

無線LANでの分散型待ち時間制御

山田 浩之[†] 鄭 武龍[†] 森川 博之[†] 青山 友紀[†]

[†] 東京大学 大学院 工学系研究科
〒113-8656 東京都 文京区 本郷 7-3-1

E-mail: †{yamada,mrj,mori,aoyama}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 無線LANを利用したインターネットユーザの増加とリアルタイム型アプリケーションの普及のため、無線LANでリアルタイムトラフィックのQoSをサポートすることが重要な課題となってきた。無線LANのリアルタイムトラフィックのQoSはアクセスポイントの集中制御によってサポートできるが、分散制御によるサポートが望ましい場合もある。そのような事情を踏まえ、本稿では、将来の無線LANで適切なQoSサポートを行えるサービス形態を示す。また、そのサービスを実現する際に遅延による公平性及び差別化のサポートが必要となるため、フロー毎の遅延の公平性及び遅延の差別化に利用できる分散型待ち時間制御手法を示す。更に、示した手法の性能をシミュレーションにより評価する。

キーワード 無線LAN, CSMA/CA, QoS, 分散, 遅延, 待ち時間, リアルタイム

Distributed Control of Waiting-time in Wireless LAN

Hiroyuki YAMADA[†], Moo Ryong JEONG[†], Hiroyuki MORIKAWA[†], and Tomonori AOYAMA[†]

[†] Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: †{yamada,mrj,mori,aoyama}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract Because of increase of Internet users using wireless LANs and realtime applications, it has become important to support realtime traffic in wireless LANs. Quality of realtime traffic in wireless LANs can be supported using concentrated control in access points, but had better be supported using distributed control in some cases. Taking these into account, we present a service style properly supporting QoS in wireless LANs. we also present the distributed waiting-time control method supporting delay fairness and delay differentiation required in the service. Furthermore, we evaluate the method.

Key words Wireless LAN, CSMA/CA, QoS, Distributed, Delay, Waiting-time, Realtime

1. はじめに

無線 LAN を利用したインターネットユーザの増加とリアルタイム型アプリケーションの普及のため、無線 LAN でリアルタイムトラフィックの QoS(Quality of Service) をサポートすることが重要な課題となって来た。

無線 LAN においてリアルタイムトラフィックの QoS をサポートするために、集中制御による最大遅延の保証や、分散制御によるノンリアルタイムトラフィックとの差別化など、様々な研究が行われている。本稿では、これら関連研究の動向から将来の無線 LAN において様々な形態の QoS サポートが考えられることを考慮し、無線 LAN の QoS 保証サービスの将来像を示す。そこで、将来の無線 LAN において、分散制御による遅延の公平性及び差別化のサポートが必要であることを述べ、そのための分散型待ち時間制御手法を示す。更に、示した手法をシミュレーションにより評価する。

本稿の構成は次の通りである。まず 2. で、無線 LAN におけるリアルタイムトラフィックサポートの研究動向、及び想定される将来の無線 LAN における QoS サポートのサービス形態を示す。次に 3. で、2. で示したサービスを実現するために必要な分散型待ち時間制御手法を示す。更に 4. で、2. で示した分散型待ち時間制御手法のシミュレーションによる評価を行う。

2. 無線 LAN

本節では、本研究の背景を述べる。2.1 で無線 LAN の標準である IEEE802.11 について簡単に説明した後、2.2 で無線 LAN におけるリアルタイムトラフィックの QoS サポートの関連研究について述べる。ここで、遅延を対象とした分散制御による公平性及び差別化のサポートが望まれることと、既存の手法ではこのサポートができないことを説明する。そして、2.3 で想定する無線 LAN のサービス形態を示し、そのサービスで分散型の遅延制御手法が必要であることを説明する。

2.1 IEEE802.11

無線 LAN は IEEE802.11 [1] として標準化されており、IEEE802.11 では DCF(Distributed Coordination Function) と PCF(Point Coordination Function) の二つのアクセス制御方式が規定されている。

DCF は CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) による分散型のメディアアクセス制御方式である。BEB(Binary Exponential Backoff) と呼ばれるフレーム再送回数に応じて指数関数的にバックオフ時間を増加させるバックオフアルゴリズムを採用しており、各端末の送信フレーム数の公平性をサポートする。

また、PCF は DCF 上に実装され、アクセスポイン

トが一定期間メディアアクセス権を制御する集中制御方式である。この期間を CFP(Contention Free Period) と呼ぶ。CFP では、アクセスポイントかアクセスポイントにポーリングされた端末だけが、フレームを送信できる。よって、この間は衝突の危険性のない安全な転送が約束されている。CFP 以外の期間を CP(Contention Period) と呼ぶが、CP では、DCF による分散型のアクセス制御が執られる。

2.2 リアルタイムトラフィックサポート

無線 LAN におけるリアルタイムトラフィックの QoS サポートを対象とする研究は多々ある。これらの研究の多くは、PCF による集中制御を用いるアプローチを執っている [2] [3] [4] [5] [6]。このアプローチでは、リアルタイムトラフィックの最大遅延を保証できるので、高い QoS をサポートできる。[2] [3] [4] [5] [6] で執られている PCF による QoS サポートは、CFP 内で各フローに固定の帯域を割り当てる方式を執っている。実際、CFP が訪れる度に毎回各フローとのネゴシエーション及び各フローへの帯域割り当てを行うのは現実的ではない。よって固定レートのフローに対しては PCF は効率良く作用するが、可変レートのフローに対しては、適切な帯域割り当てが困難である。ピークレートに合わせて帯域を割り当てれば、割り当てた帯域が無駄になり無線 LAN 全体の利用率を下げることになるし、割り当てる帯域が不足すれば、最大遅延は保証できない。従って、リアルタイム性の高いフローであっても、PCF によるサポートは適さない場合がある。しかし、[2] [3] [4] [5] [6] では、リアルタイムトラフィックを全て PCF による集中制御でサポートすることを前提としているため、このサポートが適さないリアルタイムトラフィックはノンリアルタイムトラフィックと同等に扱われる。また、PCF はアクセスポイントを置くインフラストラクチャーモードでしか利用できないため、アドホックモードの無線 LAN ではこれらの手法は利用できない。よって、分散制御でリアルタイムトラフィックの QoS をサポートする手法が望まれる。

分散制御によるリアルタイムトラフィックの QoS サポートでは、ノンリアルタイムトラフィックとの差別化により低遅延をサポートすること、及びリアルタイムフロー間で遅延が公平になることが要求される。前者はリアルタイムアプリケーションがノンリアルタイムアプリケーションより絶対的に低い遅延を要求するために必要であり、後者は無線 LAN を利用する複数のリアルタイムアプリケーションに対する公平性をサポートするために必要である。更に、そのような分散制御手法は PCF と共用できることが望ましい。それは、分散制御による QoS サポートを導入したことで、PCF による高い QoS サポートを犠牲にするのは、割に合わないからである。

分散制御によるリアルタイムトラフィックの QoS サポートの研究としては、[7] [8] [9] がある。[7] [8] では、BEB のパラメータを用いてリアルタイムトラフィックとノンリアルタイムトラフィックを遅延を差別化し、リアルタイムトラフィックの低遅延をサポートする手

法が提案されているが、BEBが遅延の公平性をサポートできないため、リアルタイムフロー間で遅延が公平にならない場合がある（BEBが遅延の公平性をサポートできないことは4.4において明らかにする）。[9]では、DCF上にPCF以外の独自プロトコルを乗せることでリアルタイムトラフィックをサポートする分散制御手法が提案されている。しかし、PCFと共用することができないため、この手法は、アドホックモードの無線LANでしか利用できない。また、IEEE802.11のタスクグループeで、差別化を可能にする分散制御手法として、DCFの拡張であるEDCF(Enhanced DCF)[10]の標準化が進んでいる。EDCFを利用すれば、リアルタイムトラフィックとノンリアルタイムトラフィックの差別化が行えるが、EDCFは遅延の公平性をサポートしない。

2.3 サービス形態

2.2で説明した無線LANにおけるQoSサポートの研究動向を踏まえると、将来、無線LANでは、リアルタイムトラフィック及びノンリアルタイムトラフィックに対し、集中制御及び分散制御を駆使して、多様なQoSサポートが行われるようになると思われる。そこで、将来の無線LANが多様なQoSサポートを包括する表1に示すような形態をとると仮定する。

一番高いクラスであるClass(1)では、最大遅延が保証される。このクラスのサポートにはPCFが利用できる。このクラス以外は分散制御によりQoSをサポートする。リアルタイムトラフィックを対象としたクラスをM種類、ノンリアルタイムトラフィックを対象としたクラスをN種類設けている。Class(2,*)はリアルタイムトラフィックを対象としたクラスであり、クラス内では各フローの遅延の公平性が、クラス間では各フローの遅延の差別化がなされる。Class(3,*)はノンリアルタイムトラフィックを対象としたクラスであり、クラス内では各フローのスループットの公平性が、クラス間では各フローのスループットの差別化がなされる。本サービスはインフラストラクチャーモードの無線LANを想定しているが、Class(1)以外は全て分散制御によりサポートされるので、アドホックモードの無線LANでもClass(1)を除く全てのクラス対するQoSサポートが可能である。

表1 サービス形態

クラス	クラス内	クラス間	制御形態	サービス対象
Class(1)	最大遅延を保証		集中制御	
Class(2,1)	遅延が公平	遅延で差別化	分散制御	リアルタイムトラフィック
Class(2,2)				
Class(2,M)				
Class(3,1)	スループットが公平	スループットで差別化		ノンリアルタイムトラフィック
Class(3,2)				
Class(3,N)				

Class(3,*)におけるクラス内のスループットの公平性を保証する手法としては、DFS(Distributed Fair Scheduling)[11]が利用できる。DFSはバックオフアルゴリズムとしてBEB以外のものを利用しており、厳密にはIEEE802.11の規格に従ってはいないが、バックオフ値の導出過程以外にDCFと異なる点はない

め、PCFとの共存は可能である。厳密に規格に従うことに拘るのであれば、DCFを用いればよい。しかし、DCFはBEBを用いているため、送信パケット数の公平性は実現できるが、必ずしもスループットの公平性は実現できない。DFSは公平性の重み付けにも対応しているので、重み付けを差別化に利用すれば、Class(3,*)におけるクラス間のスループットの差別化にも利用できる。また、EDCFもClass(3,*)のクラス間差別化に利用できる。

Class(2,*)をサポートするためには、遅延の公平性及び遅延の差別化を実現する必要がある。分散制御により遅延の公平性及び差別化をサポートする手法として、3.で分散型待ち時間制御手法を示す。

3. 待ち時間の制御

本節では無線LANに代表されるCSMA/CA型アクセスリンクにおいて、各端末の待ち時間を公平にする分散制御手法を示す。まず3.1で待ち時間という言葉进行を定義し、次に3.2で待ち時間の公平性及び公平性の重み付けを実現するための制御手法を述べる。3.3で3.2で説明した手法をCSMA/CAのメディアアクセス制御に組み込んだアルゴリズムを示す。更に3.4で本手法の適用例を示し、2.3で示した形態の無線LANサービスにおいて、分散制御によるリアルタイムトラフィックのQoSサポートに利用できることを示す。

3.1 待ち時間

本稿では、待ち時間という言葉が端末が送信データをキューに挿入してから送信データがメディア(注1)に送出されるまでの時間として定義する。待ち時間は、キューイング遅延とMAC遅延から成る。キューイング遅延は送信データがキューに挿入されてからキューの先頭に来るまでの時間であり、MAC遅延は送信データがキューの先頭に来てからメディアに送出されるまでの時間であり、メディアビジー時の送信待ちやメディアアイドル時のバックオフなどからなる。待ち時間、キューイング遅延、MAC遅延を、送信データの処理過程に合わせて示すと、図1のようになる。

3.2 制御手法

CSMA/CA環境において待ち時間を公平にするためには、待ち時間の大きいフレームを送信しようとしている端末に高い優先度を与える必要がある。そのためには、待ち時間の大きな端末ほど、バックオフが小さくなるように制御する方法が考えられる。本研究ではこの考えに基づき、式(1)を満たすようにバックオフBを決定する。

(注1): 本稿では、メディアという言葉はCSMA/CA型の無線アクセスリンクとしてのメディアの意味で用いる。

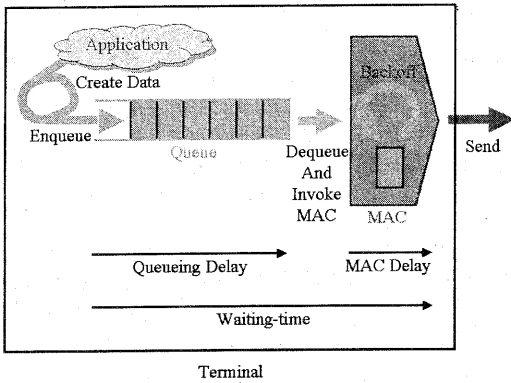


図1 待ち時間、キューイング遅延、MAC遅延

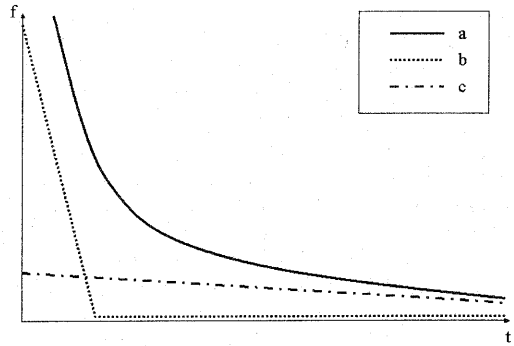


図2 関数 f

$$B \propto f(t) \quad (1)$$

$$f(t) > 0 (t > 0) \quad (2)$$

$$f'(t) < 0 (t > 0) \quad (3)$$

ここで、 t は待ち時間、 $f(t)$ は式(2)及び式(3)を満たす関数である。

関数 $f(t)$ に対する基本的な要求は単調減少関数であること(式(3))である。具体的には図2のようにさまざまな形が考えられる。関数 f の勾配は待ち時間 t の変化に対する制御系の敏感さを表す。bは待ち時間が少し増加しただけで、バックオフを大きく減らし、盛んにフレーム送信を試みる。逆に、cのような場合は、待ち時間 t が増加しても、バックオフに大きく影響しない。

実際、 f として最適な関数は、メディアを共有する端末数やそれらの端末が発するトラフィックの特性などにより異なる。よって、汎用性の高い関数が求められる。そこで、簡単であり、幅広い t の値に対処できる関数として、反比例(図2のa)を採用する。

$$f(t) \propto \frac{1}{t} \quad (4)$$

更に、待ち時間の大きな端末に優先的に送信権を与えながらも、メディア負荷が高くなれば、各端末が送信を控えるように制御する必要がある。この制御はBEBにより実現できる。BEBは再送回数に対し指数的にバックオフを増大させるので、衝突の起こりやすい高負荷などに、送信を抑制することができるからである。

以上の点を考慮すると、BEBにより決定されたバックオフを式(5)により再設定することで、適切に待ち時間の公平性をサポートできる。

$$B := f(t)B \quad (5)$$

公平性の重み付けは、制御パラメータとして t の代わりにフロー毎の重み w により正規化された待ち時間 $\frac{t}{w}$ を用いることで反映させることができる。

$$B := f\left(\frac{t}{w}\right)B \quad (6)$$

3.3 アルゴリズム

3.2で示した制御手法を用いたメディアアクセス制御のアルゴリズムを図3に示す。バックオフ B を決定する部分は Backoff Algorithm Core に示した通りである。ここで、 CW はコンテンションウィンドウ、 CW_{min} 、 CW_{max} はそれぞれ CW の最大値、最小値、 RC は再送回数、 K は全端末で共通の定数、 w は端末毎に決定される定数で重み、 $truncate()$ は小数点以下を切り捨てる関数、 B_{min} 、 B_{max} はそれぞれバックオフ B の最小値と最大値を表す。送信待ちフレームが存在すれば、バックオフ B を決定し、バックオフに入る。バックオフが終了する (Backoff Expiring - yes) と、フレームを送信する (Send a frame)。フレームが送信先の端末に正しく受信されたかどうかは、送信先の端末からの ACK を受信するか否かで判断する。ACK を受信した場合は送信に成功したと判断し (Successfully transmitted - yes)、送信回数 RC をゼロにクリアし ($RC := 0$)、送信に成功したフレームを削除 (Delete the frame from Queue) する。その後、送信待ちフレームが存在すれば、再びバックオフ B を決定し (Backoff Algorithm Core) バックオフに入る (Under Backoff)。フレームの送信後 ACK を受信しない場合は、フレームの送信に失敗したと判断し (Successfully transmitted - no)、送信回数 RC を1増やして ($RC := RC + 1$)、再度バックオフ値を計算する (Backoff Algorithm Core)。

3.4 無線 LAN への適用

本手法は2.3で示した形態の無線 LAN サービスに利用できる。Class(2,*)におけるクラス内の各フローに対する遅延の公平性は、同一クラスに属する各フローに同じ重みを与えて待ち時間制御を行うことで実現できる。クラス間の各フローに対する遅延の差別化は、異なるクラスのフローに異なる重みを与えて待

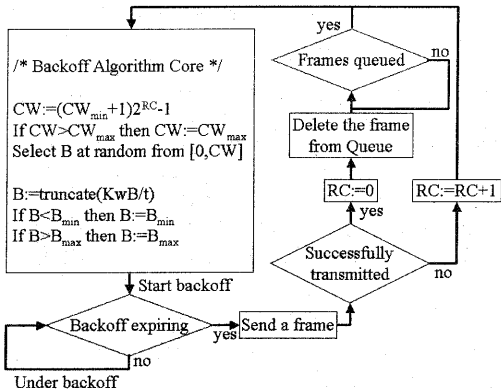


図3 MACアルゴリズム

ち時間制御を行うことで実現できる。また、本手法はDCFのバックオフ値の導出過程に変更を加えただけで実現されるので、PCFとの共存も可能である。

図4は本手法を利用した無線LANサービスの一列である。表1において、 $M=2$ 、 $N=2$ とした場合に相当する。Class(1)をPCFでサポートし、残りの四つのクラスをEDCFでサポートしている。EDCFにより、各端末がそれぞれのクラスに対応するキュー、バックオフ制御方式及び差別化パラメータを持つことができる。Class(2,1)とClass(2,2)のクラス内公平性、及びクラス間差別化に待ち時間制御を利用している。また、Class(3,1)とClass(3,2)の差別化には、BEBのパラメータである CW_{min} を利用している。

このように、待ち時間制御を利用することで、2.3で示した無線LANサービスを実現できるようになる。

クラス	プロトコル		各クラスのサービス状況
	バックオフ制御		
Class(1)	PCF		Delay=30msec
Class(2,1)	待ち時間制御	$w=1$ $CW_{min}=15$	Delay=50msec
Class(2,2)		$w=2$ $CW_{min}=15$	Delay=100msec
Class(3,1)	BEB	$CW_{min}=31$	Throughput=500kbps
Class(3,2)		$CW_{min}=63$	Throughput=300kbps

図4 待ち時間制御の適用例

4. シミュレーションと評価

本節では、3.で示した手法をシミュレーションで評価する。まず4.1でシミュレーションモデルの説明を

する。そして、4.2以降でシミュレーション及び評価を行う。分散制御で待ち時間の公平性をサポートする既存手法は存在しないため、本研究のシミュレーションは、既存手法との比較ではなく、示した手法そのものの性能検証が主となる。しかし、必要に応じて代表的な既存手法であるBEB(Binary Exponential Backoff)との比較も行いながら、示した手法を評価する。

4.1 シミュレーションモデル

本節で行うシミュレーションは以下の環境を仮定する。

- 隠れ端末は存在しない
- RTS/CTSを使用しない

また、各端末の関係は、図5のように設定する。シミュレーションは、送信端末1から送信端末 n までの n 端末が一つの受信端末に向けて送信するシナリオで行う。以後、本節では、送信端末 i の重みを w_i 、送信レートを r_i kbps、送信フレーム長を L_i Byte、キュー長を b_i Byteと表す。また、定数 K 及びバックオフ最小値 B_{min} と最大値 B_{max} 、コンテンションウィンドウ最小値 CW_{min} と最大値 CW_{max} は全送信端末(送信端末1~送信端末 n)で共通のパラメータである。 K 、 B_{min} 、 B_{max} は提案アルゴリズムにおいて導入したパラメータであり、 CW_{min} 、 CW_{max} はBEBのパラメータである(図3)。

本節で行うシミュレーションでは、 $K=0.005$ 、 $B_{min}=1$ 、 $B_{max}=1023$ 、 $CW_{min}=31$ 、 $CW_{max}=1023$ とし、シミュレーション時間は10秒間、グラフで示した待ち時間は10秒間の平均値を表すものとする。

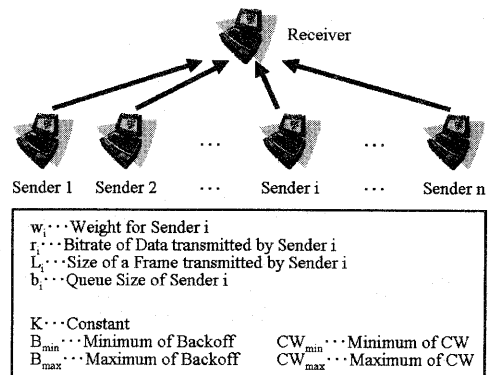


図5 シミュレーション環境

4.2 シミュレーション - 待ち時間の公平性

待ち時間の公平性を実現できるかどうかを表2のシナリオで確認する。送信端末が二つ存在し、同じレートで送信している状態を考える。

このシナリオでのシミュレーション結果は、図6に示す通りである。横軸に二つの送信端末の送信レ

表 2 シナリオ 1

Sender 1	$w_1 = 1$	r_1	$L_1 = 1024\text{Byte}$	$b_1 = 16000\text{Byte}$
Sender 2	$w_2 = 1$	$r_2 = r_1$	$L_2 = 1024\text{Byte}$	$b_2 = 16000\text{Byte}$

ト、棒グラフが各端末の待ち時間（目盛は左側）、折れ線グラフは

$$\left(\frac{\text{送信端末 1 の待ち時間}}{\text{送信端末 1 の重み}} \right) / \left(\frac{\text{送信端末 2 の待ち時間}}{\text{送信端末 2 の重み}} \right)$$

（目盛は右側）を表している。つまり、この折れ線グラフが1に近い値を示すほど、高い公平性が実現されていると言える。図6によれば、低い送信レートから高い送信レートに至るまで、幅広い範囲で折れ線グラフが1に非常に近い値を示している。ここから、待ち時間の公平性が実現されていることが分かる。なお、図に表示したレートよりも低い送信レートの場合は、軽負荷な状態で殆ど待ち時間が観測されなかったため、図にはそのような低レートの場合のデータは表示していない。

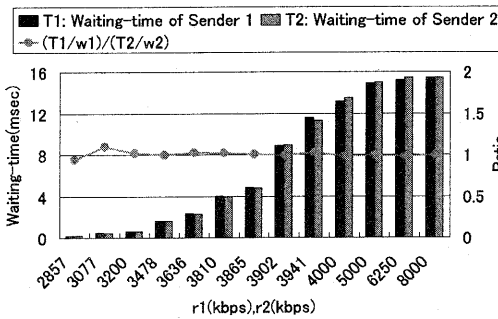


図 6 待ち時間（シナリオ 1）

4.3 シミュレーション - 公平性の重み付け

公平性の重み付けは差別化に有用であるため、重み付きの公平性が実現できるかどうかの検証も重要である。シナリオ 2（表 3）及びシナリオ 3（表 4）で、異なる重み w_i を持つ送信端末同士がメディアを共有している環境のシミュレーションを行った。シナリオ 2では二つ、シナリオ 3では四つの送信端末に異なる重みを与え、さまざまな送信レートで待ち時間を測定した。

シナリオ 2におけるシミュレーションの結果、待ち時間は図7のようになった。折れ線グラフは全体を通して0.8から1.3の間の値を示しており、待ち時間の重み付き公平性はほぼ実現されている。

シナリオ 3におけるシミュレーション結果は図8の通りである。三つの折れ線グラフはそれぞれ、

$$\left(\frac{\text{送信端末 1 の待ち時間}}{\text{送信端末 1 の重み}} \right) / \left(\frac{\text{送信端末 4 の待ち時間}}{\text{送信端末 4 の重み}} \right),$$

$$\left(\frac{\text{送信端末 2 の待ち時間}}{\text{送信端末 2 の重み}} \right) / \left(\frac{\text{送信端末 4 の待ち時間}}{\text{送信端末 4 の重み}} \right),$$

$$\left(\frac{\text{送信端末 3 の待ち時間}}{\text{送信端末 3 の重み}} \right) / \left(\frac{\text{送信端末 4 の待ち時間}}{\text{送信端末 4 の重み}} \right)$$

を表す。よって、これら3本の折れ線グラフが1に近い値を示していれば、重み付きの公平性が実現されていることになる。図8において、折れ線グラフの示す値は、0.7から1.2の間に集中しており、重み付きの公平性がほぼ実現されている。

以上の結果より、最大で約±30%程度の誤差があるものの、本手法によって公平性の重み付けが可能であることが示された。この精度は重み付き公平性の実現には必ずしも十分でないかも知れないが、差別化を主な用途とする場合には、本手法は十分有用である。

表 3 シナリオ 2

Sender 1	$w_1 = 1$	r_1	$L_1 = 1024\text{Byte}$	$b_1 = 16000\text{Byte}$
Sender 2	$w_2 = 2$	$r_2 = r_1$	$L_2 = 1024\text{Byte}$	$b_2 = 16000\text{Byte}$

表 4 シナリオ 3

Sender 1	$w_1 = 1$	r_1	$L_1 = 1024\text{Byte}$	$b_1 = 16000\text{Byte}$
Sender 2	$w_2 = 2$	$r_2 = r_1$	$L_2 = 1024\text{Byte}$	$b_2 = 16000\text{Byte}$
Sender 3	$w_3 = 3$	$r_3 = r_1$	$L_3 = 1024\text{Byte}$	$b_3 = 16000\text{Byte}$
Sender 4	$w_4 = 4$	$r_4 = r_1$	$L_4 = 1024\text{Byte}$	$b_4 = 16000\text{Byte}$

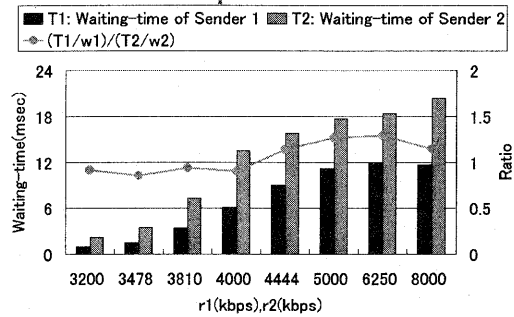


図 7 待ち時間（シナリオ 2）

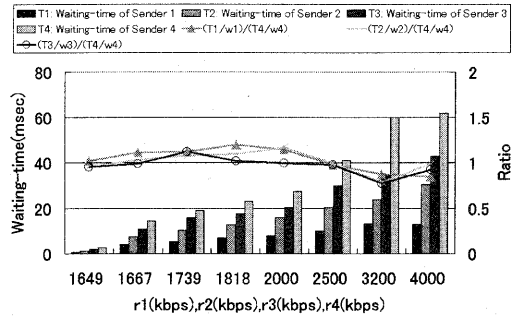


図 8 待ち時間（シナリオ 3）

4.4 シミュレーション - BEB における待ち時間

本節では、二つのシナリオによるシミュレーションで、BEBでは必ずしも待ち時間の公平性が実現されないこと、及びそのような場合でも、本手法では待ち時間の公平性が実現されることを示す。

まず、送信フレームサイズが端末間で異なる表5のような設定でシミュレーションを行った。その結果、待ち時間は図9のようになった。図9では、本手法を

用いた場合の各送信端末の待ち時間 T_1 、 T_2 と、BEB を用いた場合の各送信端末の待ち時間 T_{b1} 、 T_{b2} を、棒グラフにより表している。

BEB の場合送信端末 2 のフレームサイズが送信端末 1 のフレームサイズと同じ場合は、二端末はほぼ等しい待ち時間を示しているが、この点を境に、送信端末 2 のフレームサイズが大きくなればなるほど、送信端末 2 の待ち時間が小さくなり、送信端末 1 の待ち時間が大きくなっている。逆に、送信端末 2 のフレームサイズが送信端末 1 のフレームサイズより小さくなるにつれ、送信端末 2 の待ち時間は急激に増加している。その状態は、折れ線グラフ T_{b1}/T_{b2} が大きな右上がりを示していることから、明らかである。これは、BEB が端末間の送信フレーム数を公平にするよう働くことにより、フレームサイズが小さいほどスループットが低くなるため、それが待ち時間にも影響している。

本手法では、送信端末 1 と送信端末 2 の待ち時間の比を表す折れ線グラフ $(\frac{T_1}{w_1})/(\frac{T_2}{w_2})$ は、1 に非常に近い値となっている。

表 5 シナリオ 4

Sender 1	$w_1 = 1$	$r_1 = 4000\text{kbps}$	$L_1 = 1024\text{Byte}$	$b_1 = 16000\text{Byte}$
Sender 2	$w_2 = 1$	$r_2 = 4000\text{kbps}$	$L_2 = 16000\text{Byte}$	$b_2 = 16000\text{Byte}$

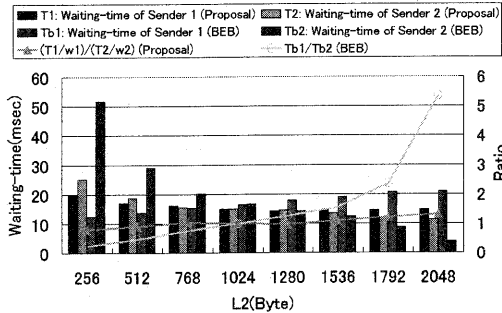


図 9 待ち時間 (シナリオ 4)

次に、キュー長が端末間で異なる表 6 のような設定でシミュレーションを行った。その結果、待ち時間は図 10 のようになった。図 10 では、本手法を用いた場合の各送信端末の待ち時間 T_1 、 T_2 と、BEB を用いた場合の各送信端末の待ち時間 T_{b1} 、 T_{b2} を、棒グラフにより表している。

BEB の場合送信端末 2 のキュー長が送信端末 1 のキュー長と同じ場合は、二端末はほぼ等しい待ち時間を示しているが、この点を境に、送信端末 2 のキュー長が大きくなればなるほど、送信端末 2 の待ち時間が大きくなっている。逆に、送信端末 2 のキュー長が送信端末 1 のキュー長より小さくなると、それにつれて、送信端末 2 の待ち時間は減少している。また、送信端末 1 の待ち時間は、送信端末 2 のキュー長には全く依存していない。つまり、BEB の場合、各送信端末の待ち時間は、キュー長によって特徴付けられている。キュー長が大きいほど多くのフレームを長時間バックログするので、これは自然な結果と言える。

本手法では、送信端末 1 と送信端末 2 の待ち時間の比を表す折れ線グラフ $(\frac{T_1}{w_1})/(\frac{T_2}{w_2})$ が 1 に非常に近い値となっている。

これらのシミュレーション結果から、BEB を用いると待ち時間が公平にならない場合があること、及びそのような場合でも本手法を用いれば、待ち時間を公平に制御できることが分かる。

表 6 シナリオ 5

Sender 1	$w_1 = 1$	$r_1 = 4000\text{kbps}$	$L_1 = 1024\text{Byte}$	$b_1 = 16000\text{Byte}$
Sender 2	$w_2 = 1$	$r_2 = 4000\text{kbps}$	$L_2 = 1024\text{Byte}$	$b_2 = 16000\text{Byte}$

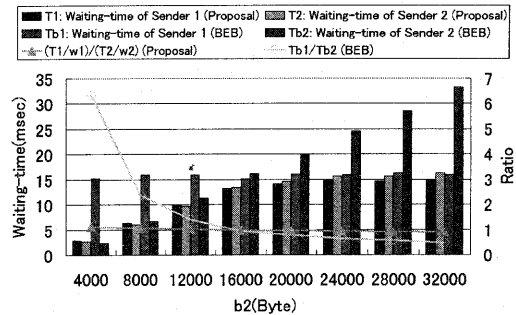


図 10 待ち時間 (シナリオ 5)

4.5 シミュレーション - メディアスループット

本節では、メディアスループットを評価する。例えばサービスの公平性が実現されても、絶対的なサービス量を大きく下げてしまえば意味が無い。よって、メディアスループットも重要な評価項目の一つである。本稿では、メディアを共有する全送信端末が適切に送信できたデータ量の合計から計算されるスループットをメディアスループットと呼ぶことにする。このメディアスループットは単にスループットと呼ばれることも多いが、一端末のスループットとはっきり区別するために、敢えてメディアスループットという言葉を用いる。

そこで、シナリオ 1 とシナリオ 3 の設定でシミュレーションを行い、本手法を用いた場合のメディアスループット R_p 及び BEB を用いた場合のメディアスループット R_b を測定し、その比 R_p/R_b を算出した。

シナリオ 1 におけるシミュレーションの結果は、図 11 のようになった。送信レートが低いときは本手法を用いた場合のメディアスループットと BEB を用いた場合のメディアスループットは同じ値を示している。これは、全くドロップが発生せず、全てのフレームが転送されているためである。送信レートが高くなるにつれて、メディアスループットは飽和してくる。本シナリオにおけるメディアスループットの飽和点は、本手法を用いた場合は約 7800kbps、BEB を用いた場合は約 7000kbps となっており、本手法は BEB より約 10% ほど高いメディアスループットを実現している。シナリオ 3 におけるシミュレーションの結果は、図

12 になった。本シナリオでも、BEB を用いた場合は約 7000kbps でメディアが飽和しているのが分かる。本手法を用いた場合は、端末の送信レートが約 1650kbps から 2000kbps のときに、BEB をやや下回るが高い送信レートのときは BEB を凌ぐメディアスループットを実現している。

これら二つのシナリオにおけるシミュレーション結果から、本手法は BEB と同等のメディアスループットを実現していることが分かる。

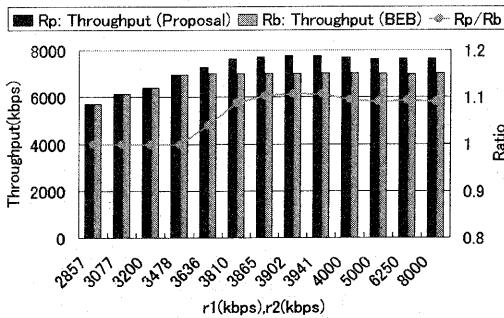


図 11 メディアスループット (シナリオ 1)

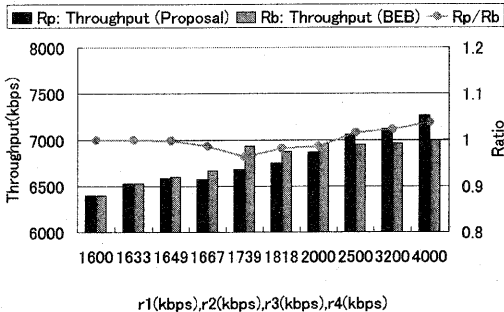


図 12 メディアスループット (シナリオ 3)

5. ま と め

本稿では、無線 LAN における QoS サポートの研究動向を踏まえ、多様な QoS サポートの実現が見込まれる将来の無線 LAN におけるサービス形態を示し、その無線 LAN サービスにおいて遅延の公平性及び差別化が必要であることを述べた。その上で、遅延の公平性及び差別化に利用できる分散型待ち時間制御手法を示した。

本手法では、BEB により決定されたバックオフ値を、待ち時間の大きなフロー程小さくなるように再設定することで、待ち時間の公平性を実現した。また、制御パラメータとして、待ち時間の変わりに待ち時間を各フローの重みで割った値を採用することで、待ち時間の重み付けも実現した。

更に、シミュレーションにより本手法の評価を行った。その結果、本手法は待ち時間の公平性が実現され

ること及び、差別化には十分な精度で待ち時間の重み付けが可能であることが示された。また、BEB と同等のメディアスループットを実現できることも示された。

文 献

- [1] IEEE. *IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999 edition, 1999.
- [2] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, and Prescott T. Sakai. Investigation of the IEEE 802.11 medium access control (MAC) sublayer functions. In *Proceedings of IEEE INFOCOM'97*, pp. 126-133, Kobe, Japan, April 1997.
- [3] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, and Prescott T. Sakai. IEEE 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No. 9, pp. 116-126, September 1997.
- [4] Constantine Coutras, Sanjay Gupta, and Ness B. Shroff. Scheduling of real-time traffic in IEEE 802.11 wireless LANs. *ACM Wireless Networks*, Vol. 6, No. 6, pp. 457-466, December 2000.
- [5] Malathi Veeraraghavan, Nabeel Cocker, and Tim Moors. Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2001 Conference*, pp. 488-497, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.
- [6] 齋藤一賢, 井上保彦, 飯塚正孝, 守倉正博. 優先制御を用いたイーサネット系無線 LAN 通信品質制御方法. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-B, No. 9, pp. 1598-1612, September 2001.
- [7] Michael Barry, Andrew T. Campbell, and Andras Veres. Distributed control algorithms for service differentiation in wireless packet networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2001*, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.
- [8] Andras Veres, Andrew T. Campbell, Michael Barry, and Li-Hsiang Sun. Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications (JSAC), Special Issue on Mobility and Resource Management in Next-Generation Wireless Systems*, Vol. 19, No. 10, pp. 2081-2093, October 2001.
- [9] Joao L. Sobrinho and A. S. Krishnakumar. Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer. *Lucent Technologies Bell Labs Technical Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 172-187, Autumn 1996.
- [10] Greg Chesson, Wim Diepstraten, Maarten Hoeben, Aman Singla, Harold Teunissen, and Menzo Wentink. IEEE p802.11 wireless LANs EDCF proposed draft text. IEEE 802.11-01/131r1, March 2001.
- [11] Nitin H. Vaidya, Paramvir Bahl, and Seema Gupta. Distributed fair scheduling in a wireless LAN. In *Proceedings of ACM Mobicom 2000*, pp. 167-178, Boston, MA, USA, August 2000.