МЕХАНИЗМ МУЛЬТИОПРОСА НА ОСНОВЕ ПРИОРИТИЗАЦИИ ДЛЯ WLAN С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ УСТРОЙСТВ

Ч.Д. Ле[1], О.А. Симонина[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация
Адрес для переписки: olga.simonina@spbgut.ru

Информация о статье
УДК 621.396
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Симонина О.А., Ле Ч.Д. Механизм мультиопроса на основе приоритизации для WLAN с высокой плотностью устройств // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 80-92.

Аннотация: *Статья посвящена вопросу повышения качества обслуживания в высокозагруженных мультисервисных сетях Wi-Fi. Предлагается модифицировать метод мультиопроса с учетом требований к трафику по критерию минимизации задержки. Для этого предлагается модифицировать механизм опроса и переложить вопросы конкуренции со станций на точки доступа. Также предлагается модифицировать стандартизированные форматы PLU и PLUR-кадров, переопределяя резервные поля для поддержки работы предлагаемого механизма.*

Ключевые слова: *Wi-Fi, мультиопрос, качество обслуживания, PCF, DCF.*

THE MULTIPOLLING MECHANISM BASED ON THE PRIORITIZATION FOR WLAN IN A HIGH DENSE NETWORKS

Le Tran Duc[1], O.A. Simonina[1]

[1]The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info
Article in Russian

For citation: Le Tran Duc, Simonina O. The Multipolling mechanism based on the prioritization for WLAN in a high dense networks // Proceedings of educational institutes of communication. 2017. Vol. 3. Iss. 1. PP. 80-92.

Abstract: *This article is devoted to improving the quality of service in multiservice high-density Wi-Fi networks. It is proposed to modify the multipolling mechanism given the traffic requirements and minimizing delays. For this purpose it is proposed to modify the polling mechanism and to shift the competition from the stations to the access point. It is also proposed to modify standardized formats PLU and PLUR frames, overriding the backing field to support the work of the proposed mechanism.*

Keywords: *Wi-Fi, Multipolling Mechanism QoS, PCF, DCF.*

Введение

Сети на основе семейства стандартов IEEE 802.11 не только доминируют на рынке сетей беспроводного доступа, но и, по прогнозам [1], эта тенденция сохранится в ближайшие несколько лет несмотря на активное развитие мобильной передачи данных (рис. 1). Это не удивительно, так как сети Wi-Fi обладают рядом неоспоримых достоинств: недороги, используют нелицензируемый диапазон, гибки в конфигурации, позволяют проводить процедуры авторизации пользователей и устройств, совместимы с Ethernet и стеком протоколов TCP/IP, обладают хорошей пропускной способностью. Все это обусловило широкое применение Wi-Fi в домашних, корпоративных и сетях доступа в общественных местах. При этом сети Wi-Fi не являются мультисервисными в полном смысле – скорее, это сеть передачи данных с пропускной способностью, позволяющей передавать большие объемы трафика, в том числе видео. Для малозагруженных сетей подход на основе best effort вполне объясним, но в сетях с высокой плотностью узлов он порождает ряд проблем.

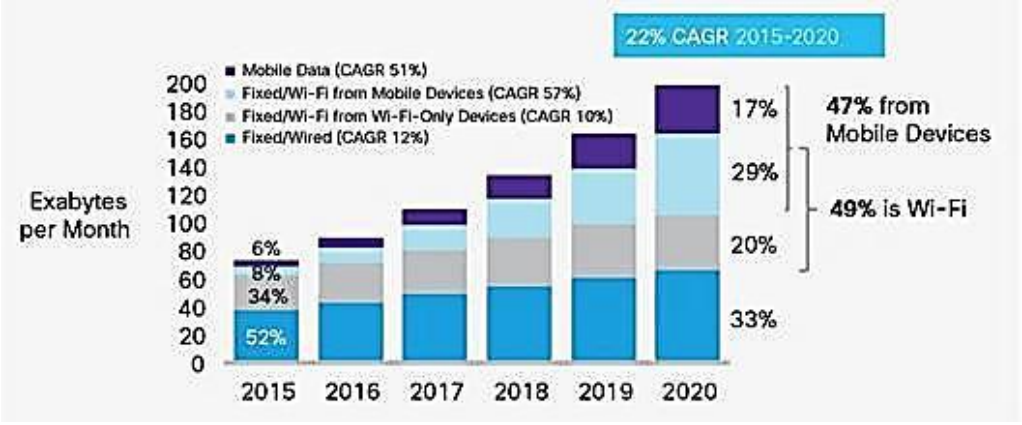

Рисунок 1. Прогноз увеличения количества IP-трафика, создаваемого различными сетями доступа, согласно Cisco VNI [1]

Стандарт IEEE 802.11 [2] определяет два режима работы: DCF (Distributed Coordination Function) и PCF (Point Coordination Function). Режим PCF используется в период без конкуренции CFP (Contention-Free Period). За счет сокращения затрат времени на конкуренцию PCF может поддерживать приложения с требования по минимизации задержки. Однако механизм PCF не может в полной мере обеспечивать передачу мультимедийного трафика с заданным качеством [3-5].

Сейчас для поддержки мультисервисности предлагается несколько решений. Стандартизированные закреплены в рекомендации IEEE 802.11e [2] и реализованы за счет различения классов трафика и выстраивания системы приоритетов для каждого из них. Однако в IEEE 802.11e существует проблема с обеспечением передачи трафика с переменной скоростью VBR (Variable Bit Rate),

когда мгновенная скорость передачи и размер пакета, как правило, довольно сильно отличаются от соответствующих средних значений [3].

В направлении разработки механизмов обработки мультисервисного трафика в сетях Wi-Fi уже давно работают многие коллективы авторов. Большинство этих механизмов представляют собой модификации PCF или HCCA (HCF (Hybrid Coordination Function) Controlled Channel Access) и сосредоточены на следующих ключевых проблемах:

– создание списка опроса;
– управление списком опроса;
– определение последовательности опроса;
– уменьшение времени, затраченного на неудачные попытки опроса (PO – Polling overhead) – в дальнейшем будем это называть расходом опроса.

Например, в работе [4] авторы предложили использовать два кадра мульти-опроса с разными целями. Первый кадр передается с целью сбора информации со станции (STA). Второй кадр, сконструированный на основе собранной информации, содержит последовательность опроса для передачи данных. Тем не менее, этот механизм имеет довольно много недостатков. Например, авторы не рассматривали проблему коллизий, которые могут возникнуть из-за проблемы скрытого узла во время сбора информации и в процедуре передачи данных. Кроме того, не указаны порядок сбора информации и опроса станций (STAs), таким образом, если кадр опроса поврежден, то может появиться сбой в работе всех STAs.

В статье [6] авторы предложили модифицированный PCF, который улучшает использование среды. Основная цель этого механизма заключается в уменьшении влияния проблемы скрытого узла с помощью счетчика столкновений. Механизм UPCF (Unified Point Coordination Function) в работе [3] является одним из механизмов мультиопроса, использующих приоритет для пропуска трафика различных типов в соответствии с требованиями QoS (Quality of Service). Он поддерживает возможность обслуживания VBR-трафика с использованием соответствующих значений TXOP (Transmit Opportunity). UPCF использует технику подтверждения установления связи (*handshaking*) для реализации приоритетов трафика в период CFP. В работе [7] предложен другой механизм мультиопроса: каждая станция передает только тогда, когда она получает конкретное количество простых сообщений опроса, при необходимости с вложенным кадром подтверждения.

Большинство работ в области управления качеством в сетях Wi-Fi опубликованы в прошлом десятилетии. Однако с переходом на сети с высокой плотностью устройств возникла необходимость пересмотреть используемые механизмы. Появление новых исследований и проектов (исследуемых, например, в [8, 9]) позволяет сделать вывод о необходимости пересмотра подходов к обеспечению качества в сетях Wi-Fi.

Механизм мультиопроса на основе групп

В [10, 11] предложено объединить режимы доступа PCF и DCF для назначения права доступа к среде точкам доступа (APs) и станциям. Основная идея заключалась в разделении механизма приоритизации APs на два:

– PCF_in, выполняемый для одной AP и предназначенный для выдачи права доступа к среде STA, а также обеспечивающий передачу данных;

– DCF_out, выполняемый на основе модифицированного списка опроса для обеспечения конкуренции точек доступа за право доступа к среде.

Для разграничения прав доступа к среде было предложено ввести группы приоритета m исходя из требуемых значений задержки (табл. 1). Пусть d – максимально допустимое значение задержки, тогда чем меньше d, тем выше в списке находится тип трафика. В случае, если значения d для разных потоков равны, то они помещаются в одну группу m, где m – приоритет группы, m = 1, 2, 3,…, N. Таким образом, чем выше требования к задержке, тем выше приоритет группы m. При этом количество групп определяется исключительно количеством граничных требований по задержке, а не только типом трафика.

Таблица 1. Пример приоритизации трафика в зависимости от требований к задержке

Тип трафика	**Категория доступа**	**Приоритет группы *m***	**Допустимое значение межконцевой задержки *d*, мс**
Voice	AC_VO	1	<50
Video	AC_VI	2	50 – 250
Best Effort	AC_BE	3	250 – 400
Background	AC_BK	4	Не нормировано

Обозначим как k количество станций в одной группе m. Значение k используется для конкуренции в DCF_out и рассматривается как один из параметров для обеспечения QoS. Например, если две STA обслуживают трафик, принадлежащий одной группе, то в списке доступа они располагаются с приоритетом по времени подключения. Таким образом, происходит перенос конкуренции с STA на AP. В случае незанятой среды AP продолжают ждать в течение времени:

$$ODIFS(m) = m_{min} \times slot_{times},$$

где m_{min} – наименьшее значение m в списке опроса, *slot_times* = 9 или 20 мс в зависимости от реализации, что позволит передавать высокочувствительный к задержкам трафик раньше.

В работе [10] рассмотрен случай, когда несколько точек доступа имеют одинаковое значение m, т. е. конкурируют за доступ к среде, что не исключает возможность возникновения коллизии. В этой статье предположено, что всегда

имеется AP, которая выигрывает конкуренцию на право доступа к среде. Кроме того, предлагается добавить передачу по нисходящей линии (downlink) к механизму, предложенному в [10]. Осуществление передачи «вниз» также должно следовать схеме приоритетов: кадр, полученный AP, вставляется в буфер в соответствии с назначенным приоритетом. Таким образом, кадры с более высоким приоритетом окажутся ближе к началу буфера, за счет чего появляется возможность уменьшить значение задержки для высокоприоритетного трафика. Если продолжительность периода недостаточна для передачи всех кадров, то оставшиеся кадры будут переданы в следующем периоде первоочередно. Под периодом подразумевается время от начала CP (Contention Period) предыдущего интервала обслуживания (SI – Service Interval) до конца CFP текущего интервала обслуживания. После передачи кадров AP будет сохранять управление средой и продолжать мультиопрос в режиме PCF_in (рис. 2).

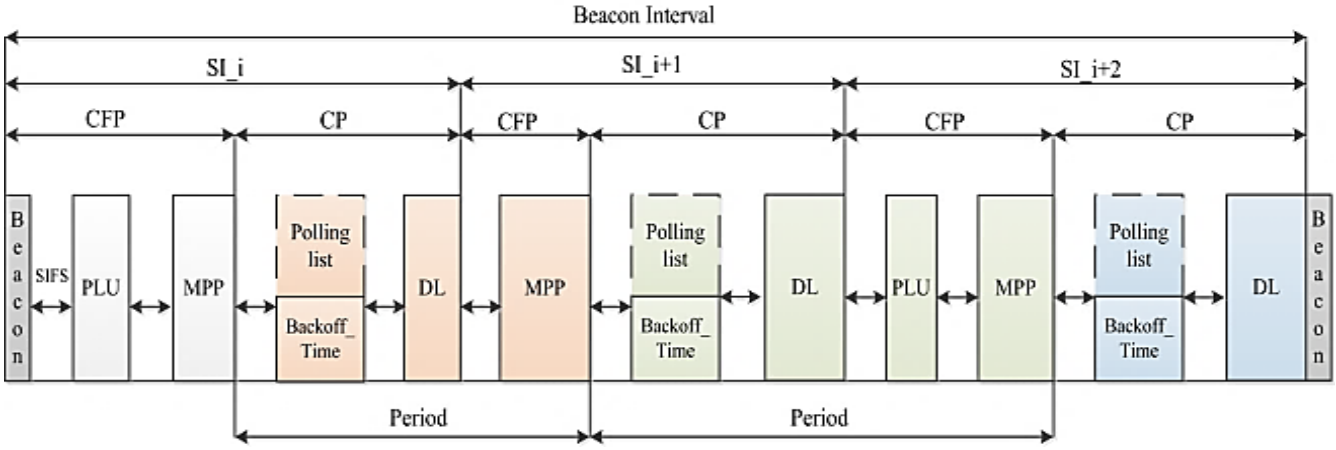

Рисунок 2. Интервал между посылками маячка в механизме мультиопроса

Реализация механизма мультиопроса при передаче «вниз»

После DCF_out точка доступа контролирует среду и при необходимости продолжает передачу «вниз», после которой будет ждать в течение SIFS. По истечении SIFS запускается два процесса длительностью PLU (период обновления списка опроса – Polling List Update period) и MPP (период мультиопроса по приоритету – Multi-Polling-Prioritized period). В течение PLU точка доступа обновляет список опроса в заданном порядке для избегания коллизий. Во время MPP точка доступа опрашивает все STAs группы m в списке опроса (см. рис. 2).

Период PLU задает процесс обновления/удаления STAs в списке опроса, который будет использоваться в следующем периоде механизмом DCF_out для конкуренции за право доступа к среде. Следует отметить, что в каждом MPP-периоде только станции, принадлежащие группе m с наивысшим приоритетом, могут выполнить передачу. Если в списке опроса появляются новые станции, которые принадлежат к высокоприоритетным группам m, то уже подключенные станции в низкоприоритетных группах m могут потерять доступ к среде.

Во избежание этого PLU-период реализуется только если текущая группа m является самой большой группой в списке опроса, что также позволит уменьшить время, затраченное на неудачные попытки опроса (PO – Polling overhead). Например, AP_1 имеет 4 группы m = 1, 2, 3, 4 и AP_2 – 2 группы m = 1, 3. Таким образом, AP_1 будут обновлять список опроса в период, когда текущая группа m = 4 и AP_2 – когда текущая группа m = 3.

PLU-процесс происходит следующим образом: за интервал SIFS после Beacon-кадра (или после CP-периода), AP будет посылать PLU-кадр всем STAs. Станции отвечают PLUR-кадрами (Polling List Update Response frames), которые содержат необходимую информацию для создания точкой доступа нового списка опроса и выполнения необходимых расчетов для нового MPP-периода. На рис. 3 и 4 представлены форматы PLU и PLUR-кадров, используемых в предлагаемом механизме мультиопроса.

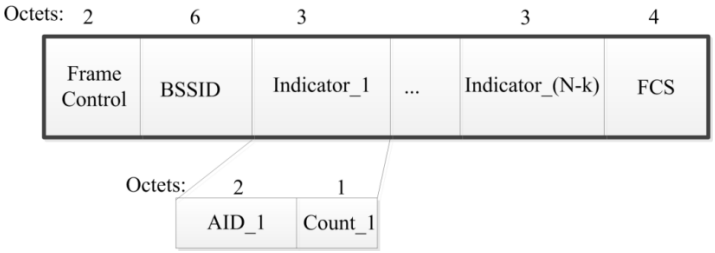

Рисунок 3. Формат PLU-кадра

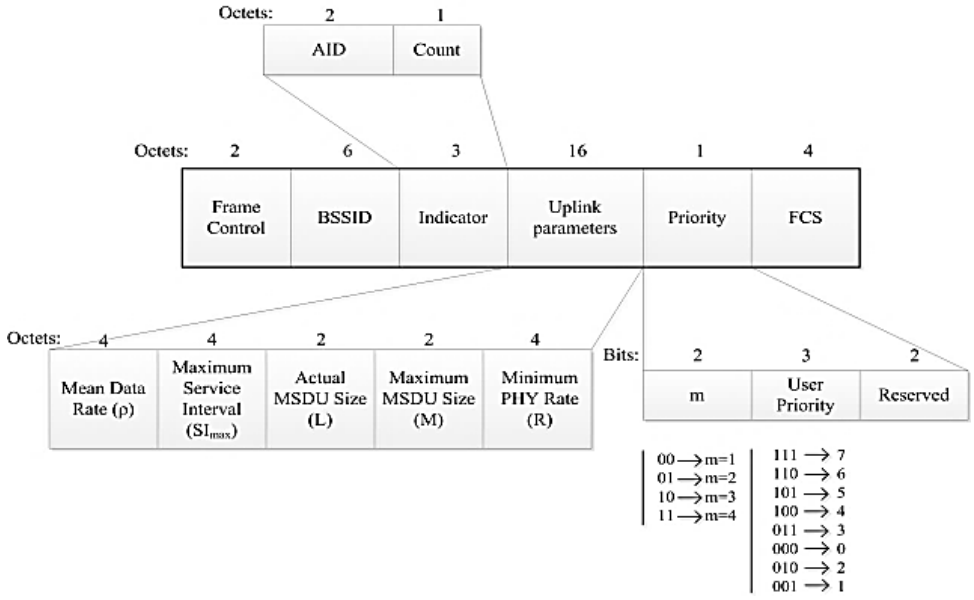

Рисунок 4. Формат PLUR-кадра

Длина PLU-кадра изменяется в зависимости от количества STAs, принадлежащих к этому BSS. На рис. 3 поле *Indicator* состоит из подполя *AID* (Association Identifier), которое идентифицирует станцию в BSS и подполя *Count*, которое имеет значения от 0 до (N–k–1). Здесь k – это число станций в

самой большой группе *m, N* – число STAs в BSS. Подполе *Count* используется для определения порядка обновления/опроса, уменьшения потерь кадров и решения проблемы скрытого узла. *BSSID* – идентификатор BSS, FCS – последовательность контрольных битов кадра.

На рис. 4 поле *Uplink parameters* содержит информацию, необходимую для расчета TXOP аналогично TSPEC IEEE 802.11e. Поле *Priority* состоит из трех подполей: *m, User priority* (приоритет пользователя) и *Reserved* (резервный). Подполе *m* указывает приоритет трафика, т. е. группу *m* станции в новом списке опроса. Подполе *User priority* может использоваться для поддержки QoS в других решениях, например, классификации и контроля трафика на OpenFlow-коммутаторах с использованием технологии SDN. Подполе *Reserved* зарезервировано для будущего пользования.

Переопределим поле *Frame Control* в IEEE 802.11-2012, так как согласно стандарту это поле не используется для поддержки мультиопроса. Для этого используем зарезервированные байты (определяющие тип и подтип) в поле *Frame Control* (b3 b2, b7-b4). Подобный подход уже встречался в научных работах, например, в [7]. Переопределённое поле *Frame Control* будет содержать новые параметры (табл. 2), при этом ACK-G в будущем можно использовать для снижения расходов кадров ACK.

Таблица 2. Описание переопределённых кадров поля *Frame Control*

Значение типа *b3 b2*	**Описание типа**	**Значение подтипа *b7 b6 b5 b4***	**Описание подтипа**
11	Мультиопрос	0000-1011	*Reserved* (резервный)
11	Мультиопрос	1100	*ACK-G*
11	Мультиопрос	1101	*MPP*
11	Мультиопрос	1110	*PLUR*
11	Мультиопрос	1111	*PLU*

Для решения проблемы скрытого узла в результате повреждения или запаздывания пакетов обновления информации о статусе STA будем использовать подполе *Count* в PLU-кадре. Значения *Count* (от 0 до $N–k–1$) будут назначены станциям в строго обозначенном порядке:

$STA_1 \in Count_1 = 0$,

$STA_2 \in Count_2 = 1$,

…

$STA_{N-k} \in Count_{N-k} = N\text{-}k\text{-}1$).

При получении станцией PLU-кадра происходит запоминание значения *Count* и реализуется следующий алгоритм:

если $Count_i = 0$, то STA_i отправляет PLUR-кадр к AP;

если $Count_i \neq 0$, то STA_i продолжает наблюдать среду.

Если STA_i слышит пакеты из STA_{i-1}, то STA_i уменьшит свое значение Count до 0 и начинет передавать $PLUR_i$-кадр. Тем не менее, возможна ситуация, когда STA_i не может слышать пакеты из STA_{i-1}, так как они являются скрытыми узлами относительно друг от друга, или передача $PLUR_i$ не удалась. Чтобы устранить эту проблему, точка доступа использует механизм rePLU.

Решение проблемы скрытых узлов в механизме мультиопроса при передаче «вниз»

Для решения проблемы скрытых узлов используем механизм rePLU. После получения сообщения $PLUR_i$ точка доступа будет продолжать ждать в течение MIFS > SIFS. При этом MIFS может быть реализован как PIFS, DIFS и т. п. Если AP еще не получила сообщение $PLUR_{i+1}$ от станции STA_{i+1}, то будет послан rePLU-кадр. Этот кадр похож на PLU-кадр, но содержит список неуспешных обновлений станций. Следует отметить, что значения *Count* будут снова назначаться от 0, т. е. STA_{i+1} присваивается $Count_{i+1} = 0$.

При повреждении PLU или $PLUR_1$-кадра PLU-период будет отсутствовать. Чтобы этого избежать, AP отслеживает кадры от STA_1, и если после *MIFS* нет сообщений от станции, то точка доступа должна отправить PLU-кадр заново. Повторная передача PLU-кадра возможна *r* раз, после чего AP удалит STA_1 из списка и будет начинать с STA_2 и т.д.

На рис. 5 представлены временные диаграммы без и с использованием rePLU-механизма. В случае b) приведен пример работы rePLU-механизма после того, как STA_3 не услышала $PLUR_2$. После получения $PLUR_2$ и ожидания в течение интервала MIFS точка доступа пошлет rePLU-кадр, который содержит информацию для остальных станций с измененными значениями *Count* ($Count_3 = 0$, $Count_4 = 1$ и т. д.).

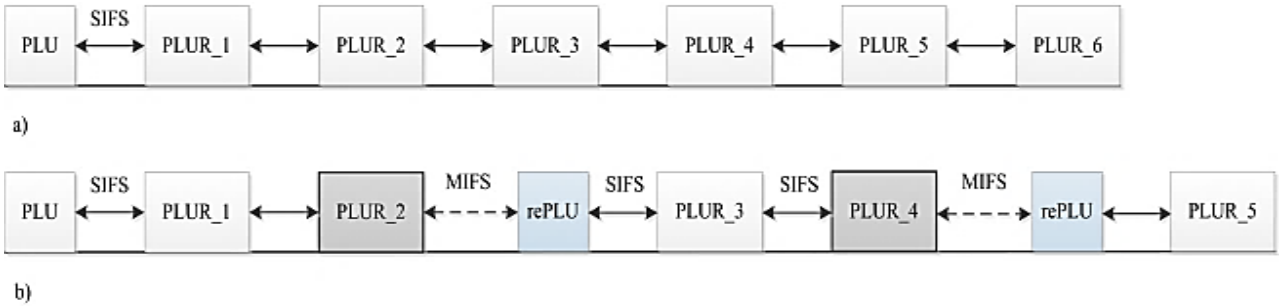

Рисунок 5. Использование rePLU-механизма

Реализация механизма мультиопроса при передаче «вверх»

Введем механизм мультиопроса в процесс передачи «вверх» (*uplink*), используя MPP-кадр для опроса станций в текущей группе *m*. На рис. 6 представлен формат MPP-кадра. Поле *Multipoll* соответствует каждой из опрошенных STA и состоит из трех подполей: уже упоминаемые ранее при обсуждении формата PLU-кадра *AID* и *Count*, а также новое *TXOP*, которое указывает назначенное значение TXOP станции для передачи данных. Значение TXOP

рассчитывается на основе значений поля *Uplink parameters*, которые собраны за PLU-период, что поможет преодолеть некоторые ограничения в поддержке VBR-трафика [3, 12]. Так как количество опрошенных станций – это число станций в текущей приоритетной группе *m*, которое в соответствии с алгоритмом работы DCF_out, то оно будет равно *k*. Таким образом, поле *Count* может принимать значения от 0 до (*k*-1).

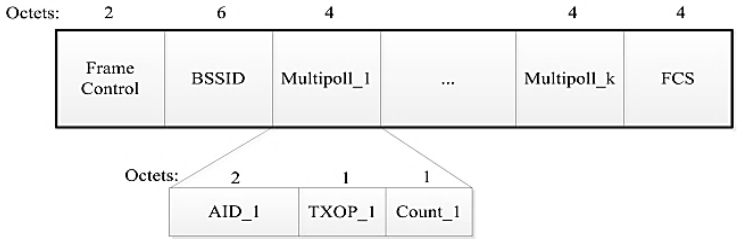

Рисунок 6. Формат MPP-кадра

После окончания PLU-периода точка доступа по истечении SIFS посылает MPP-кадр для опроса всех STAs в группе *m*, тогда для STA_k верно $Count_k = k–1$. Станции, получившие MPP-кадр, будут использовать соответствующее значение *Count* для определения порядка передачи. Точки доступа подтверждают успешную передачу с помощью сообщения ACK, содержащего информацию *Count* от станции-источника.

При получении станцией STA_j сообщения ACK_i от станции STA_i реализуется следующий алгоритм:

если $Count_j – Count_i = 1$, то *Count* (STA_j) = 0 и происходит передача кадра по истечению периода *SIFS*;

если $Count_j – Count_i \neq 1$, то STA_j остается в режиме ожидания.

Решение проблемы скрытых узлов в механизме мультиопроса при передаче «вверх»

В данном случае проблема скрытого узла может быть решена с использованием сообщений ACK. Каждое ACK от AP может быть услышано всеми STAs этой AP. Пусть STA_j не слышит пакеты STA_i из-за проблемы скрытого узла. Тогда STA_j может слышать ACK_i, которое AP отправляет STA_i. При этом вероятность, что две STAs не могут слышать друг друга из-за скрытого узла будет выше, чем вероятность потери ACK. Так как сообщение ACK тоже может быть потеряно, используем reMPP-механизм, аналогичный rePLU-механизму.

Предположим, что AP не получала кадры станции STA_i ($TXOP_i$) из-за ошибки $TXOP_i$ или из-за потери ACK_{i-1}. В этом случае после отправки ACK_{i-1} AP будет ждать временной интервал MIFS > SIFS. Если AP не получит кадры из STA_i, то пошлет reMPP-кадр, который содержит список неудачно опрошенных станций (рис. 7).

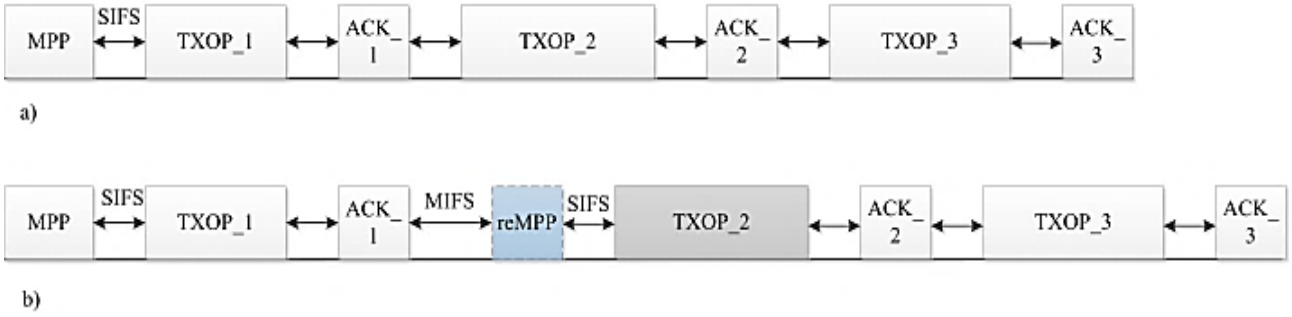

Рисунок 7. Использование reMPP-механизма

В примере (рис. 7) вариант a) отражает ожидаемый алгоритм реализации MPP-периода без проблем. В случае b) AP не может получить $TXOP_2$ из-за ошибки или потери ACK_1. Сообщение reMPP может быть передано r раз, как и в rePLU-механизме. Кроме того, поскольку длительность MPP-периода ограничена, то после превышения допустимой длительности, STAs, которые не успели передать данные, будут перенесены на следующий период и расположены в начале списка опроса.

Сравнение расходов опроса различных механизмов

Для оценки эффективности предлагаемого механизма с существующими используем такой показатель как время, затраченное на неудачные попытки опроса (PO – Polling overhead), или расход опроса.

Для PCF в IEEE 802.11:

$$PO_{PCF} = pNT_{poll_{Fail}} + (1-p)NT_{poll},$$
$$T_{poll_Fail} = T_{poll} + SIFS + T_{Null} + SIFS,$$

где N – число STAs в BSS;

pN – количество STAs, на которых нет ожидающих данных, они будут отвечать нулевыми пакетами (*Null*);

T_{poll_Fail} – время ответа STA Null-пакетами;

T_{poll} и T_{Null} – время отправки кадра опроса и Null-кадра соответственно;

(1-p)N – количество STAs, на которых есть данные для передачи.

Для предложенного механизма (далее – MMO) необходимо рассмотреть два случая:

1) Есть PLU-период – текущая группа m наибольшая, система должна обновить новый список опроса:

$$PO_{\text{MMO}} = T_{PLU} + (N-k)T_{PLUR} + 2(N-k)SIFS + T_{MPP} + 3SIFS.$$

2) Нет PLU-периода – текущая группа m не самая большая, система не должна обновить список опроса:

$$PO_{\text{MMO}} = 2SIFS + T_{MPP}, \quad T_{MPP} = \frac{12 + 4k}{phys.rate},$$

$$T_{PLU} = \frac{8[12 + 3(N - k)]}{phys.rate}, \quad T_{PLUR} = \frac{32.8}{phys.rate}, \quad k = (1 - p)N,$$

где $T_{MPP}, T_{PLU}, T_{PLUR}$ – время отправки MPP, PLU, PLUR-кадров соответственно;

k – число STAs в текущей группе m или количество активных STAs, которые не будут обновлены при создании нового списка опроса;

phys.rate – физическая скорость.

Аналогично рассчитаем расход опроса TS-MP-механизма [3]:

$$\text{PO}_{\text{TS-MP}} = \text{T}_{\text{SRMP}} + \text{kT}_{\text{SR}} + 2(\text{k} + 1)\text{SIFS} + \text{T}_{\text{DTMP}},$$

где $T_{SRMP}, T_{SR}, T_{DTMP}$ – время отправки SRMP, SR, DTMP-кадров соответственно.

В [9] авторы предложили механизм мульти-опроса RAL для решения проблемы скрытого узла, для которого:

$$PO_{RAL} = T_{RAL} + pNT_{poll_Fail},$$

$$T_{poll_Fail} = 2SIFS + T_{Null}.$$

В работе [2] предложен UPCF-механизм с приоритетам. Предположим, что существуют только 4 приоритета как в MMO, и опустим расчет времени процедуры разбиения дерева (*tree-splitting*), учтем время решения коллизии только для одной коллизии.

Тогда:

$$PO_{UPCF} = 4T_{PE_H} + 3PIFS + (k+1)T_{PR} + 2kSIFS + T_{RE} + hT_{RR} + (h + 1)SIFS + T_{V_{POLL}},$$

где $T_{PE_H}, T_{PR}, T_{RE}, T_{V_POLL}$ – время отправки PE_H, PR, RE, V-POLL-кадров соответственно;

$h = 0{,}5k$ – количество станций, которые подвергаются коллизии.

Следует отметить, так как авторы не указали значения T_{PE_H}, а функционально этот кадр похож на кадр опроса в PCF, то принято $T_{PE_H} = T_{poll}$. При этом полученная оценка расхода опроса данного механизма будет оптимистична из-за внесенных ограничений.

Некоторые параметры для стандарта IEEE 802.11g приняты по умолчанию (табл. 3).

Таблица 3. IEEE 802.11g: параметры по умолчанию

Параметр	Символ	Значение
Интервал SIFS	*SIFS*	10 μs
Интервал PIFS	*PIFS*	25 μs
Физическая скорость	*phys.rate*	54 Mbps
Размер CF-Poll	$Size_{poll}$	20 bytes
Размер ACK	$Size_{ACK}$	14 bytes
Размер Null-кадра	$Size_{Null}$	34 bytes
Время отправки кадра опроса	T_{poll}	$8x Size_{poll}/phys.rate$
Время отправки Null-кадра	T_{Null}	$8x Size_{Null}/phys.rate$
Время отправки Data	T_{Data}	$8x P_{size}/phys.rate$
Время отправки ACK	T_{ACK}	$8x Size_{ACK}/phys.rate$

На рис. 8 приведены результаты сравнительного анализа эффективности предлагаемого механизма с существующими. Здесь p – доля станций, отвечающих Null-пакетами; $T_1(n)$ – PCF в IEEE 802.11; $T_2(n)$ – MMO с PLU-периодом; $T_3(n)$ – MMO без PLU-периода; $T_4(n)$ – TS-MP [3]; $T_5(n)$ – RAL [9]; $T_6(n)$ – UPCF [2].

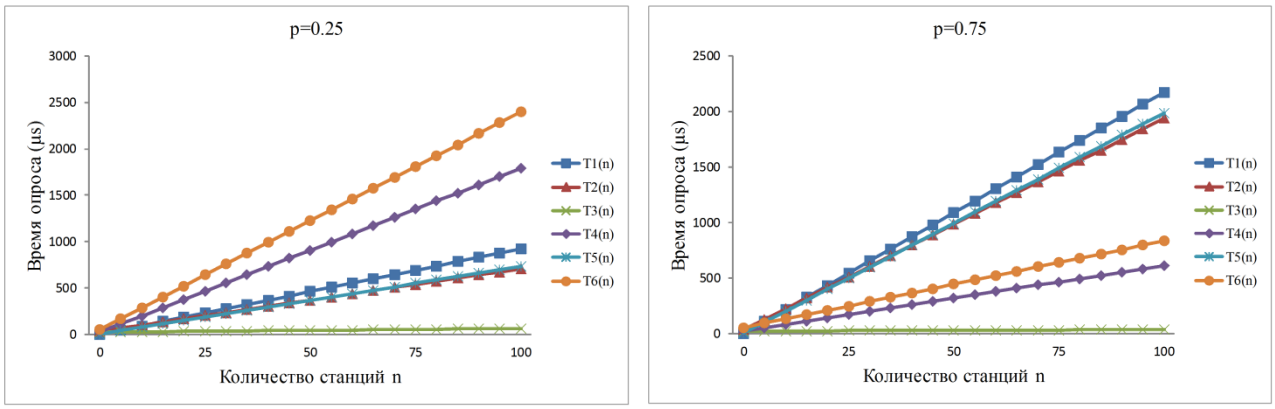

Рисунок 8. Результаты сравнительного анализа эффективности различных механизмов опроса

Легко видеть, что без использования PLU-периода расход опроса предлагаемого механизма – обозначен как $T_3(n)$ – всегда наименьший. Однако в периоде обновления списка опроса эффективность предлагаемого механизма снижается (обозначен как $T_2(n)$). При этом с ростом количества активных станций эффективность предлагаемого механизма наилучшая из всех рассмотренных. Также явно видны преимущества предлагаемого механизма в случае увеличения количества STAs в BSS, что важно при использовании во WLAN с высокой плотностью устройств.

Выводы

Предложенный механизм использует приоритезацию на двух этапах для повышения способности поддержки QoS в сетях с высокой плотностью точек доступа. На первом этапе приоритезация позволяет различить точки доступа по

различным группам *m* в соответствии с приоритетом трафика. На втором этапе точка доступа использует механизм мультиопроса для опроса станций в группе *m*. Основным нововведением является использование PLU-кадров для сбора информации от станций и обновления списка опроса, а также MPP-кадров для координации передачи данных без коллизий. Предложенный механизм позволяет точкам доступа планировать последовательность опроса, основываясь на информации, полученной от всех станций, что позволит в будущем разработать более эффективные схемы планирования.

В дальнейшем необходимо определить оптимальное значение TXOP, производительность системы и задержки для предлагаемого механизма.

Список используемых источников

1. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper. [Электронный ресурс] http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/ service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html.

2. Standards Committee et al. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service enhancements // IEEE Computer Society. 2005.

3. Chou Z.T., Hsu C.C., Hsu S.N. UPCF: a new point coordination function with QoS and power management for multimedia over wireless LANs // IEEE/ACM Transactions on Networking (TON). 2006. Vol. 14. Iss. 4. PP. 807-820.

4. Kim B.S. et al. Two-step multipolling MAC protocol for wireless LANs // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005. Vol. 23. Iss. 6. PP. 1276-1286.

5. Zhong Z. et al. Issues and challenges in dense WiFi networks // Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 International. IEEE. 2015. PP. 947-951.

6. Kanjanavapastit A., Landfeldt B. Enhancements of the modified PCF in IEEE 802.11 WLANs // Journal of Communications and Networks. 2005. Vol. 7. Iss. 3. PP. 313-324.

7. Fang Y. et al. On the performance enhancement of wireless lan-a multi-polling mechanism with hidden terminal solution // Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM'05. IEEE. 2005. Vol. 1. P. 5.

8. Красавина Т., Банков Д.В., Хоров Е.М. Исследование протокола распределенного управления процессом присоединения устройств при отсутствии помех в канале / Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (Москва). Конференция: Информационные технологии и системы. Сочи. 07-11 сентября 2015 г.

9. Perez S.C. et al. Tuning mechanism for IEEE 802.11 e EDCA optimization // IEEE Latin America Transactions. 2013. Vol. 11. Iss 4. PP. 1134-1142.

10. Ле Ч.Д., Симонина О.А. Механизм приоритезации для обеспечения минимизации задержки в условиях конкурентной среды в сетях Wi-Fi с плотным распределением устройств // Информационные технологии и системы. 2016. № 3(95). С. 99-106.

11. Ле Ч.Д., Симонина О.А. Организация приоритетного доступа в сетях IoT с высокой плотностью устройств и чувствительными к задержкам сервисами // Электросвязь. 2016. № 9. С. 63-67.

12. Al-Maqri M.A. et al. Adaptive multi-polling scheduler for QoS support of video transmission in IEEE 802.11 e WLANs // Telecommunication systems. 2016. Vol. 61. Iss. 4. PP. 773-791.