianping Pan, Minming Ni // 2013 IEEE Global Communications Conference (Globecom) / IEEE. — 2013. — P. 219–224.
6. Throughput Enhancement of Restricted Access Window for Uniform Grouping Scheme in IEEE 802.11 ah / Naveed Nawaz, Maryam Hafeez, Syed Ali Raza Zaidi et al. // 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC) / IEEE. — 2017. — P. 1–7.
7. 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.