

УДК 004.7.051

О. М. ТАРАСЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*

СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ УДЕРЖАНИЯ СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

В статье рассмотрена проблема неравномерного распределения времени удержания среды передачи в беспроводных сетях в случае сосуществования низко- и высокоскоростных абонентов, следствием которой является значительное снижение пропускной способности. В статье проанализированы возможные способы решения данной проблемы на основе предоставления приоритетного доступа к среде передачи для высокоскоростных абонентов. Наиболее перспективный из них базируется на адаптивном управлении шириной окна конкуренции. Данный механизм является стандартным средством обеспечения качества обслуживания в беспроводных сетях, однако для его эффективного использования необходимо наличие математически-обоснованных процедур выбора значения ширины окна конкуренции.

Ключевые слова: беспроводные сети, Wi-Fi, пропускная способность, доступ к среде передачи.

Введение

В настоящее время среди сетевых технологий наиболее высокий темп развития имеют технологии высокоскоростной передачи данных в беспроводных компьютерных сетях. Утвержденный в 2009 г. стандарт IEEE 802.11n [1] определяет скорость беспроводной передачи данных до 600 Мбит/с на основе внесения значительных технологических новшеств (использование технологии многолучевого распространения ММО, расширение частотных каналов и др.) в спецификацию физического уровня сетей Wi-Fi. Черновой вариант стандарта IEEE 802.11ac для беспроводных сетей нового поколения предполагает дальнейшее увеличение скорости передачи до нескольких гигабит в секунду [2].

Однако, опыт практической эксплуатации и результаты многочисленных тестов показывают [3, 4], что реальная пропускная способность беспроводных сетей Wi-Fi остается достаточно низкой несмотря на высокую канальную скорость приема и передачи информации. В режиме Ad-hoc или же при взаимодействии беспроводных абонентов с компьютерами кабельной сети через точку доступа пропускная способность снижается на 30-50% и более. Использование беспроводной точки доступа для передачи информации между мобильными компьютерами дополнительно снижает пропускную способность в два раза. Анализ работ [5, 6], а также собственные исследования [3] позволяют выделить следующие основные факторы снижения пропускной способности в беспроводных сетях Wi-Fi:

1) значительная доля служебного трафика, предназначенного для поддержки различных режи-

мов функционирования и управления беспроводной передачей (стандарт IEEE 802.11n определяет 13 типов управляющих фреймов и 9 типов фреймов контроля). Ситуацию усугубляет тот факт, что большая часть служебных фреймов передается на минимально-возможной скорости, что приводит к увеличению времени занятости беспроводной среды;

2) работа беспроводной сети в полудуплексном режиме, когда доступная пропускная способность сети делится между всеми абонентами. Кроме того, в режиме инфраструктуры информационный обмен между беспроводными абонентами выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется передача фрейма данных от отправителя точке доступа, где информация буферизируется до окончания передачи. На втором этапе фрейм передается точкой доступа компьютеру-получателю;

3) наличие низкоскоростных абонентов беспроводной сети, которым для передачи фреймов данных требуется большее время. В результате, при равновероятном доступе к среде передаче низкоскоростные абоненты фактически захватывают среду передачи, что приводит к значительному снижению пропускной способности сети, которая в этом случае определяется скоростью передачи наиболее медленного абонента [3].

Среди указанных факторов снижения пропускной способности наименее исследованной и неразрешенной остается проблема неравномерного распределения времени удержания среды передачи. В связи с этим целью статьи является исследование способов предотвращения деградации пропускной способности при одновременном подключении к беспроводной сети низко- и высокоскоростных абонентов.

1. Влияние неравномерного распределения времени удержания среды передачи на пропускную способность

Проблема неравномерного распределения времени удержания среды передачи в беспроводных сетях Wi-Fi проявляется в случае одновременного подключения к сети низко- и высокоскоростных абонентов. Чаще всего низкая скорость передачи обусловлена удаленностью абонентов друг от друга или от точки доступа, высоким уровнем электромагнитных помех, незначительной мощностью передатчика и/или чувствительностью приемника, что характерно для смартфонов и планшетов. Кроме того, сети стандарта 802.11n обеспечивают поддержку устройств, работающих по стандартам 802.11a/b/g, работающих на значительно более низких скоростях.

В результате для передачи того же объема информации низкоскоростным абонентам требуется большее время (обратно пропорциональное скорости передачи), чем высокоскоростным устройствам (см. рис. 1,а). Как следствие, при равновероятном доступе к среде передачи CSMA/CA, используемом в сетях Wi-Fi, низкоскоростные абоненты удерживают среду передачи в течении более длительного времени. В случае, если медленные абоненты активно передают или принимают данные это приводит к дополнительному снижению пропускной способности беспроводной сети на 50-80%.

В [3] предложена аналитическая модель, позволяющая оценить пропускную способность беспроводной сети с учетом скоростей передачи её абонентов, достоверность которой подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пропускная способность, доступная каждому мобильному устройству, определяется скоростью передачи наименее скоростного из них.

Например, если к беспроводной точке доступа подключены два абонента, поддерживающие скорости передачи 300 Мбит/с и 15 Мбит/с соответственно, то максимальная пропускная способность при интенсивном взаимодействии с кабельной сетью будет составлять около 14,3 Мбит/с для обоих абонентов.

В то же время справедливой была бы ситуация, когда пропускная способность, доступная каждому абоненту, уменьшалась бы пропорционально общему числу абонентов беспроводной сети относительно скорости подключения абонента. Т.е. для рассматриваемого случая первый абонент должен рассчитывать на пропускную способность около 150 Мбит/с, а второй – 7,5 Мбит/с.

2. Способы решения проблемы неравномерного распределения времени удержания среды передачи

В результате проведенного анализа определены несколько способов, которые могут быть использованы для снижения деградации пропускной способности беспроводных сетей при наличии низкоскоростных абонентов. Так или иначе, эти способы направлены на предоставление приоритета более скоростным абонентам.

Во-первых, более скоростным абонентам может быть предоставлено право передавать сетевые кадры большей длины (рис. 1,б). В спецификации 802.11n этот способ реализуется посредством агрегации фреймов, называемой «MAC Service Data Unit (MSDU) aggregation».

Во-вторых, более скоростным абонентам может быть предоставлено право передавать несколько сетевых кадров подряд без выдерживания случайной задержки между ними (рис. 1,в). В спецификации 802.11n этот способ реализуется посредством агрегации фреймов, называемой «MAC Protocol Data Unit (MPDU) aggregation».

Третий подход может базироваться на управлении шириной окна конкуренции абонентов беспроводной сети. В этом случае у более скоростных абонентов беспроводной сети максимальное значение диапазона случайной задержки, должно быть меньше, чем у менее скоростных абонентов. Т.е. более скоростные абоненты будут использовать более узкое окно конкуренции, чем низкоскоростные, что повысит вероятность получения доступа к среде передачи в результате конкуренции с низкоскоростными абонентами (рис. 1,г).

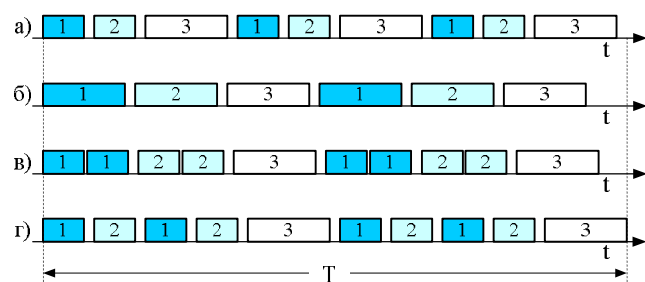


Рис. 1. Обеспечение равноправного доступа к среде передачи абонентов с разными битовыми скоростями ($V_1=V_2$; $V_3=V_1/2$)

Рассмотренные подходы решают проблему неравномерного распределения времени удержания среды передачи, однако обладают и недостатками. Очевидным недостатком первого из них является то, что с увеличением длины кадра возрастет и вероят-

ность его искажения. Это в свою очередь приведет к снижению пропускной способности за счет увеличения количества и объема повторных передач.

Если же вместо увеличения кадров данных, передаваемых более скоростными абонентами, уменьшить размер кадров данных, передаваемых менее скоростными абонентами, то такое решение также приводит к снижению пропускной способности, поскольку уменьшится соотношение доли полезной информации и служебных данных, передаваемых в заголовке каждого сетевого кадра.

Аналитическая модель оценки пропускной способности сети в зависимости от размера сетевого кадра (отношения объема служебного заголовка и поля данных) с учетом вероятности битовой ошибки представлена в [7]. Там же приведена аналитическая модель для выбора оптимального размера кадра в зависимости от вероятности битовой ошибки.

Кроме того, увеличение размера передаваемых высокоскоростными абонентами кадров приводит к увеличению задержек ожидания освобождения среды передачи как для низкоскоростных абонентов, так и для высокоскоростных. Следствием такого решения будет увеличение времени отклика в работе сетевых приложений, что является особенно критичным для мультимедийного трафика.

В случае, когда более скоростным абонентам предоставлено право передавать несколько сетевых кадров стандартного размера подряд (рис. 1,в), при искажении данных потребуются ретрансляция только поврежденного кадра, что является преимуществом по сравнению с предыдущим примером.

Вместе с тем, возрастает общий объем служебного трафика за счет того, что каждый фрейм снабжается собственным заголовком, что, учитывая наличие короткого межкадрового интервала между фреймами, передаваемыми одним абонентом, несколько снижает полезную пропускную способность.

Кроме того, данный метод не только не решает проблему увеличения задержек в работе сетевых приложений из-за увеличения времени ожидания доступа к среде передачи, но и несколько усугубляет её из-за дополнительных накладных расходов (заголовков фреймов и наличием коротких межкадровых интервалов между ними).

Наиболее целесообразным на наш взгляд представляется подход, основанный на адаптивном управлении шириной окна конкуренции абонентов беспроводной сети в зависимости от используемой ими битовой скорости передачи.

В этом случае более скоростные беспроводные абоненты должны использовать меньшее окно конкуренции, по сравнению с менее скоростными.

В результате для более скоростных абонентов увеличивается вероятность получения доступа к среде передачи по сравнению с низкоскоростными. В то же время, между собой высокоскоростные абоненты продолжают конкурировать на равноправной основе, что позволяет избежать увеличения времени отклика в работе сетевых приложений.

3. Анализ особенностей использования окна конкуренции в алгоритме случайного доступа к среде передачи

Окно конкуренции является одним из ключевых элементов распределенной функции координации, которая используется в беспроводных сетях для получения доступа к среде передачи.

Окно конкуренции – это интервал времени, в котором абоненты соревнуются за право передачи данных.

Согласно алгоритму множественного доступа к среде передачи CSMA/CA после окончания передачи очередного фрейма все станции должны выждать стандартный межфреймовый интервал DIFS, одинаковый для всех. После его окончания каждый абонент беспроводной сети выдерживает дополнительную случайную задержку.

Использование индивидуального таймера случайной задержки для каждого абонента позволяет уменьшить вероятности ситуации, когда абоненты будут пытаться начать передачу данных одновременно.

При определении случайной задержки в беспроводных сетях IEEE 802.11 введены два ограничения:

- максимальная ширина окна конкуренции CW_{max} , обычно равная $1023 (2^{10}-1)$;
- минимальная ширина окна конкуренции CW_{min} , обычно равная $15 (2^4-1)$.

Значение таймера случайной задержки определяется случайным выбором числа X , лежащего в диапазоне $[0, CW_{min}]$ (см. рис. 2).

Изначально выбор осуществляется между числами от 0 до 15 включительно.

Если при попытке доступа к среде передачи происходит коллизия, значение CW_{min} возрастает экспоненциально, а, следовательно, при следующей попытке передачи этого же фрейма случайная задержка будет выбираться из диапазона $[0..31]$.

При постоянных проблемах передачи значение CW_{min} будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет значения $CW_{max}=1023$, после чего не меняется. Если после 15-го повтора передачи фрейм не будет отправлен, станция решит, что это вообще невозможно и удалит его из буфера передачи.

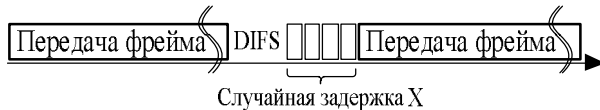


Рис. 2. Механизм случайного доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Единицы измерения ширины окна конкуренции и случайной задержки являются каналные интервалы (slot time). Для сетей стандарта IEEE 802.11n длительность одного каналного интервала равна 9 мкс.

Распределенный алгоритм доступа к среде передачи является одинаковым для всех беспроводных абонентов, несмотря на скорость, которую они поддерживают. В результате обеспечивается равновероятный доступ к среде передачи, который оказывается несправедливым для высокоскоростных абонентов.

В соответствии с выводами предыдущего подраздела, для более справедливого распределения доступной пропускной способности беспроводной компьютерной сети более скоростным абонентам необходимо обеспечить повышенную вероятность доступа к среде передачи.

Как следует из анализа особенностей распределенного алгоритма доступа к среде передачи DCF (Distributed Coordinated Function), приоритетный доступ более скоростных абонентов может быть достигнут путем адаптивного управления шириной окна конкуренции. Т.е. более скоростные абоненты должны использовать меньшее значение CW_{min} , чем абоненты, поддерживающие более низкую битовую скорость передачи.

4. Управление шириной окна конкуренции для поддержки качества обслуживания в сетях Wi-Fi

Идея управления шириной окна конкуренции не является новой. Она достаточно успешно реализована для поддержания механизма качества обслуживания QoS, который обеспечивает разный приоритет доступа для разного типа трафика. Для беспроводных сетей этот механизм регламентирован стандартом IEEE 802.11e [88].

В отличие от аналогичного стандарта для кабельных сетей IEEE 802.1p [89], стандарт для беспроводных сетей определяет не семь, а четыре класса обслуживания. Наименьший (нулевой) приоритет присваивается фоновому (background) трафику данных.

Более высокий приоритет имеет трафик данных, реализующих функции сигнализации и кон-

троля в компьютерных сетях. Этот трафик относится к типу Best Effort, т.е. передается без гарантии качества обслуживания, но с «максимальными усилиями» по его обеспечению.

Все, что касается передачи видеoinформации, отнесено в отдельный класс с более высоким приоритетом. Наивысший же приоритет имеют протоколы передачи голоса через цифровую сеть и управляющие фреймы.

Таблица 1.

Приоритеты трафика стандартов IEEE 802.1p и IEEE 802.11e

Стандарт IEEE 802.1p		Стандарт IEEE 802.11e	
Приоритет	Тип трафика	Приоритет	Тип трафика
0	Данные	0	Данные
1	Данные		
2	Данные		
3	Сигнализация и контроль	1	Сигнализация и контроль
4	Видеозондирование	2	Видео
5	Видео		
6	Голос	3	Голос (VoIP), управление сетью
7	Управление сетью		

Функции координации в беспроводных сетях с поддержкой QoS вместо межкадрового интервала DIFS определяет арбитражный межкадровый интервал AIFS (arbitration interframe space).

В отличие от интервала DIFS AIFS может изменяться. Увеличение этого интервала для несрочного трафика предоставляет некоторые преимущества более срочному трафику. В результате, задержка передачи приоритетных фреймов будет меньше [10].

Алгоритм доступа к среде передачи с предоставлением QoS определяет новый элемент – благоприятную возможность передачи TXOP (transmit opportunity), т.е. максимально допустимое время удержания среды, в течение которого абонент может передать один или несколько кадров без прерыва. Кроме того, новый алгоритм доступа к среде передачи изменяет и способ выбора окна конкуренции для разного типа трафика.

В табл. 2 представлены основные изменения параметров распределенной функции координации, направленные на обеспечение качества обслуживания для разных типов трафика.

Для трафика, имеющего наименьший приоритет, равный нулю, используются обычные параметры минимального и максимального окна конкуренции, а также двойной интервал AIFS, что дает максимальную задержку при передаче по сравнению с другими приоритетами.

Таблиця 2.
Параметри доступа к среде передачи
с учетом приоритетности трафика

Приоритет	CW_{\min}	CW_{\max}	AIFS	TXOP
0	$aCW_{\min}=15$	$aCW_{\max}=1023$	7	0
1	$aCW_{\min}=15$	$aCW_{\max}=1023$	3	0
2	$(aCW_{\min}+1)/2-1=7$	$aCW_{\min}=15$	2	3 мс
3	$(aCW_{\min}+1)/4-1=3$	$(aCW_{\min}+1)/2-1=7$	2	1,5 мс

Ноль в графе параметра TXOP означает, что для данного приоритета при получении права на передачу можно переслать только один кадр, а затем опять начать конкурировать за среду передачи. Трафик, имеющий приоритет, равный единице, использует обычные параметры минимального и максимального окна конкуренции и обычный межкадровый интервал. Для трафика с приоритетом, равным двум, искусственно уменьшено стандартное минимальное окно конкуренции. Если за исходное значение брать $aCW_{\min} = 15$, то в этом случае минимальный (начальный) размер окна конкуренции CW_{\min} будет равен 7. Это означает, что при определении задержки перед попыткой доступа к среде передачи станция будет выбирать случайное число из интервала (0; 7), что обеспечивает приоритетность в получении доступа к среде передачи по сравнению с предыдущими типами трафика. В качестве максимального окна конкуренции назначается значение стандартного минимального окна.

В случае возникновения проблем с передачей трафика данного приоритета абоненты будут увеличивать значения своего текущего минимального окна конкуренции до 15 и не более, в то время как при передаче трафика данных размер окна передачи может возрасти до 1023. Кроме того, этому классу трафика выделен наибольший интервал для передачи фреймов – 3 мс, поскольку трансляция видео подразумевает передачу значительного объема информации.

Самый высокоприоритетный класс трафика (третий) обслуживается со значениями минимального и максимального окон конкуренции: 3 и 7 соответственно. Трафик, который входит в этот класс, является наиболее чувствительным к задержкам, однако управляющие кадры и кадры IP-телефонии достаточно малы, поэтому значения параметра TXOP ниже, чем у предыдущего класса.

Заключение

Интенсивные темпы развития беспроводных сетевых технологий приводят к одновременному сосуществованию мобильных устройств, поддержи-

вающих разные скорости передачи. Кроме того, скорость передачи в беспроводных сетях может уменьшаться при увеличении уровня внешних помех или же расстояния между абонентами. Как следствие, используемый в сетях Wi-Fi алгоритм CSMA/CA, обеспечивающий равновероятный доступ к среде передачи, оказывается несправедливым для высокоскоростных абонентов и приводит к значительному снижению пропускной способности беспроводной сети при наличии хотя бы одной низкоскоростной станции.

В статье проанализированы различные способы исправления такой ситуации. Наиболее перспективный из них базируется на адаптивном управлении шириной окна конкуренции мобильных абонентов таким образом, что более скоростные абоненты должны использовать меньшее значение параметра CW_{\min} , чем абоненты, поддерживающие более низкую битовую скорость передачи.

Управление параметрами, контролирующими размер окна конкуренции и обязательный межкадровый интервал, является одним из стандартных механизмов обеспечения качества обслуживания в беспроводных сетях. Также известны несколько работ, посвященных улучшению механизмов обеспечения QoS для беспроводных сетей [11–14]. Однако ни эти работы, ни стандартные механизмы стандарта IEEE802.11e не учитывают разность скоростей абонентов, что повышает актуальность исследований в данном направлении.

Успешное применение рассмотренных способов решения проблемы неравномерного распределения времени удержания среды передачи в беспроводных сетях требует разработки математических моделей, позволяющих выбрать оптимальные параметры настройки механизма доступа к среде передачи с учетом разности скоростей абонентов беспроводной сети.

Литература

1. IEEE Std 802.11n-2009. Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput [Text]. – Int. 2009–10–29. – New York : IEEE, 2009. – 536 p.
2. Watson, R. Understanding IEEE 802.11ac Wi-Fi Standard and Preparing the Enterprise WLAN [Text] / R. Watson. – Sunnyvale : Meru, 2012. – 10 p.
3. Throughput estimation with regard to airtime consumption unfairness in mixed data rate wi-fi networks [Text] / A. M. Abdul-Hadi, O. Tarasyuk, A. Gorbenko, V. Kharchenko, T. Hollstein // Communications. – 2014. – Vol. 1. – P. 84–87.
4. Performance evaluation of Wi-Fi IEEE 802.11 a.g WPA2 PTP links: a case study [Text] / J. A. R. Pacheco de Carvalho, etc. // World Congress on Engineering : conference proceedings. – London, 2012. – P. 1–6.

5. Malone, D. *Modeling the 802.11 Distributed Coordination Function in Nonsaturated Heterogeneous Conditions [Text]* / D. Malone, K. Duffy, D. Leith // *IEEE/ACM Trans. on Networking*. – 2007. – Vol. 15, N. 1. – P. 159–172.
6. *Throughput Unfairness in TCP over WiFi [Text]* / V. P. Kemerlis, E. C. Stefanis, G. Xylomenos, G. C. Polyzos // *3rd Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services: conference proceedings*. – Les Menuires, 2006. – P. 1–6.
7. Morrow, R. *Wireless Network Coexistence [Text]* / R. Morrow. – New York : McGraw-Hill, 2004. – 350 p.
8. *IEEE Std 802.11e-2005. Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS) [Text]*. – Int. 2005–07–01. – New York : IEEE, 2005. – 536 p.
9. *IEEE Std 802.1p. LAN Layer 2 QoS/CoS Protocol for Traffic Prioritization [Text]*. – Int. 1998–01–01. – New York : IEEE, 1998. – 14 p.
10. Anastasi, G. *QoS Provided by the IEEE 802.11 Wireless LAN to advanced Data Applications: a Simulation Analysis [Text]* / G. Anastasi, L. Lenzini // *Wireless Networks*. – 2000. – Vol. 6, N 2. – P. 99–108.
11. Romdhani, L. *Adaptive EDCF: Enhanced Service Differentiation for IEEE 802.11 Wireless Ad-Hoc Networks [Text]* / L. Romdhani, Q. Ni, T. Turlatti // *IEEE Wireless Communications and Networking Conference : conference proceedings*. – New Orleans, 2003. – P. 1373–1378.
12. Wang, B. *QoS-aware fair rate allocation in wireless mesh networks [Text]* / B. Wang, M. Mutka // *IEEE Computer Communincaton*. – 2008. – Vol. 7. – P. 1276–1289.
13. Jaehyuk, C. *EBA: An Enhancement of the IEEE 802.11 DCF via Distributed Reservation [Text]* / C. Jaehyuk, Y. Joon // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. – 2005. – Vol. 6. – P. 378–390.
14. Reisslein, M. *A framework for Guaranteeing Statistical QoS [Text]* / M. Reisslein, K.W. Ross, S. Rajagopal // *IEEE-ACM Transactions on Networking*. – 2002. – Vol. 10, №1. – P. 27–42.

Поступила в редакцію 03.03.2014, рассмотрена на редколлегии 25.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. В. Краснобаев, Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, Полтава, Украина

СПОСОБИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ НЕРІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ЧАСУ УТРИМАННЯ СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАЧІ В БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ

О. М. Тарасюк

У статті розглянуто проблему нерівномірного розподілу часу утримання середовища передачі в бездротових мережах у випадку співіснування низько- та високошвидкісних абонентів, у наслідок якої є суттєве зменшення пропускної здатності. У статті проаналізовано можливі способи вирішення даної проблеми на основі надання пріоритетного доступу до середовища передачі для високошвидкісних абонентів. Найбільш перспективний з них базується на адаптивному управлінні шириною вікна конкуренції. Даний механізм є стандартним засобом забезпечення якості обслуговування в бездротових мережах, однак для його ефективного застосування необхідна наявність математично-обґрунтованих процедур вибору значення ширини вікна конкуренції.

Ключові слова: бездротові мережі, Wi-Fi, пропускна здатність, доступ до середовища передачі.

MEANS OF SOLVING A PROBLEM OF UNEVEN DISTRIBUTION OF AIRTIME CONSUMPTION IN WIRELESS NETWORKS

О. М. Tarasyuk

In the paper we discuss a problem in case of coexistence of low-data-rate and high-data-rate clients causing significant throughput degradation. We have also analysed possible solutions of solving that problems by giving high-data-rate clients a priority to access media. One of the most promising approaches is based on adaptive control of station's contention window. It is a standard technique used in wireless networks to assure quality of service, though mathematically-based procedures of choosing the right values of contention window are needed to improve its effectiveness.

Keywords: wireless networks, Wi-Fi, throughput, media access control.

Тарасюк Ольга Михайловна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і сетей Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: O.Tarasyuk @ csac.khai.edu.