

Исследование производительности механизма PRAW со слотами произвольной длительности в сетях Wi-Fi HaLow

М.В. Шлапак^{*,**}, Р.Р. Юсупов^{*}, А.И. Ляхов^{*}

^{*}Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

^{**}Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

Поступила в редколлегию 30.09.2023

Аннотация—Стремительный рост числа «умных» устройств, способных обмениваться данными внутри одной сети, приводит к появлению механизмов, позволяющих адаптировать технологии передачи данных к сетям Интернета вещей. Одним из них является механизм периодического окна ограниченного доступа PRAW (англ.: Periodic Restricted Access Window), представленный в стандарте 802.11ah. Грамотный выбор параметров механизма PRAW позволяет большому числу сенсоров передавать данные быстро и энергоэффективно, однако сам стандарт 802.11ah не дает рекомендаций по их выбору. В данной статье решаются задачи оптимизации параметров механизма PRAW, нацеленных на минимизацию (А) средней задержки, (В) среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет при выполнении ограничения на среднюю задержку и (С) доли потребляемого механизмом PRAW канального времени при выполнении ограничений на обе метрики. По результатам решения даются рекомендации по выбору параметров PRAW для различной нагрузки на сеть, определяемой интенсивностью генерации пакетов и числом станций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: IEEE 802.11ah, Wi-Fi HaLow, Интернет вещей, RAW, окно ограниченного доступа, аналитическая модель, задержка, энергопотребление, оптимизация.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_4_399

1. ВВЕДЕНИЕ

Концепция Интернета вещей (англ.: Internet of Things, IoT), объединяющая устройства, способные обмениваться данными внутри сети, неотделима от будущего. С каждым годом IoT-приложения находят все больше и больше применений, однако с ростом возможностей растет также количество и уровень требований, накладываемых на IoT-устройства, в числе которых быстрая и энергоэффективная передача данных внутри сети, содержащей большое количество «умных» устройств. Не всегда существующие технологии передачи данных способны выполнить требования к качеству обслуживания приложений Интернета вещей, в связи с чем возникает потребность в создании новых стандартов или адаптации старых. Одним из примеров последнего является стандарт 802.11ah, являющийся адаптацией технологии Wi-Fi к сетям Интернета вещей. В стандарте 802.11ah, получившем название Wi-Fi HaLow, описываются различные механизмы, такие как окно ограниченного доступа RAW (англ.: Restricted Access Window) и пробуждение по расписанию TWT (англ.: Target Wake Time), с помощью которых большое число сенсоров с ограниченным энергопотреблением может быстро передавать данные. Данная статья посвящена исследованию механизма RAW, во время работы которого подразумевается использование механизма TWT, позволяющего снизить количество потребляемой энергии при передаче данных.

Механизм RAW помогает снизить конкуренцию за доступ к каналу. Для этого точка доступа делит станции на M групп и выделяет каждой группе ограниченный интервал времени T_{slot} , называемый RAW-слотом, в течение которого только станции из определенной группы могут передавать свои пакеты. RAW-слоты объединяются в непрерывный интервал времени RAW — окно ограниченного доступа, которое по своей структуре может быть одиночным или периодическим (PRAW). В периодическом варианте механизма интервалы RAW повторяются с периодом T_{per} , который связан с остальными параметрами через долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC как $M \cdot T_{slot} = CTC \cdot T_{per}$. Доля CTC является важной метрикой производительности механизма PRAW, ограничения на которую нужно учитывать при его исследовании, поскольку передача данных часто происходит в гетерогенных сетях Wi-Fi, объединяющих сенсоры с другими станциями, обслуживающими насыщенный трафик.

Внутри выделенного RAW-слота станции передают данные с помощью метода случайного доступа к каналу EDCA (англ.: Enhanced Distributed Channel Access), базирующегося на методе CSMA/CA (англ.: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Одной из особенностей использования EDCA в механизме RAW является сброс размера конкурентного окна, определяющего множество начальных состояний счетчика отсрочки, до минимального значения W_0 в начале каждого RAW-слота. Станции может быть разрешено или запрещено начинать попытку передачи пакета, продолжающуюся после окончания RAW-слота. При этом по достижении некоторого максимально допустимого числа попыток передач пакета R станция его отбрасывает.

В качестве метрик производительности сети, позволяющих оценить эффективность механизма передачи данных в различных сценариях, нередко выступают средняя задержка и среднее энергопотребление. Механизм RAW в совокупности с механизмом TWT позволяет передавать данные быстро и энергоэффективно. Однако в стандарте 802.11ah нет рекомендаций по выбору параметров механизма RAW, обеспечивающих наилучшие показатели его производительности. Существующие исследования, на основе которых можно дать практические рекомендации, либо подразумевают сценарии доставки насыщенного трафика, нереалистичные для сетей Интернета вещей, либо используют упрощения при построении аналитических моделей, значительно влияющие на их точность, либо рассматривают передачу пакетов в пределах одного периода RAW.

Вклад данной работы заключается в разработке рекомендаций по выбору параметров PRAW, минимизирующих среднюю задержку, среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет или долю потребляемого механизмом PRAW канального времени при различной нагрузке, определяемой интенсивностью генерации пакетов и числом станций, путем решения оптимизационных задач (см. раздел 5) с помощью аналитического моделирования, в котором учтены все особенности передачи данных в сетях Интернета вещей с помощью механизма PRAW.

Дальнейшее изложение построено следующим образом: в разделе 2 приводится обзор существующих работ, в которых был исследован механизм RAW, в разделе 3 описывается сценарий, раздел 4 содержит описание аналитической модели, применяющейся для решения оптимизационных задач, в разделе 5 рассматриваются результаты оптимизационных задач, и, наконец, в разделе 6 представлены основные выводы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для выбора параметров RAW, обеспечивающих минимальную среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет, можно использовать аналитические модели [1–23], которые позволяют исследовать механизм RAW с меньшими вычислительными затратами по сравнению с имитационным моделированием. Однако в каждой из аналитиче-

ских моделей подразумеваются некоторые допущения, которые могут значительно влиять на точность получаемых результатов.

Авторы некоторых из работ [16–19] рассматривают раннюю версию механизма RAW, называемую GS-DCF (англ.: Group-Synchronized Distributed Coordination Function). При этом в работах [16–19], а также в некоторых из исследований нынешней версии механизма RAW [8–13] подразумеваются сценарии доставки насыщенного трафика, не являющиеся реалистичными для сетей Интернета вещей. В аналитических моделях доставки ненасыщенного трафика часто используется допущение о постоянной вероятности передачи пакета в RAW-слоте [1–4], значительно влияющее на точность.

Аналитические модели, основанные на теории цепей Маркова [13–15], позволяют учитывать изменение вероятности передачи пакета со временем. Одной из самых ранних работ, использующих марковские цепи для исследования механизма RAW, была работа [13], в которой авторы нашли длительность RAW-слота, позволяющую передать пакет от выбранной произвольным образом станции или пакеты от всех станций, с вероятностью, не меньшей заданной. Работа [13] стала хорошим фундаментом для дальнейших исследований: модель [14] расширила [13] на случай произвольного числа пакетов, находящихся в очереди каждой станции, а авторы [15] адаптировали модель [13] для сценариев передачи данных устройствами с ограниченным энергопотреблением. Однако во всех работах [13–15] рассмотрение RAW ограничивалось одним периодом.

Передача пакетов за несколько периодов RAW в сценариях обслуживания ненасыщенного трафика была рассмотрена в работах [20–23]. Однако авторы [20, 21] нашли вероятность передачи только первого пакета от группы сенсоров, а авторы [22] сосредоточились на оценке производительности периодического механизма RAW (англ.: Periodic Restricted Access Window, PRAW) с короткими слотами, вмещающими только одну попытку передачи. Рассмотрение только коротких RAW-слотов снижает сложность аналитической модели, поскольку при расчете вероятностей передачи в RAW-слоте используются комбинаторные формулы вместо марковских процессов, однако такое упрощение также ограничивает ее применимость. Слоты произвольной длительности рассматривали авторы работы [23], что в совокупности с периодическим повторением интервала RAW, доставкой ненасыщенного трафика и учетом изменения вероятности передачи пакета со временем обеспечивает высокую точность аналитической модели [23] и ее применимость для решения различных задач, связанных с оптимизацией механизма RAW.

Эффективность механизма RAW оценивалась с точки зрения различных метрик производительности сети: в работах, посвященных непериодическому RAW, основной метрикой была вероятность доставки пакета за интервал RAW, в то время как для PRAW исследовалась средняя задержка его доставки. Эффективность RAW и PRAW была исследована также с точки зрения энергопотребления и пропускной способности. Некоторые авторы предлагали алгоритмы оптимизации одного из параметров RAW (например, интервала передачи для станции [24], числа групп [25] или размера конкурентного окна [26]). Однако до сих пор не существует работ, посвященных совместной оптимизации параметров механизма PRAW (таких как M , W_0 , T_{slot} , T_{per}) и дающих рекомендации по выбору этих параметров в зависимости от интенсивности трафика, числа станций и целевой метрики.

В данной работе впервые даются рекомендации по выбору параметров PRAW, оптимизирующих среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет, в зависимости от интенсивности трафика и числа станций. Оценка эффективности механизма PRAW проводится при помощи аналитической модели, основанной на [23] и учитывающей возможность генерации пакетов во время RAW-слота.

3. СЦЕНАРИЙ

Рассматривается беспроводная локальная сеть стандарта 802.11ah, в которой находятся N сенсорных станций и точка доступа. Сенсоры достаточно простые и дешевые, поэтому в их очереди хранится не более одного пакета. Новый пакет генерируется на сенсоре, завершившем обслуживание предыдущего пакета, через интервал времени, являющийся случайной величиной, распределенной экспоненциально с параметром λ .

Для уменьшения конкуренции за доступ к каналу точка доступа использует механизм PRAW, разбивая N сенсоров на M групп (в группе с номером m , $1 \leq m \leq M$, находится N_m станций), и выделяя каждой группе RAW-слот длительностью T_{slot} . Все RAW-слоты объединяются в единый непрерывный интервал времени $T_{raw} = M \cdot T_{slot}$, повторяющийся с периодом T_{per} (рис. 1).

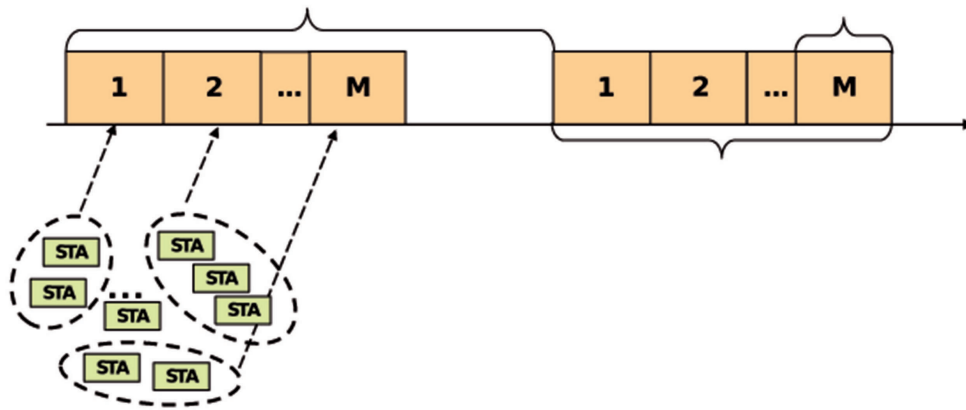


Рис. 1. Конфигурация PRAW.

Данные передаются в идеальном канале, т.е. неудачная попытка передачи пакета является только следствием коллизии, под которой подразумевается одновременная передача пакета двумя и более станциями. Все станции слышат друг друга, т.е. скрытые станции отсутствуют, чего можно добиться, используя методы [27–31]. Передача пакета происходит строго внутри RAW-слота, поэтому станции передают пакет только в том случае, если обнаруживают, что времени, оставшегося до конца RAW-слота, достаточно для передачи.

Для экономии энергии станции вне выделенного им RAW-слота, станции, у которых нет пакета для передачи в выделенном им RAW-слоте, а также станции, обнаруживающие, что для совершения передачи недостаточно времени, оставшегося до конца выделенного им RAW-слота, уходят в спящий режим и экономят энергию, используя механизм TWT.

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для решения оптимизационных задач по выбору параметров PRAW, обеспечивающих наилучшую эффективность механизма PRAW с точки зрения средней задержки или среднего энергопотребления, используется модель [23], в которой будет дополнительно учтена возможность генерации пакетов внутри RAW-слота.

Станции совершают попытки передачи пакетов строго внутри выделенных RAW-слотов, не пересекая границы, поэтому процессы передачи пакетов станциями, находящимися в разных группах и передающими в разных слотах, независимы друг от друга. В работе [23] разрабатывается модель доставки ненасыщенного трафика для случая одиночного периодического

RAW-слота ($M = 1$, $T_{raw} = T_{slot}$), а потом полученные результаты обобщаются на случай нескольких RAW-слотов. При построении модели [23] предполагается, что все пакеты передаются за малое число попыток, поэтому считается, что у станции нет ограничения на количество повторных попыток передач пакета R , существенно влияющего на точность результатов.

Модель [23] основывается на двух процессах, каждый из которых является цепью Маркова с дискретным временем. Сначала рассматривается процесс передачи пакетов внутри RAW-слота m [13], из которого находятся вероятности успешной передачи фиксированного числа пакетов за весь RAW-слот. При этом считается, что на момент начала RAW-слота (и, соответственно, на момент начала рассматриваемого процесса) ровно $0 \leq n \leq N_m$ станций имели пакеты для передачи. Далее рассматривается процесс изменения количества активных, т.е. имеющих пакет для передачи, станций на момент начала RAW-слотов m двух соседних периодов. За время RAW-слота станции с некоторой вероятностью, найденной из первого процесса, могут передать свои пакеты, а новые пакеты могут сгенерироваться либо на неактивных на момент начала RAW-слота станциях в течение периода длительностью T_{per} , либо на станциях, передавших свои пакеты во время RAW-слота длительностью T_{slot} , начиная с момента времени $\frac{T_s + T_{slot}}{2}$ после его начала (считается, что момент окончания успешной передачи пакета распределен равномерно между T_s (длительность успешной передачи) и T_{slot}). Учет возможности генерации пакетов на станции во время RAW-слота, в котором произошла передача пакета той же станцией, отличает модель, рассматриваемую в данной статье, от модели [23]. С помощью методов, описанных в [32], для дополненной модели находится стационарное распределение числа активных на момент начала RAW-слота станций. Оно позволяет найти среднее число \bar{v}_m пакетов, переданных за один период RAW, которое также равно среднему числу пакетов, сгенерировавшихся за один период RAW. Суммируя \bar{v}_m по всем группам M , можно найти среднее число переданных за один период RAW пакетов \bar{v} для общего случая с произвольным числом групп M .

С помощью среднего числа переданных за период RAW пакетов \bar{v} находится средняя задержка доставки пакета \bar{D} : из среднего времени между двумя успешными попытками передачи пакета, найденного с помощью формулы Литтла [33], вычитается среднее время генерации пакета.

Процесс передачи пакетов внутри RAW-слота описывается с помощью состояний (t, c, s) [13], показывающих, что с момента начала RAW-слота прошло s успешных, c коллизионных и $t - c - s$ пустых виртуальных слотов, под которыми подразумевается временной интервал между двумя последовательными изменениями счетчика отсрочки [34, 35]. При этом так же, как и в [23], рассчитывается среднее количество энергии \bar{Q}_m , потребляемое N_m станциями за RAW-слот, равное среднему энергопотреблению за весь период RAW в силу того, что станции находятся в спящем режиме вне выделенных им RAW-слотов. Величина \bar{Q}_m является взвешенной по вероятностям нахождения в каждом из состояний (t, c, s) средней энергией, потребляемой активными станциями при переходе из состояния (t, c, s) , в которой также проводится усреднение по стационарному распределению числа активных на момент начала RAW-слота станций. Среднее энергопотребление станцией \bar{Q}_s за период RAW, приходящееся на один переданный пакет, для общего случая с произвольным числом групп M находится суммированием \bar{Q}_m по всем группам и последующим делением на среднее число переданных за период RAW пакетов \bar{v} .

5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть пакеты размером 100 байт передаются с помощью сигнально-кодовой конструкции 8 в канале 2 МГц, что соответствует длительности передачи $T_s = 1064$ мкс, рассчитываемой в соответствии с [36]. Механизм RTS/CTS (англ.: Request To Send / Clear To Send) не использу-

ется, поэтому длительности успешной и коллизийной попыток передачи равны между собой. Максимальный размер конкурентного окна равен 1024 и взят из [36]. Значения энергии, затрачиваемой станцией на прослушивание пустого виртуального слота Q_{idle} , чужой попытки передачи Q_{busy} или на совершение собственной попытки передачи Q_{TX} , равны 2,9 мкДж, 91 мкДж или 160 мкДж, соответственно, и взяты из [37].

Аналитическая модель, описанная в разделе 4, используется для решения следующих оптимизационных задач:

- А. Для заданных интенсивности λ , числа станций N и ограничения на долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC^{lim} найти конфигурацию PRAW (M, W_0, T_{slot}) , обеспечивающую минимальную среднюю задержку доставки пакета \bar{D}^{min} ;
- В. Для заданных интенсивности λ , числа станций N и ограничений на долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC^{lim} и среднюю задержку доставки пакета D^{lim} , найти конфигурацию PRAW (M, W_0, T_{slot}) , обеспечивающую минимальное среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет \bar{Q}_s^{min} ;
- С. Для заданных интенсивности λ , числа станций N и ограничений на среднюю задержку доставки пакета D^{lim} и среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет \bar{Q}_s^{lim} , найти минимальную долю потребляемого механизмом PRAW канального времени, при которой эти ограничения выполняются.

Доля потребляемого механизмом PRAW канального времени рассчитывается по формуле $CTC = \frac{MT_{slot}}{T_{per}}$. При решении оптимизационных задач непрерывная величина T_{slot} дискретизируется с шагом $T_e = 52$ мкс, равным длительности пустого виртуального слота. Таким образом, все три параметра (M, W_0, T_{slot}) изменяются дискретно.

На основе результатов задач оптимизации разрабатываются стратегии выбора параметров PRAW, минимизирующие среднюю задержку или среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет при различной нагрузке, определяемой интенсивностью генерации пакетов и числом станций.

5.1. Оптимизационная задача А: минимизация средней задержки

Найдем с помощью полного перебора конфигурацию PRAW (M, W_0, T_{slot}) , минимизирующую среднюю задержку доставки пакета при заданных интенсивности λ , количестве станций N и ограничении на долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC^{lim} :

$$\begin{aligned} \min_{(M, W_0, T_{slot})} \quad & \bar{D}, \\ \text{s.t.} \quad & CTC \leq CTC^{lim}. \end{aligned}$$

На рис. 2а,б приведены значения обеих метрик производительности, полученные в ходе решения оптимизационной задачи А для $N = 12$ станций и различных интенсивностей λ : рис. 2а демонстрирует зависимость минимумов средней задержки доставки пакета \bar{D}^{min} от ограничения на долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC^{lim} , а рис. 2б — среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет \bar{Q}_s . Анализ результатов показывает, что решением оптимизационной задачи А является конфигурация PRAW $(M, W_0, T_{slot}) = (N, 1, T_s)$, соответствующая выделению каждой станции по RAW-слоту длительности T_s , равной длительности передачи пакета, что оказывается оптимальным для строгих ограничений на долю потребляемых механизмом PRAW канальных ресурсов CTC^{lim} и высоких интенсивностей λ , или некоторая конфигурация PRAW с $M = 1$ и нетривиальными значениями W_0 и T_{slot} , оптимальная для нестрогих ограничений CTC^{lim} и/или малых λ .

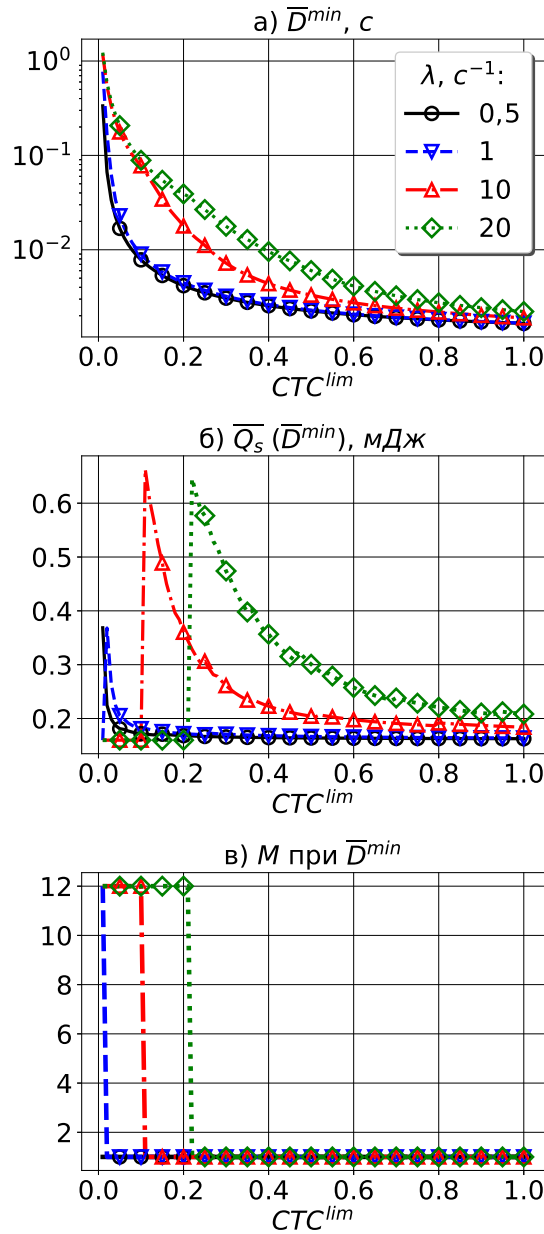


Рис. 2. Зависимости а) минимумов средней задержки доставки пакета, б) среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет и в) числа групп M , соответствующих минимумам средней задержки, от STC^{lim} для $N = 12$ станций и различных значений интенсивности λ .

Существует также переходное значение STC^* допустимой доли STC^{lim} , увеличивающееся с ростом интенсивности λ , в окрестности которого оптимальное значение параметра M меняется с $M = N$ на $M = 1$.

Обратимся к рис. 2б, демонстрирующему зависимость среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет от ограничения на долю выделяемых механизму PRAW канальных ресурсов STC^{lim} . Прежде всего, отметим, что все кривые, соответствующие средним и высоким интенсивностям ($\lambda \geq 1 c^{-1}$), при строгих ограничениях STC^{lim} находятся на уровне $\bar{Q}_s = Q_{TX}$, соответствующем минимальному значению энергии, необходимой для передачи пакета. Минимальное энергопотребление достигается при конфигурации PRAW $(M, W_0, T_{slot}) =$

$(N, 1, T_s)$, поскольку каждая станция, которой назначен собственный RAW-слот, не тратит энергию на прослушивание канала и сразу совершает попытку передачи пакета, которая оказывается успешной ввиду отсутствия конкуренции. При переходе через CTC^* длительность RAW-слота увеличивается, а внутри него происходят попытки передач от всех активных станций, поскольку число групп меняется с $M = N$ на $M = 1$. Станции начинают тратить значительную часть энергии на прослушивание чужих передач и коллизии, поэтому вблизи CTC^* наблюдается резкий скачок кривых среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет. При дальнейшем увеличении CTC^{lim} наблюдается спад, поскольку выделение большей доли канальных ресурсов способствует уменьшению периода и, соответственно, уменьшению вероятности генерации пакета за период, поэтому станции с меньшей вероятностью слушают чужие передачи и меньше энергии тратят на коллизии.

Выясним, почему именно конфигурации с $M = N$ и $M = 1$ оказываются оптимальными с точки зрения средней задержки. Для этого обратимся к рис. 3, который демонстрирует решения задачи оптимизации $\min_{W_0} \bar{D}$, полученные для каждой фиксированной пары значений (M, T_{slot}) путем варьирования параметра W_0 , для $N = 12$ станций, интенсивности $\lambda = 10 \text{ с}^{-1}$ и значения $CTC = 0,1$, близкого к переходному. Так как T_{per} и T_{slot} связаны друг с другом через $M \cdot T_{slot} = CTC \cdot T_{per}$, все кривые начинаются со значения T_{per} , соответствующего RAW-слоту минимальной длительности, достаточной для передачи пакета, $T_{slot} = T_s$. Значения пропускной способности системы $Th = \frac{\bar{v}}{T_{per}}$ (рис. 3а) обратно пропорциональны средней задержке, поскольку по формуле Литтла $\bar{D} = \frac{T_{per} \cdot N}{\bar{v}} - \frac{1}{\lambda}$. На рис. 3а с ростом T_{per} кривые Th либо флуктуируют в случае $M < N$, либо убывают в случае $M = N$. Последнее обусловлено тем, что каждая станция гарантированно передает пакет за один период RAW, поэтому среднее число переданных пакетов \bar{v} зависит только от вероятности генерации пакета за период, и изменение \bar{v} оказывается много меньше изменения величины T_{per} , стоящей в знаменателе Th . Чтобы проанализировать колебания пропускной способности, обратимся к рис. 3б, демонстрирующему зависимость среднего числа переданных за период RAW пакетов от длительности периода T_{per} . Кривые \bar{v} имеют ступенчатую форму: среднее число переданных пакетов резко возрастает, когда длительность RAW-слота увеличивается настолько, чтобы вместить еще одну попытку передачи пакета, и остается почти неизменным в противном случае. В точках резкого роста \bar{v} расположены локальные максимумы $Th = \frac{\bar{v}}{T_{per}}$: быстрый рост числителя сопровождается медленным ростом знаменателя.

Рис. 3б показывает, что деление интервала RAW на $M < N$ RAW-слотов приводит к уменьшению среднего числа переданных за период RAW пакетов: чем меньше значение M , тем выше лежит соответствующая кривая при любом значении T_{per} . Одной из причин такого поведения является простаивание канала в конце каждого RAW-слота, поскольку станции не совершают попытки передачи пакета, выходящие за его границу. При этом при любой конфигурации с $M < N$ существует ненулевая вероятность не передать за период RAW все имеющиеся пакеты, в частности потому что каждому RAW-слоту назначено больше одной станции, пакеты от которых при передаче могут попадать в коллизии. При конфигурации с $M = N$ за один период RAW гарантированно передаются все имеющиеся пакеты, поэтому кривые с $M = N$ оказываются выше остальных кривых с $M < N$ на рис. 3б. Однако если на начало RAW-слота у станции не будет пакета для передачи, в случае конфигурации с $M = N$ канал будет простаивать на протяжении каждого из RAW-слотов, назначенных этой станции. Таким образом, большее число групп M соответствует большему времени простаивания канала, возможному при низких интенсивностях. Поэтому при низких интенсивностях λ и коротких периодах T_{per} , при которых мала вероятность генерации пакета за период, минимум задержки приходится на конфигурацию с $M = 1$. При высоких интенсивностях λ и длинных периодах T_{per} (соответ-

ствующих строгим ограничениям CTC^{lim}) с высокой вероятностью оказываются активными почти все станции, поэтому конфигурация с $M = N$ является оптимальной.

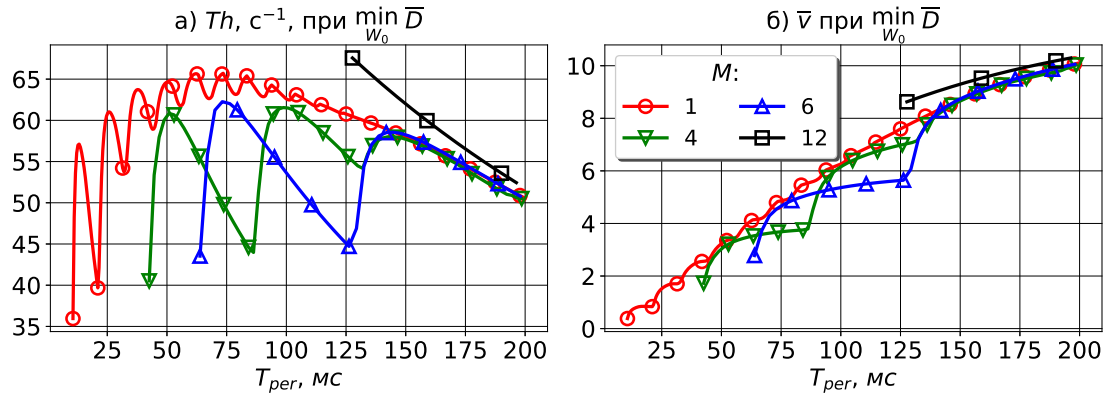


Рис. 3. Зависимости а) пропускной способности и б) среднего числа переданных за период RAW пакетов, соответствующих минимумам задержки, от длительности T_{per} периода RAW для $N = 12$ станций, интенсивности $\lambda = 10 \text{ c}^{-1}$ и доли потребляемого механизмом PRAW канального времени $CTC = 0,1$. Средняя задержка минимизируется путем варьирования параметра W_0 при неизменных M и T_{slot} .

Найдем оптимальные длительности RAW-слота T_{slot} , соответствующие конфигурации с $M = 1$. Для этого обратимся к рис. 4, демонстрирующему зависимость длительностей RAW-интервалов $T_{raw} = M \cdot T_{slot}$, соответствующих параметрам M и T_{slot} , обеспечивающим минимальную среднюю задержку доставки пакета \bar{D}^{min} , от ограничения на долю потребляемых механизмом PRAW канальных ресурсов CTC^{lim} . Отметим, что при ограничениях CTC^{lim} , меньших чем CTC^* , оптимальной является конфигурация PRAW с $M = N$, поэтому все кривые T_{raw} , соответствующие средним и высоким интенсивностям ($\lambda \geq 1 \text{ c}^{-1}$), при строгих ограничениях CTC^{lim} находятся на уровне $T_{raw} = N \cdot T_s$. Вблизи CTC^* наблюдается резкое падение кривых T_{raw} , соответствующее переходу к оптимальной конфигурации с $M = 1$ для средних и высоких интенсивностей: по достижении значения CTC^* период T_{per} , а вместе с ним и вероятность генерации пакета за период, уменьшаются настолько, что оптимальной по задержке становится передача пакетов внутри одиночного ($M = 1$) RAW-слота, при этом интервал $T_{raw} = T_{slot}$ сокращается примерно в два раза для интенсивностей $\lambda = 10, 20 \text{ c}^{-1}$.

При дальнейшем увеличении CTC^{lim} кривые T_{raw} имеют ступенчатую форму: области быстрого спада сменяются областями постоянных значений. Для объяснения этой зависимости зафиксируем конфигурацию $(1, W_0, T_{slot})$, оптимальную для некоторого ограничения CTC^{lim} , лежащего в области постоянных значений T_{raw} , и интенсивности λ , и посмотрим, как выделение большей доли канальных ресурсов влияет на связанные с ней величины. Вклад в изменение среднего числа \bar{v} переданных за период RAW пакетов вносят две величины: вероятность генерации пакета за период, отвечающая за среднее число активных на момент начала RAW-слота станций и конкуренцию за доступ к каналу, и вероятность передачи пакета во время RAW-слота. С увеличением CTC^{lim} для фиксированной конфигурации $(1, W_0, T_{slot})$ уменьшается длительность периода T_{per} , которая понижает вероятность генерации пакетов за период RAW, но не вероятность их передачи, поскольку длительность RAW-слота остается такой же. Таким образом, изменение среднего числа \bar{v} переданных за период RAW пакетов оказывается много меньше изменения длительности периода T_{per} , поэтому с ростом CTC^{lim} минимумы задержки по-прежнему достигаются при той же конфигурации $(1, W_0, T_{slot})$. Однако при еще большем увеличении CTC^{lim} длительность периода T_{per} и, соответственно, вероятность генерации пакетов за период RAW уменьшаются настолько, что RAW-слот длительностью T_{slot} с высокой

вероятностью содержит больше потенциальных попыток передач пакета, равных по длительности T_s , чем число активных на момент начала RAW-слота станций. Во избежание лишних затрат на каналные ресурсы, длительность RAW-слота уменьшается на величину, примерно равную длительности передачи пакета T_s .

Таким образом, после переходного значения CTC^* с ростом CTC^{lim} области постоянных значений T_{raw} на рис. 4а сменяются резким уменьшением на величину, примерно равную T_s . При этом длительности RAW-слота T_{slot} , приведенные на рис. 4а, являются квазиоптимальными с точки зрения средней задержки, поскольку, как показано на рис. 4б, значения средней задержки, близкие к минимальному, достигаются при достаточно широком диапазоне значений T_{slot} .

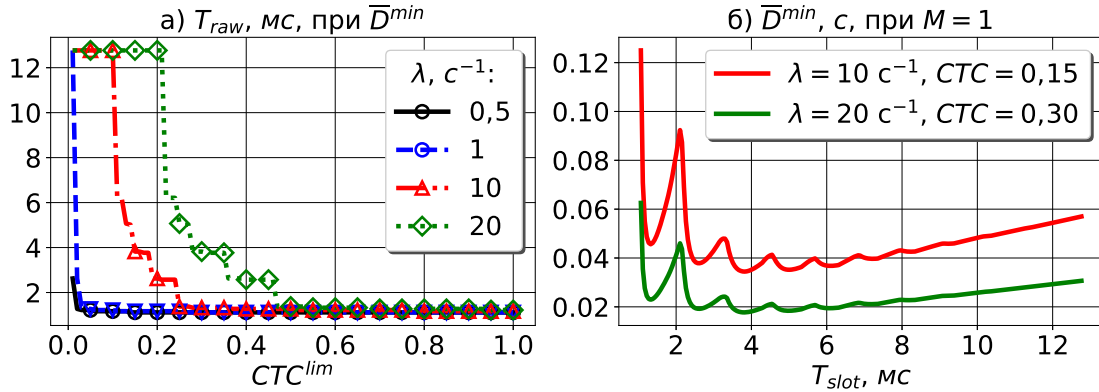


Рис. 4. Зависимости а) длительностей RAW-интервалов T_{raw} от CTC^{lim} и б) минимумов средней задержки доставки пакета \bar{D}^{min} от T_{slot} для $N = 12$ станций и различных интенсивностей λ .

5.2. Оптимизационная задача В: минимизация среднего энергопотребления при ограничениях на среднюю задержку

Найдем с помощью полного перебора конфигурацию PRAW (M, W_0, T_{slot}), минимизирующую среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет при заданных интенсивности λ , числе станций N и ограничениях на долю потребляемого механизмом PRAW канального времени CTC^{lim} и среднюю задержку доставки пакета D^{lim} :

$$\begin{aligned} \min_{(M, W_0, T_{slot})} \bar{Q}_s, \\ \text{s.t. } \bar{D} \leq D^{lim}, CTC \leq CTC^{lim}. \end{aligned}$$

Анализ результатов решения задачи А показал, что минимумы средней задержки достигаются при использовании конфигурации PRAW с $M = N$ или $M = 1$. Поскольку конфигурация PRAW ($N, 1, T_s$) обеспечивает минимальное энергопотребление в расчете на переданный пакет, имеет смысл ставить в задаче В только такие ограничения на D^{lim} , при которых конфигурация PRAW ($N, 1, T_s$) не обеспечивает $\bar{D} \leq D^{lim}$, так как в противном случае решение задачи В тривиально: $(M, W_0, T_{slot}) = (N, 1, T_s)$. Рис. 5 демонстрирует результаты оптимизационной задачи В для ограничений на среднюю задержку 10 и 20 мс, недостаточных для перехода к решению $M = N$ при строгих CTC^{lim} .

Зафиксируем конфигурацию (M, W_0, T_{slot}) , оптимальную для некоторого ограничения CTC^{lim} и интенсивности λ , и посмотрим, как выделение большей доли канальных ресурсов влияет на

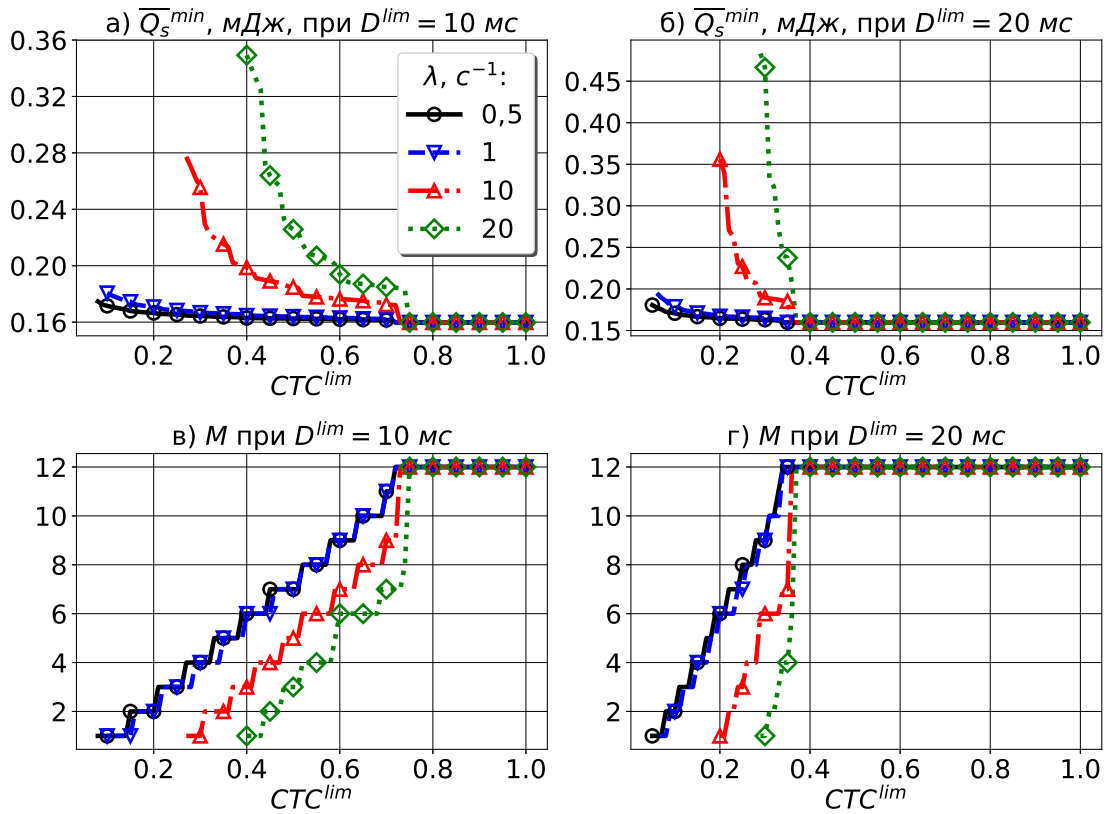


Рис. 5. Зависимости а),б) минимумов среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет и в),г) количества групп M , соответствующих этим минимумам, от CTC^{lim} для $N = 12$ станций, ограничений на задержку доставки пакета $D^{lim} = 10$ мс (а,в) и $D^{lim} = 20$ мс (б,г) и различных интенсивностей λ .

ее изменение. С увеличением CTC^{lim} для фиксированной конфигурации (M, W_0, T_{slot}) уменьшается длительность периода T_{per} , что приводит к понижению вероятности генерации пакета за период RAW и, соответственно, понижению среднего числа \bar{v} переданных за период RAW пакетов. Однако такое уменьшение длительности T_{per} не снижает вероятность передачи пакета, поскольку длительность RAW-слота T_{slot} и количество групп M остаются такими же, а конкуренция за доступ к каналу внутри RAW-слота могла только уменьшиться. Таким образом, выделение большей доли канальных ресурсов, т.е. увеличение CTC^{lim} , уменьшает среднюю задержку, отдавая ее в меньшую сторону от ограничения D^{lim} , так как длительность периода T_{per} , входящая в числитель в формуле для средней задержки $\bar{D} = \frac{T_{per}N}{\bar{v}} - \frac{1}{\lambda}$, уменьшается сильнее, чем среднее число переданных пакетов \bar{v} .

С другой стороны, целью оптимизационной задачи В является минимизация энергопотребления в расчете на переданный пакет при ограничении на среднюю задержку, поэтому отклонение от D^{lim} , полученное при увеличении CTC^{lim} , позволяет изменить параметры, уменьшающие \overline{Q}_s , но способные увеличить \bar{D} . Таким параметром является M : при использовании механизма RAW с большим числом RAW-слотов при неизменной длительности T_{slot} каждого из них уменьшается энергопотребление, поскольку каждому RAW-слоту назначено меньше станций, а сами станции большую долю периода проводят в спящем режиме и прослушивают меньше чужих передач. Однако увеличение M , как показал анализ результатов задачи А, увеличивает среднюю задержку. Таким образом, менее строгие ограничения CTC^{lim} при фиксированном ограничении на среднюю задержку D^{lim} позволяют использовать больше RAW-слотов: увеличение CTC^{lim} в оптимизационной задаче В увеличивает M , что отражено на рис. 5в,г. При

этом менее строгим ограничениям D^{lim} , также позволяющим использовать механизм RAW с большим числом RAW-слотов, соответствует меньшее энергопотребление, а сами ограничения могут выполняться при меньших CTC^{lim} , что заметно при сравнении соответствующих кривых для $D^{lim} = 10$ мс и $D^{lim} = 20$ мс на рис. 5.

Отметим также, что кривые среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет $\overline{Q_s}$ при дальнейшем увеличении CTC^{lim} выходят на плато $\overline{Q_s} = Q_{TX}$, соответствующее конфигурации PRAW $(N, 1, T_s)$, обеспечивающей минимальное энергопотребление в расчете на переданный пакет.

5.3. Оптимизационная задача С: минимизация доли потребляемого механизмом PRAW канального времени при ограничениях на обе метрики

Найдем с помощью полного перебора по конфигурациям (M, W_0, T_{slot}) и бинарного поиска по CTC минимальную долю потребляемого механизмом PRAW канального времени, достаточную для обслуживания пакетов, генерирующихся на каждой из неактивных станций с интенсивностью λ , со средней задержкой доставки пакета, не превышающей D^{lim} , и средним энергопотреблением в расчете на переданный пакет, не превышающим Q_s^{lim} :

$$\begin{aligned} & \min_{(M, W_0, T_{slot})} CTC, \\ & \text{s.t. } \overline{D} \leq D^{lim}, \overline{Q_s} \leq Q_s^{lim}. \end{aligned}$$

Рис. 6 демонстрирует результаты решения оптимизационной задачи С. При низких интенсивностях λ среднее число станций, активных на момент начала RAW-слота, невелико, поэтому каждая станция с высокой вероятностью передает свой пакет за один период RAW, потребляя при этом небольшое количество энергии. Соответственно, даже при низких CTC выполняются ограничения на обе метрики. С ростом интенсивности λ растет среднее число станций, активных на момент начала RAW-слота, снизить которое можно уменьшением длительности T_{per} . Это, в свою очередь, возможно при изменении одного или нескольких параметров, входящих в формулу $T_{per} = \frac{MT_{slot}}{CTC}$. В данном случае выделяется большая доля канальных ресурсов CTC , поскольку при уменьшении M или T_{slot} также уменьшается вероятность передачи пакета за RAW-слот.

Исходя из решений оптимизационной задачи А, минимумы средней задержки достигаются при конфигурациях с $M = N$ и $M = 1$. Значения CTC , при которых для фиксированной интенсивности λ оптимальной является конфигурация с $M = 1$ группой, отмечены светлыми вертикальными областями на рис. 6, а значения CTC , при которых оптимальна конфигурация с $M = N$ группами — темными. Так, например, для интенсивности $\lambda = 10 \text{ с}^{-1}$ минимумы средней задержки достигаются при $M = N$ для $CTC \leq 0,1$ и при $M = 1$ для $CTC > 0,1$. Конфигурация PRAW $(M, W_0, T_{slot}) = (N, 1, T_s)$ обеспечивает минимальное энергопотребление в расчете на переданный пакет и может, в зависимости от CTC и λ , обеспечивать минимальную среднюю задержку. Если при этом конфигурация $(N, 1, T_s)$ при некоторой интенсивности λ удовлетворяет ограничениям на обе метрики производительности, то при дальнейшем увеличении интенсивности рост соответствующих кривых зависит только от ограничений на среднюю задержку и не зависит от ограничений на среднее энергопотребление (слияние кривых для $D^{lim} = 50$ мс на рис. 6). Отметим также, что минимумы CTC для $N = 24$ станций в случаях, когда интенсивность генерации пакетов принимает средние и высокие значения ($\lambda \geq 1 \text{ с}^{-1}$), оказываются примерно в два раза больше, чем минимумы для $N = 12$ станций, что позволяет сделать вывод о том, что входной параметр N линейно влияет на CTC^{min} .

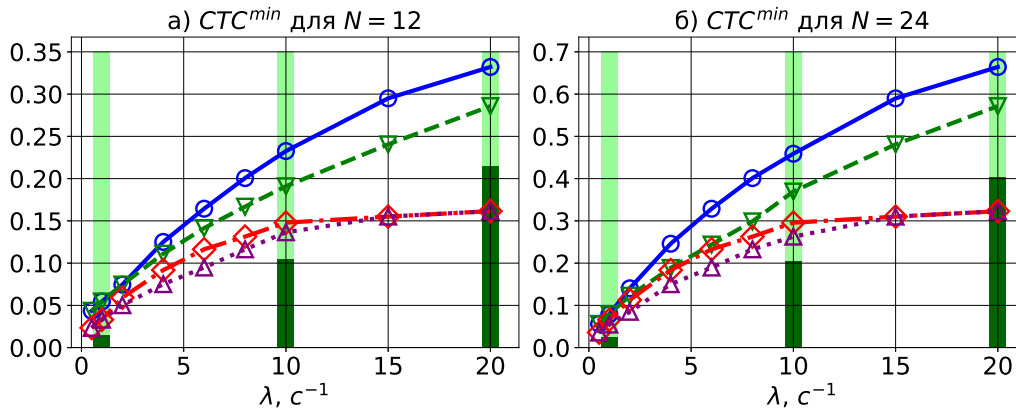
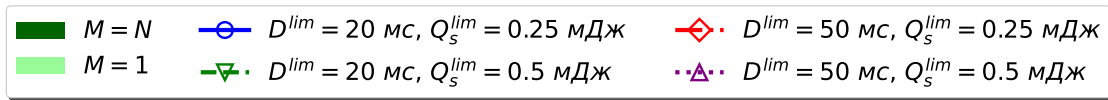


Рис. 6. Зависимости минимумов CTC , удовлетворяющих ограничениям на среднюю задержку и среднее энергопотребление в расчете на переданный пакет, от интенсивности λ для а) $N = 12$ станций и б) $N = 24$ станций.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был исследован механизм периодического окна ограниченного доступа PRAW, позволяющий удовлетворить требованиям к качеству обслуживания приложений Интернета вещей. Аналитическая модель из [23], модифицированная для более точной оценки вероятности генерации новых пакетов, использована для нахождения оптимальных параметров PRAW, соответствующих минимумам средней задержки или среднего энергопотребления в расчете на переданный пакет, и минимальных значений доли потребляемого механизмом PRAW канального времени, при которых выполняются заданные ограничения на среднюю задержку и среднее энергопотребление.

Анализ решения оптимизационных задач позволил дать следующие рекомендации по выбору числа групп M , минимального размера конкурентного окна W_0 и длительности RAW-слота T_{slot} . При выделении механизму PRAW малой доли канальных ресурсов CTC минимумы средней задержки достигаются при конфигурации PRAW $(M, W_0, T_{slot}) = (N, 1, T_{slot})$, оптимальной для высоких интенсивностей ($\lambda > 1 \text{ с}^{-1}$), или конфигурации PRAW $(M, W_0, T_{slot}) = (1, W_0, T_{slot})$ с длинным RAW-слотом, вмещающим несколько попыток передачи пакета, оптимальной для средних и низких интенсивностей ($\lambda \leq 1 \text{ с}^{-1}$). С ослаблением ограничения на CTC осуществляется переход с конфигурации $(N, 1, T_s)$ на конфигурацию $(1, W_0, T_{slot})$ для высоких интенсивностей ($\lambda > 1 \text{ с}^{-1}$), а также уменьшается длительность RAW-слота при конфигурации $(1, W_0, T_{slot})$ для всех интенсивностей.

Меньшее энергопотребление в расчете на переданный пакет достигается при наибольшем M , удовлетворяющем ограничению на среднюю задержку, поскольку в этом случае наибольшее количество станций уходит в спящий режим и экономит энергию во время чужих RAW-слотов, а внутри каждого из RAW-слотов снижается конкуренция за доступ к каналу и пакеты передаются энергоэффективнее.

Минимальная доля канальных ресурсов CTC^{min} , необходимых механизму PRAW для выполнения требований по задержке и энергопотреблению в расчете на переданный пакет, увеличивается с ростом интенсивности. Однако при достаточно высоких значениях интенсивности конфигурация $(N, 1, T_s)$, обеспечивающая минимальное энергопотребление, также соот-

ветствует минимумам средней задержки, поэтому при высоких интенсивностях ограничения на энергопотребление не влияют на нахождение CTC^{min} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bel A., Adame T., Bellalta B. An Energy Consumption Model for IEEE 802.11ah WLANs. *Ad Hoc Networks Elsevier*, 2018, Vol. 72, P. 14–26.
2. Ali M.Z., Mišić J., Mišić V.B. Efficiency of Restricted Access Window Scheme of IEEE 802.11 ah Under Non-Ideal Channel Condition. *2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*. Halifax: IEEE, 2018, P. 251–256.
3. Ali M.Z., Mišić J., Mišić V.B. Performance Evaluation of Heterogeneous IoT Nodes with Differentiated QoS in IEEE 802.11 ah RAW Mechanism. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68, no. 4, P. 3905–3918.
4. Wang Y., Chai K.K., Chen Y., Schormans J., Loo J. Energy-Aware Restricted Access Window Control with Retransmission Scheme for IEEE 802.11 ah (Wi-Fi HaLow) Based Networks. *2017 13th Annual Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*. Jackson: IEEE, 2017, P. 69–76.
5. Kureev A., Bankov D., Khorov E., 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, P. 1–5.
6. Bankov D., Khorov E., Kureev A., Lyakhov A. Improving Efficiency of Heterogeneous Wi-Fi Networks with Energy-Limited Devices. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 16th International Conference, NEW2AN 2016, and 9th Conference, ruSMART 2016*. St. Petersburg: 2016, P. 181–192.
7. Khorov E., Lyakhov A., Yusupov R. Two-Slot Based Model of the IEEE 802.11 ah Restricted Access Window with Enabled Transmissions Crossing Slot Boundaries. *2018 IEEE 19th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Chania: IEEE, 2018, P. 1–9.
8. Taramit H., Barbosa L.O., Haqiq A. Energy Efficiency Framework for Time-limited Contention in the IEEE 802.11ah Standard. *2021 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Madrid: IEEE, 2021, P. 1–6.
9. Taramit H., Camacho-Escoto J.J., Gomez J., Barbosa L.O., Haqiq A. Accurate Analytical Model and Evaluation of Wi-Fi Halow Based IoT Networks under a Rayleigh-Fading Channel with Capture. *MDPI Mathematics*, 2022, Vol. 10, no. 6, P. 952.
10. Taramit H., Barbosa L.O., Haqiq A. A Renewal Theory Based Performance and Configuration Framework of the IEEE 802.11ah RAW Mechanism. *Digital Communications and Networks Elsevier*, 2023, Vol. 9, no. 1, P. 236–251.
11. Taramit H., Barbosa L.O., Haqiq A., Escoto J.J.C., Gomez J. Load-Aware Channel Allocation for IEEE 802.11ah-Based Networks. *IEEE Access*, 2023, Vol. 11, P. 24484–24496.
12. Ляхов А., Наседкин И., Хоров Е., Юсупов Р. Доставка оповещения о чрезвычайной ситуации в гетерогенной сети Wi-Fi HaLow. *Информационные процессы*, 2019, Vol. 19, no. 3, P. 238–248.
13. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A. Modelling Machine Type Communication in IEEE 802.11 ah Networks. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*. London: IEEE, 2015, P. 1149–1154.
14. Khorov E., Krotov A., Lyakhov A., Yusupov R., Condoluci M., Dohler M., Akyildiz I. Enabling the Internet of Things with Wi-Fi HaLow — Performance Evaluation of the Restricted Access Window. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, P. 127402–127415.

15. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., Famaey J. Resource Allocation for Machine-Type Communication of Energy-Harvesting Devices in Wi-Fi HaLow Networks. *Sensors*, 2020, Vol. 20, no. 9, P. 2449.
16. Zheng L., Ni M., Cai L., Pan J., Ghosh C., Doppler K. Performance Analysis of Group-Synchronized DCF for Dense IEEE 802.11 Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, Vol. 13, no. 11, P. 6180–6192.
17. Hazmi A., Badihi B., Larmo A., Torsner J., Valkama M., et al. Performance Analysis of IoT-Enabling IEEE 802.11 ah Technology and its RAW Mechanism with Non-Cross Slot Boundary Holding Schemes. *2015 IEEE 16th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Boston: IEEE, 2015, P. 1–6.
18. Mahesh M., Harigovindan V.P. Restricted Access Window-Based Novel Service Differentiation Scheme for Group-Synchronized DCF. *IEEE Communications Letters*, 2019, Vol. 23, no. 5, P. 900–903.
19. Pavan B.S., Mahesh M., Harigovindan V.P. Performance Anomaly of Group-Synchronized Distributed Coordination Function in IEEE 802.11ah Based Multi-Rate IoT Networks. *2020 5th International conference on computing, communication and security (ICCCS)*. Shanghai: IEEE, 2020, P. 1–5.
20. Khorov E., Lyakhov A., Nasedkin I., Yusupov R., Famaey J., and Akyildiz I.F. Fast and Reliable Alert Delivery in Mission-Critical Wi-Fi HaLow Sensor Networks. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, P. 14302–14313.
21. Khorov E., Lyakhov A., Nasedkin I., Yusupov R. Poster: Fast and Reliable Alert Delivery in Wi-Fi HaLow Sensor Networks. *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*. Warsaw: IEEE, 2019, P. 1–2.
22. Zazhigina E., Yusupov R., Khorov E., Lyakhov A. Analytical Study of Periodic Restricted Access Window Mechanism for Short Slots. *MDPI Electronics*, 2021, Vol. 10, no. 5, P. 549.
23. Кротов А., Хоров Е. Передача данных межмашинного взаимодействия в сетях Wi-Fi HaLow. *Сборник трудов 40-й школы-конференции ИППИ РАН, 2016*. Репино: ИППИ РАН, 2016.
24. Tian L., Khorov E., Latré S., Famaey J. Real-Time Station Grouping Under Dynamic Traffic for IEEE 802.11 ah. *MDPI Sensors*, 2017, Vol. 17, no. 7, P. 1559.
25. Liu Z., Lv P. Ro-RAW: Run-Time Restricted Access Window Optimization in IEEE 802.11ah Network with Extended Kalman Filter. *Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi Limited*, 2020, Vol. 2020, P. 1–10.
26. Cheng Y., Zhou H., Yang D. Ca-CWA: Channel-Aware Contention Window Adaption in IEEE 802.11 ah for Soft Real-Time Industrial Applications. *MDPI Sensors*, 2019, Vol. 19, no. 13, P. 3002.
27. Dong M., Wu Z. Gao X., Zhao H. An Efficient Spatial Group Restricted Access Window Scheme for IEEE 802.11ah Networks. *2016 sixth international conference on information science and technology (ICIST)*. Dalian: IEEE, 2016, P. 168–173.
28. Yoon S.G., Seo J., Bahk S. Regrouping Algorithm to Alleviate the Hidden Node Problem in 802.11ah Networks. *Computer Networks Elsevier*, 2016, Vol. 105, P. 22–32.
29. Ghasemahmadi M., Li Y., Cai L. RSS-Based Grouping Strategy for Avoiding Hidden Terminals with GS-DCF MAC Protocol. *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. San Francisco: IEEE, 2017, P. 1–6.
30. Shimokawa M., Sanada K., Hatano H., Mori K. Station Grouping Method for Non-Uniform Station Distribution in IEEE 802.11ah Based IoT Networks. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. Virtual: IEEE, 2020, P. 1–5.
31. Nishida R., Shimokawa M., Sanada K., Hatano H., Mori K. A Station Grouping Method for IEEE 802.11ah Networks with Various Types of Network Non-Uniformity. *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, 2023, Vol. 14, no. 1, P. 35–49.
32. Harrod W.J., Plemmons R.J. Comparison of Some Direct Methods for Computing Stationary Distributions of Markov Chains. *SIAM journal on scientific and statistical computing*, 1984, Vol. 5, no. 2, P. 453–469.

33. Little J.D.C. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *INFORMS Operations research*, 1961, Vol. 9, no. 3, P. 383–387.
34. Vishnevsky V., Lyakhov A. IEEE 802.11 Wireless LAN: Saturation Throughput Analysis with Seizing Effect Consideration. *Cluster Computing*, 2002, Vol. 5, no. 2, P. 133–144.
35. Bianchi G. 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.
36. *IEEE 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 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation*, 2017.
37. Ba A., Salimi K., Mateman P., Boer P., van den Heuvel J., Gloudemans J., Dijkhuis J., Ding M., Liu Y.H., Bachmann C., et al. A 4mW-RX 7mW-TX IEEE 802.11ah Fully-Integrated RF Transceiver. *2017 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*. Honolulu: IEEE, 2017, P. 232–235.

Performance Study of the PRAW Mechanism with Slots of Arbitrary Duration in Wi-Fi HaLow Networks

Shlapak M.V., Yusupov R.R., Lyakhov A.I.

The rapid growth in the number of smart devices capable of exchanging data within a single network leads to the emergence of mechanisms that allow adapting data transmission technologies to the Internet of Things networks. One of them is the mechanism of the Periodic Restricted Access Window (PRAW) presented in the 802.11ah standard. A competent choice of parameters of the PRAW mechanism allows a large number of sensors to transmit data quickly and energy-efficiently, but the 802.11ah standard itself does not give recommendations on their choice. This article solves the following optimization problems: minimizing (A) the average delay, (B) the average energy consumption per transmitted packet when the average delay limit is met, and (C) the share of channel time consumption by the PRAW mechanism when the restrictions on both metrics are met. Based on the results of solving these problems, we give recommendations on the choice of PRAW parameters for different network loads determined by the intensity of packet generation and the number of stations.

KEYWORDS: IEEE 802.11ah, Wi-Fi HaLow, Internet of Things, RAW, analytical model, delay, energy consumption, optimization.