

推薦論文

## IEEE802.11DCF 端末との混在環境下における MAC Level Fairness 向上方式の提案

重安 哲也<sup>†1</sup> 松野 浩嗣<sup>†2</sup> 森永 規彦<sup>†1</sup>

広く普及する無線 LAN の標準規格である IEEE802.11DCF ではパケット衝突を効果的に低減させるために、バックオフアルゴリズムに BEB (Binary Exponential Back-off) 方式を採用している。BEB 方式は、簡単な制御で効果的にパケット衝突を低減させることができるが、高トラフィック環境下では端末間で送信機会の不公平を生じてしまう。そのため、この問題の解決を目的とした様々な方式が提案されている。しかしながら、それらの方式は BEB 方式に比べて公平性を向上させるトレードオフとしてスループットを低下させるという新たな問題を生じる。また、これに加えてこれらの方式は、ネットワーク中の全端末が同一の方式を採用するという前提で構成されるため、異なる方式を採用する端末が混在するネットワーク環境下においてその効果は期待できない。そこで、本論文では送信機会の不公平状態にある端末が自端末の状態に応じて適応的にパケットをバースト送信することで、スループットを低下させずに送信機会の公平性を向上できる WLPB (Weighted Limited Packet-Burst) 方式を提案する。また、提案方式の有効性を評価した計算機シミュレーション結果から、すでに一般に広く普及している IEEE802.11DCF 端末が混在する環境下においても、WLPB 方式を用いることにより公平度が向上することを明らかにしたので、これらについて報告する。

### Proposal of a Method for Improving MAC Level Fairness in the Coexisting Environment with Legacy IEEE802.11DCF Terminals

TETSUYA SHIGEYASU,<sup>†1</sup> HIROSHI MATSUNO<sup>†2</sup>  
and NORIHIKO MORINAGA<sup>†1</sup>

IEEE802.11DCF, which is the most widely used wireless LAN standard protocol, employs Binary Exponential Back-off (BEB) for reducing packet collisions. Although the BEB can effectively avoid packet collision by a simple mecha-

nism, transmission unfairness arises in high traffic environment. Then, a large number of algorithms aimed at reducing unfairness on BEB have been proposed. Most of those algorithms could increase fairness, but the problem is that it also decreases throughput performance. Another problem is that these algorithms have developed based on the assumption that all terminals equip the same algorithm. This paper proposes an adaptive method in which only terminals entering unfair states sequentially transmit several packets without reducing throughput performance. Computer simulations confirm that the proposed method works well to improve unfairness in a network even if the network contains both types of legacy IEEE802.11DCF terminals and terminals utilizing the proposed method.

#### 1. はじめに

通信システムにおいて、パケットの送信タイミングは MAC (Media Access Control) プロトコルによって決定される。単一のチャネルを複数端末で自律分散的に共有する場合には、複数端末の同時刻送信に起因するパケット衝突を避けて高いチャネル利用効率を達成すること、また、端末間で送信数の偏りなく公平に通信回線を使用することが MAC プロトコルに要求される。

さて、MAC プロトコルでは、衝突によりパケットが正しく受信されなかったことを検知した際は再送処理に移る。その際、再度の衝突を避けるために再送タイミングはバックオフアルゴリズムによって決定される。バックオフアルゴリズムは BEB (Binary Exponential Back-off)<sup>1)</sup> がよく使われている。現在、ノート PC をはじめとした携帯端末に実装される等、広く普及している無線 LAN システムの標準規格である IEEE802.11DCF<sup>2)</sup> の MAC プロトコルにおいても BEB が採用されている。

BEB では、衝突が繰り返し発生した場合はチャネルが高負荷状態であると判断し、バックオフ期間を決定するための乱数発生範囲である CW (Contention Window) を増加させる。逆に、送信が成功した場合はチャネルが低負荷であると判断し、CW を最小値に設定する。しかしながら、パケット衝突が頻発する高トラフィック時には端末間で CW の値の

<sup>†1</sup> 広島国際大学工学部

Faculty of Engineering, Hiroshima International University

<sup>†2</sup> 山口大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

本論文の内容は 2007 年 10 ~ 11 月のマルチメディア通信と分散処理ワークショップにて報告され、DPS 研究会前主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

ばらつきが大きくなり、端末間に送信機会の不公平状態を生じてしまう<sup>3)</sup>。

そのため、この問題を解決するために様々な方式が提案されている。MILD ( Multiplicative Increase and Linear Decrease )<sup>4)</sup> では、CW を BEB に比べて緩やかに増減させる方式を提案している。また、文献 5)、6) では、CW のばらつきをさらに小さくするために、端末間でバックオフカウンタの値を共有するバックオフカウンタコピー方式を提案している。

しかし、これらを含む多くの提案方式では、不公平状態を軽減させるトレードオフとしてスループット性能を低下させてしまうことが報告されている<sup>7)</sup>。そのため、文献 8)–11) では、不公平状態の軽減とスループット性能向上の両者を実現する方式についての提案が種々行われている。

ところが、これらすべての提案方式は、同一ネットワーク中の全端末が提案方式を実装するという前提に基づいて構成されている。すなわち、広く普及する IEEE802.11DCF 規格の端末と混在したネットワークではその効果を発揮できないことになる。

これは、これらの方式がバックオフアルゴリズムを改良することにより、不公平状態の軽減に対応していることに起因する。たとえば、文献 12) ではチャンネルのビジー期間、文献 11) はアイドル期間の長さに基づいてそれぞれ CW の値を選択する。また、ネットワーク中でアクティブ状態にある端末数<sup>13)</sup>、自端末に割り当てられた重み<sup>9)</sup>、もしくはそれ以外の基準<sup>8),10),14)</sup> で CW を決定する方式も提案されているが、総じて、送信機会を十分に得ている端末が大きな CW 値を選択しチャンネルのアイドル期間を増加させることで、その他の端末の送信機会を増加させるという、不公平な状態にある端末にとって受動的な解決策であるといえる。

そこで、本論文では、バックオフアルゴリズムを改良することで送信機会の不公平状態を改善する受動的な解決策ではなく、不公平状態にある端末が自端末の送信状況に応じて適応的かつ自発的に複数パケットをバースト送信する WLPB ( Weighted Limited Packet-Burst ) 方式を提案する。同方式を用いれば、不公平状態にある端末が能動的に自端末の不公平状態を軽減させる方式を採用するために、既存の IEEE802.11DCF 端末との混在環境下においても不公平状態の改善が期待できる。以降、本論文を次のように構成する。まず、BEB 方式の動作について述べた後に、BEB を採用する既存の IEEE802.11DCF において発生する送信機会の不公平状態について議論し、これを解決するために WLPB 方式を提案する。また、提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより明らかにし、7 章において本論文のまとめを述べる。

## 2. IEEE802.11DCF

### 2.1 IEEE802.11DCF における送信制御

図 1、図 2 に IEEE802.11DCF におけるフレーム形式、ならびに RTS/CTS 交換を行う場合の送信制御方式をそれぞれ示す。

IEEE802.11DCF において、送信要求の生じた端末は、まず、キャリアセンスによってチャンネルの使用状況を調査する。その結果、DIFS ( DCF Inter Frame Space ) 時間連続でチャンネルがアイドルであることを確認した場合は、バックオフタイマの減算を開始する。また、チャンネルがビジーであると判断された場合には、アイドルとなるまで待機する。

さて、このようにして送信端末はバックオフタイマの減算を行うが、同タイマが 0 となった際には、ただちに宛先端末に対して RTS を送信する。図 1 に示すように、RTS には宛先 ( RA ) と送信元アドレス ( TA ) が記録されており、RTS を受信した端末は宛先アドレスを確認し、自端末宛であれば CTS を返信する。その後、CTS を受信した送信端末は DATA の送信を開始する。

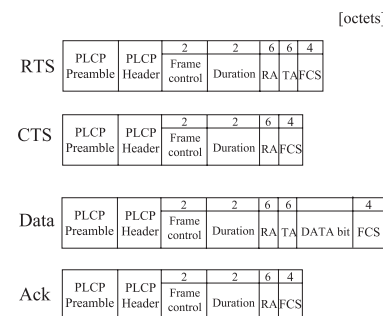


図 1 IEEE802.11 におけるフレームフォーマット  
Fig. 1 Frame formats of IEEE802.11.

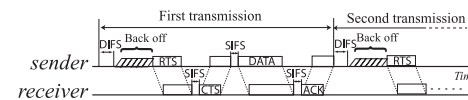


図 2 IEEE802.11DCF におけるパケット送信手続き  
Fig. 2 A packet transmission procedure of IEEE802.11DCF.

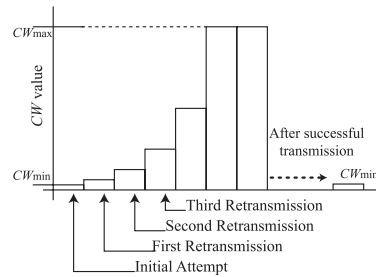


図 3 BEB における CW の制御方式  
Fig. 3 Control procedure of CW on BEB algorithm.

2.2 BEB (Binary Exponential Back-off) 方式

図 3 に IEEE802.11DCF においてバックオフアルゴリズムとして実装されている BEB 方式における CW の制御方式を示す。BEB では、CW 値以下の一様乱数を発生させ、これにスロット時間を乗じたものを送信延期（バックオフ）時間に設定する。CW は、以下に示す式のように、送信失敗時にはその値が 2 倍に設定されるが、送信成功時には最小値である  $CW_{min}$  に設定される（以下の式において、 $CW_{max}$  は CW の最大値を示している）。

送信成功時：

$$CW = CW_{min}$$

送信失敗時：

$$CW = \min(2CW + 1, CW_{max})$$

このように、BEB における CW は送信が連続的に失敗した際には、指数関数的に増加することが分かる。また、逆に、送信が成功した場合には、1 度に最小値に設定されてしまうため、パケットの衝突が頻繁に発生する高トラフィック時には端末間で送信機会の不公平が生じることが報告されている<sup>3)</sup>。

2.3 複数パケットの連続送信

前述のように、IEEE802.11DCF では、新たな送信を開始する端末は必ずチャネルが DIFS 時間アイドルであることを確認する必要がある。そのため、もし任意の端末がある送信を成功させた直後に、DIFS 時間よりも短い間隔で後続のパケットを送信すれば、その他の端末の送信に割り込まれることなく、1 度の送信機会で複数のパケットの送信を成功させることができる。

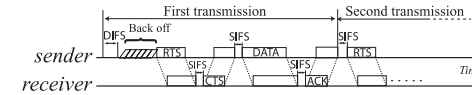


図 4 パケットの連続送信  
Fig. 4 Successive transmissions of packets.

本論文では、後述する提案方式において、任意の端末が複数パケットを連続送信する場合には、図 4 に示すように、2 回目以降の送信開始時に DIFS より短い SIFS (Short Inter Frame Space) 時間のアイドル時間を検出することで送信を開始するものとする。

3. IEEE802.11DCF における送信機会の不公平状態

BEB をバックオフアルゴリズムに規定している IEEE802.11DCF において発生する送信機会の不公平状態を計算機シミュレーションにより調査する。シミュレーション諸元は IEEE802.11b に従い表 1 に示すものとし、ネットワークポロジは図 5 に示すものを用いた。本評価では、隣接端末数の偏りから生じる送信機会の不公平状態の状況を調査するために同図のように端末の配置位置によってその隣接端末数が異なるモデルを使用している。ここで、図 5 において、(A)、(B)、(C) はそれぞれ端末 4、12、23 の通信範囲を示しており、これらから、ネットワーク中の端末は 2 から 4 の端末と隣接していることが確認できる。また、本章における評価実験では、端末間での隣接端末数の偏りに起因する不公平状態のみを調査するため、隣接端末数を除くすべてのパラメータは同じものを用いている。また、本論文におけるすべての評価では、すべてのデータは 1,000 回のシミュレーション結果の平均を示す。

3.1 帯域使用率

本論文では、端末レベルでの公平度を定量的に評価するためにネットワーク中の端末  $i$  の帯域使用率  $BW_i$  を次のように定義する。

$$BW_i = \frac{Th_i}{ABW_i} \tag{1}$$

ここで、 $Th_i$  ならびに  $ABW_i$  はそれぞれ端末  $i$  のスループットならびに割当て帯域幅とする。 $ABW_i$  は次式で導出する。

$$ABW_i = \begin{cases} Tr_i, & \text{if } Tr_i \leq MaxTh_i \\ MaxTh_i, & \text{if } Tr_i > MaxTh_i \end{cases} \tag{2}$$

表 1 計算機シミュレーション諸元  
Table 1 Simulation parameters.

Data Rate	11 Mbps
Communication Range	250 m
SIFS	10 $\mu$ sec
DIFS	50 $\mu$ sec
Slot	20 $\mu$ sec
Contention Window Size	Min: 31, Max: 1,023
MAC header	DATA: 24, RTS: 16, CTS, ACK: 10 (bytes)
Frame Check Sequence	4 bytes
PLCP header and preamble	192 $\mu$ sec
RTS threshold	0
Payload	512 bytes
Packet Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Terminals	50
Terminals Location	random

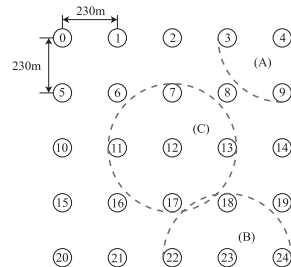


図 5 ネットワークトポロジ  
Fig. 5 Network topology.

ここで、 $Tr_i$  は端末  $i$  のトラフィックとし、 $MaxTh_i$  は端末  $i$  の理想的な状態における最大スループットとし次のように定義する。

IEEE802.11DCF では、1 パケットを送信するために要する時間 ( $T_{time}$ ) は図 6 に示すとおりとなる。したがって、チャンネルが衝突なく各端末によって理想的に使用される場合、チャンネルは図 6 を 1 周期とする状態が隙間なく繰り返されることとなる。また、そのような場合のチャンネルの最大スループット ( $MaxTh$ ) は次式から求めることができる。

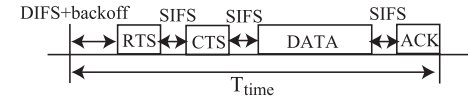


図 6 1 パケット送信に要する時間  
Fig. 6 Time length required to transmit one packet.

$$MaxTh = \frac{Data\ size}{T_{time}} \tag{3}$$

$$T_{time} = DIFS + \frac{CW_{min}}{2} + RTS_{duration} + SIFS + CTS_{duration} + SIFS + DATA_{duration} + SIFS + ACK_{duration} \tag{4}$$

さらに、端末  $i$  の隣接する端末数を  $N_i$  とし、端末  $i$  が隣接する端末と公平にチャンネルを共有するとした場合、 $MaxTh_i$  は次式のとおりとなる。

$$MaxTh_i = \frac{MaxTh}{N_i + 1} \tag{5}$$

### 3.2 Fairness Index

ネットワーク全体での端末間の送信機会の公平度を定量的に評価する指標として Fairness Index を使用する<sup>15)</sup>。Fairness Index  $f$  は、 $n$  をネットワーク中の端末数とし、 $BW_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) を端末  $i$  の帯域使用率とした場合、以下の式で算出できる。

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n BW_i)^2}{n \sum_{i=1}^n BW_i^2} \quad (1 \leq i \leq n) \tag{6}$$

上式において、 $f$  は 1 以下の値をとり、その値が 1 に近いほどネットワーク全体の公平度が高い状態にあることを示す。

### 3.3 送信機会の不公平状態の調査

図 7 に IEEE802.11DCF におけるトラフィック–Fairness Index 特性を計算機シミュレーションによって調査した結果を示す。同図から、高トラフィック環境下において Fairness Index が低下することが確認できる。また、Fairness Index はトラフィックが約 0.5 Mbps の場合に最低値をとることも確認できるが、この理由は次のように考えることができる。

まず、図 5 のトポロジにおいて、最もトラフィックが集中するエリアは端末 12 を中心とするエリア (C) となる。したがって、トラフィックが増加した際に最も早く輻輳状態となるのも同端末を中心としたエリアとなる。

さて、チャンネルが輻輳状態にあるエリアでは、パケットの衝突が頻繁に発生することで

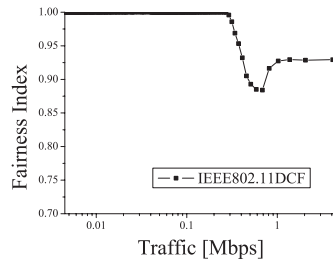


図 7 トラフィック-Fairness Index 特性  
Fig. 7 Characteristic of traffic-fairness index.

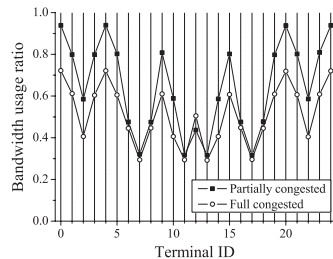


図 8 IEEE802.11DCF における帯域使用率  
Fig. 8 Bandwidth usage rates on IEEE802.11DCF.

端末の帯域使用率が低下する。しかし、隣接端末数が少ない端末、たとえば端末 0, 4, 20, 24 等を中心とするエリアではチャンネルに余裕があり、衝突による帯域使用率の低下は発生しない。結果として、これらの端末とエリア (C) 内の端末との間に帯域使用率の大きな差が生じることで Fairness Index が最も低下したと考えられる。

一方で、1 Mbps 以上のトラフィックでは Fairness Index は若干回復した後に一定値を示すことが確認できる。これは、すべてのエリアでチャンネルが輻輳状態となることで全端末の帯域使用率が低下し、端末間の帯域使用率の差が前述の場合と比べて小さくなるためであると考えられる。

次に、これらの 2 つの状況をそれぞれ Partially congested, Fully congested としてさらに深く調査した結果について述べる。図 8 は IEEE802.11DCF における各端末の帯域使用率を示している。同図の横軸は図 5 に対応する端末番号とし、縦軸はそれぞれの端末の帯

表 2 帯域使用率の平均値と分散  
Table 2 Average and variance of bandwidth usage rates.

	IEEE802.11DCF	
	Partially congested	Fully congested
平均値	0.645	0.513
分散	0.046	0.020

域使用率とした。なお、同結果から求めた帯域使用率の平均値と分散は表 2 に示す。

図 8 より、IEEE802.11DCF では端末間での帯域使用率に大きなばらつきが生じていることが確認できる。また、帯域使用率の平均値は Partially congested の場合が高くなっているものの、ばらつきを示す分散も大きくなっていることが確認できる。

#### 4. IEEE802.11DCF における不公平状態の軽減方式

本章では、スループットを低下させずに IEEE802.11DCF における送信機会の不公平状態を軽減させる LPB (Limited Packet-Burst) 方式を提案する。LPB 方式では、不公平状態にある端末が適応的に複数パケットをバースト送信することで、1 度の送信機会で複数のパケットを送信することを可能とする。そのため、LPB 方式はこれまでに提案された方式が採用する受動的な解決策とは異なり、不公平状態にある端末が自発的に自身の送信状態を改善する能動的な解決策であるといえる。

##### 4.1 不公平状態の判別式

LPB 方式では、ネットワーク中の端末  $i$  は自端末の帯域使用率  $BW_i$  と以下の式に基づいて自端末の不公平状態を判断する。

$$BW_i \begin{cases} > \alpha : & \text{Overrun} \\ = \alpha : & \text{Satisfied} \\ < \alpha : & \text{Unsatisfied} \end{cases} \quad (7)$$

さて、式 (2) より、高トラフィック時においては各端末が自端末の割当て帯域幅を衝突なくすべて理想的に使いきった場合に、低トラフィック時においては各端末に生じた送信パケットの送信がすべて成功した場合に  $BW_i$  はそれぞれ 1 となることから、 $0 \leq \alpha \leq 1$  とする。なお、 $\alpha$  については後述する。

##### 4.2 LPB 方式の制御方式

LPB 方式の制御方式を以下に述べる。

- (1) キャリアセンスの結果から新たな送信権を獲得した端末は標準の DCF 規格に従いパケットを送信する。
- (2) 上記の送信終了後、送信端末は自端末の送信状態を式 (7) により判断する。
- (3) 上記の判断結果から、自端末が *Satisfied* もしくは *Overrun* である場合は、端末はそのまま一連の送信手続きを終了する。逆に、*Unsatisfied* である場合には、次のステップへ進む。
  - (a) 自端末の送信バッファをチェックし、バッファにパケットが残っているかどうかに応じて次のいずれかを実行する。
    - バッファが空でない場合：バッファの先頭にあるパケットを SIFS 時間後に連続して送信する\*1。この送信の終了後、端末は上記のステップ (2) に戻る。
    - バッファが空である場合：端末は一連の送信手続きを完了する。

以上のように、LPB 方式では自端末が不公平な状態にあると判断した場合は、ACK 受信後に SIFS 時間で連続するパケットの送信を開始する。なお、この際の新たな送信時においても、RTS/CTS 交換により一定時間の送信を抑制する NAV (Network Allocation Vector) を周囲の端末に設定するため、隠れ端末の送信は抑制される。

#### 4.3 重み付き LPB (Weighted LPB)

前節において、LPB 方式は状態判別式 (7) に従うものと定義した。ここで、図 8 に示した状況に LPB 方式を適用した場合を例にあげて、状態判別式における閾値  $\alpha$  と LPB 方式の効果の関係について考える。

まず、 $\alpha$  と LPB 方式の効果の一般的な関係について考える。LPB 方式では帯域使用率が  $\alpha$  以下の場合にパースト送信を行うため、 $\alpha$  を高く設定することによりパースト送信数を増加させることができる。しかしながら、必要以上に高い値に設定すると、十分に送信機会を得ている端末までもがパースト送信することにより、ネットワークの公平度は逆に低下すると考えられる。これとは逆に、 $\alpha$  を低く設定した場合には、パースト送信数が減少するために、LPB 方式による公平度向上効果を得ることは難しくなる。

次に、チャンネル状態と  $\alpha$  の関係について考える。まず、ネットワークの一部でチャンネルが輻輳状態にある Partially congested では、十分に送信機会を得ている端末の帯域使用率

は非常に高い。そのため、 $\alpha$  を比較的高い値に設定した場合にも不公平状態にある端末のみにパースト送信させることができると考えられる。

しかしながら、ネットワーク中のすべてのエリアでチャンネルが輻輳状態にある Fully congested では、十分に送信機会を得ている端末の帯域使用率も Partially congested の場合と比べて大きく低下する。そのため、このような状況下で  $\alpha$  の値を必要以上に高く設定してしまうと不公平状態にある端末のみにパースト送信されることはできない。また、前述した理由により、単純に  $\alpha$  の値を低く設定するだけでも公平度向上効果は期待できない。そのため、Fully congested 状態では  $\alpha$  の値を注意深く選択しなければならない。

ところが、各端末の帯域使用率は隣接端末の配置状況に起因する衝突発生確率等に大きく影響を受けると考えられるため、LPB 方式を異なる複数のネットワークに適用するには、各ネットワークトポロジに応じた  $\alpha$  の値を選択する必要がある。当然ながら、この適切な値はトポロジごとに実測によって決定することもできるが、すべてのネットワークトポロジに対して実測を行うことは現実的ではない。

そこで、この問題を解決するために、本節では重み付き LPB (WLPB) 方式を提案する。WLPB では、隣接端末数の偏りに応じて不公平状態の判別条件を変化させる。隣接端末数に偏りがある場合、たとえば図 5 において互いに隣接する端末 5 と 6 では、端末 5 は 6 に比べて隣接端末数が少ない。そのため、端末 5 は 6 に比べて少ない端末との競合で容易に送信権を確保できると考えられる。したがって、WLPB では不公平状態に陥りやすいと考えられる端末 5 にはパースト送信を多く許可するために高い閾値を、そうでない端末 6 に対しては、逆に低い閾値を設定する。

このように WLPB では、単一の閾値ですべての端末のパースト送信数を制御する LPB とは異なり、不公平状態にある端末とそうでない端末に対し、それぞれ異なる閾値によってパースト送信数を制御することで、トポロジの変化による影響を受けにくくした方式であるといえる。

さて、WLPB をネットワークに適用するためには端末配置の偏りを把握することが必要となるが、MAC 層のみの情報でネットワーク全体のトポロジを把握することは困難である。また、トポロジを把握するための新たな制御パケットを導入してしまうと、IEEE802.11DCF のみを採用する端末との互換性を失ってしまう。そのため、WLPB では隣接端末が送信するパケットの傍受のみにより隣接端末数の偏りを推測する。

具体的には、ネットワーク中の端末  $i$  は自端末と隣接する端末と接続する隣接端末数を調査し、平均隣接端末数 ( $AvgN_i$ ) を算出する。 $AvgN_i$  は、隣接端末の RTS, DATA を傍受することにより調査する。図 1 に示したように、RTS, DATA のヘッダには宛先ならびに

\*1 2.3 節にも述べたとおり、新たなパケットの送信開始前に待機する期間を DIFS から SIFS に変更することにより、1 度送信権を確保した端末はその他の端末の送信に割り込まれることなく複数パケットを連続して送信することが可能となる。

送信元アドレスが記載されている．そのため，たとえば，図 5 の端末 23 は端末 18 が送信する RTS (DATA) のヘッダ情報から端末 18 の隣接端末数が 4 であるを知ることができる．

次に，端末  $i$  は  $N_i$  と  $AvgN_i$  を比較し， $N_i < AvgN_i$  が成り立つ場合には，状態判別式として，式 (7) に代えて以下の式 (8) を使用することとする．

$$BW_i \begin{cases} > \frac{\alpha}{2} : \text{Overrun} \\ = \frac{\alpha}{2} : \text{Satisfied} \\ < \frac{\alpha}{2} : \text{Unsatisfied} \end{cases} \quad (8)$$

なお，式 (7) と同様に  $0 \leq \alpha \leq 1$  とする．

以上のようにして，WLPB は隣接端末数の偏りから生じる送信機会の不公平状態を軽減させる．

## 5. 計算機シミュレーション

本論文での提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより評価する．なお，本論文における評価では，端末は移動しないものとした．また，各端末には指数分布に従ってランダムに送信パケットが発生するものとし，その際の平均パケット発生間隔はシミュレーション時間に依存せず一定とした．

### 5.1 LPB 方式と WLPB 方式の適用効果と閾値 $\alpha$ に関する性能評価

本節では，LPB 方式と WLPB 方式の適用による影響と閾値  $\alpha$  の関係について評価する．ここでは，IEEE802.11DCF，LPB，WLPB の 3 方式について評価する．また，LPB 方式については閾値  $\alpha$  を 1.0 から 0.25 まで 0.25 ずつ変化させた計 4 種類の結果について報告する．結果を示すグラフでは，これらは LPB( $\alpha$ ) と記述する．

なお，WLPB については，公平端末と不公平端末の両者に適用される閾値の差が最も大きくなるように  $\alpha = 1$  と設定した場合の結果について報告する．

#### 5.1.1 トラフィック変動に対する閾値 $\alpha$ の影響

ここでは，図 5 と同じトポロジにおいてトラフィック変動に対する性能の変化を評価する．まず，トラフィック変動に対する Fairness Index 特性を評価した結果を図 9 に示す．

さて，3.3 節における議論と同様にネットワーク中の一部でトラフィックが輻輳状態となる 0.5 Mbps 近辺の場合を Partially congested とし，ネットワーク中のすべてが輻輳状態となるトラフィックが 1 Mbps 以上の場合を Fully congested とする．図 9 から，4.3 節の議論と同様

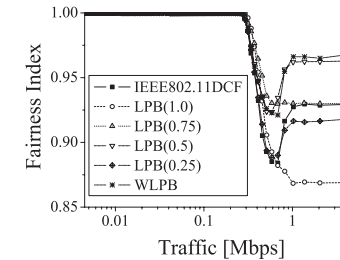


図 9 トラフィック変動と閾値の値が Fairness Index に及ぼす影響  
Fig. 9 Effects of threshold value and traffic condition on fairness index of LPB and WLPB.

に，Partially congested では，すべての方式は IEEE802.11DCF と同等以上の公平度を達成していることが分かる．これに対し，ネットワークのすべてが輻輳状態となる Fully congested では，LPB(0.5) と WLPB は，IEEE802.11DCF よりも大きく公平度が向上しているが，それ以外の方式の IEEE802.11DCF に対する優位性は同等もしくは低下することが分かる．この理由は次のように考えられる．まず， $\alpha$  を必要以上に高い 1.0 と設定した場合は，不公平状態にない端末までもがバースト送信を行うことにより，公平度が低下したと考えられる．

また，これとは逆に  $\alpha$  を必要以上に低い 0.25 と設定した場合にも公平度が低下していることが確認できるが，この理由は次のように考えられる． $\alpha$  を必要以上に低く設定した場合にバースト送信を行うのは，不公平状態にある端末の中でも，特に帯域使用率が低い端末のみとなる．任意の DATA 送信前には RTS/CTS 交換が行われるが，この際の CTS は最大で送信端末から 2 ホップ先の端末が傍受することになる．つまり，不公平状態にある端末であっても，帯域使用率が 0.25 以上である端末はバースト送信による送信回数増加を期待できないが，2 ホップ以内にフレームバーストを行う端末が存在する場合は，その端末の RTS/CTS 交換の影響により LPB 適用によりさらに送信数が低下したと考えられる．

次に図 10 に示すスループット特性を調査した結果に着目する．同図においてもやはり，Fully congested 状態において結果に大きな差を生じていること，また，LPB(0.5) 以外のすべての結果は IEEE802.11DCF と同等以上の性能を示していることが確認できる．

#### 5.1.2 ネットワーク規模に対する閾値 $\alpha$ の影響

ここでは，ネットワーク規模の変化に対する性能の変化を評価する．前項では，図 5 と同じ， $5 \times 5$  端末のメッシュトポロジで評価を行ったが，本評価では 1 辺を  $n$  とする， $n \times n$  端末のメッシュトポロジでの結果を評価する．ここで，端末間の距離は図 5 と同じ 230 m とした．

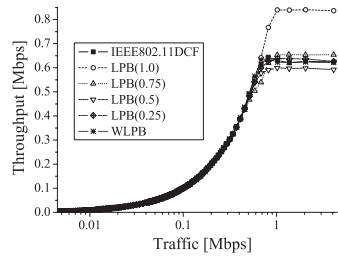


図 10 トラフィック変動と閾値の値がスループット特性に及ぼす影響

Fig. 10 Effects of threshold value and traffic condition on throughput performance of LPB and WLPB.

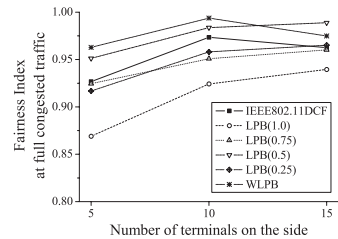


図 11 端末数と閾値の値が Fairness Index に及ぼす影響

Fig. 11 Effects of threshold value and number of terminals on fairness index of LPB and WLPB.

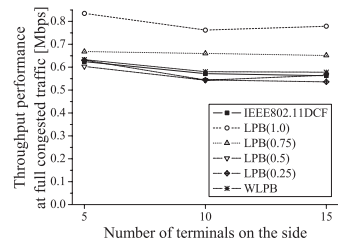


図 12 端末数と閾値の値がスループット特性に及ぼす影響

Fig. 12 Effects of threshold value and number of terminals on throughput performance of LPB and WLPB.

図 11, 図 12 に Fairness Index 特性ならびに, スループット特性をそれぞれ示す. なお, 前項の結果をふまえ, 両図では閾値の違いによる性能の差が最も大きくなる Fully con-

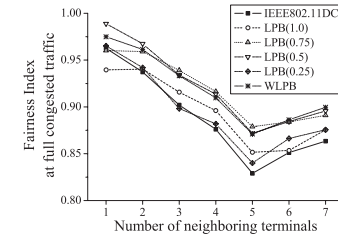


図 13 隣接端末数と閾値の値が Fairness Index に及ぼす影響

Fig. 13 Effects of threshold value and number of neighboring terminals on fairness index of LPB and WLPB.

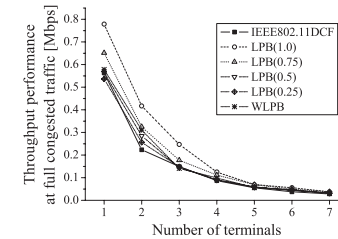


図 14 隣接端末数と閾値の値がスループット特性に及ぼす影響

Fig. 14 Effects of threshold value and number of neighboring terminals on throughput performance of LPB and WLPB.

gested における結果を示している. 両図に示す結果より, WLPB はすべての端末数において IEEE802.11DCF に対してつねに優れた公平度ならびに同等以上のスループット特性を示していることが確認できる.

### 5.1.3 隣接端末数に対する閾値 $\alpha$ の影響

ここでは, 隣接端末数の変化に対する性能の変化を評価する. 前項までの評価では, 端末間距離は 230 m としていたが, これは, すべての端末が隣に配置された直近の端末のみと直接通信が可能な状況であった. そこで, 本評価では端末間距離を小さくすることにより, 直接通信可能な端末数を変化させた. なお, より多くの条件下で評価を行うために, ネットワークは 1 辺を 15 端末とする計 225 端末から構成されるメッシュトポロジとした.

図 13, 図 14 に Fairness Index 特性ならびに, スループット特性をそれぞれ示す. なお, 両図の横軸は, 任意の端末を起点とし, 最大何端末先までの端末と直接通信が可能であるか



を示している。つまり、横軸の値が7である状況は、 $15 \times 15$  端末のネットワークの中心に位置する端末は直線上の片側7 端末、両側に位置する全 14 端末と直接通信が可能である状態を示している。

さて、両図に示す結果からも、5.1.2 項と同じく、WLPB はすべての隣接端末数において IEEE802.11DCF に対して優れた公平度ならびに同等以上のスループット特性を示していることが確認できる。

さて、以上に述べた 5.1 節の議論から、IEEE802.11DCF に対しての優位性の多少の違いはあるものの、すべての条件下において  $\alpha = 1$  と設定した WLPB は IEEE802.11DCF よりも優れた公平度ならびに同等以上のスループット特性を示すことを確認した。

## 5.2 メッシュトポロジにおける既存方式との性能比較

本節では、IEEE802.11 における送信機会の不公平性を改善するとしてすでに提案されている方式と本論文で提案を行った方式をメッシュトポロジ上で性能比較した結果について報告する。なお、本評価では、前節での評価実験の結果で高い性能を示した WLPB 方式をその他の既存方式と比較する。

既存方式には、スループット向上ならびに送信機会の不公平性の改善をともに達成できるとして提案された FCR (Fast Collision Resolution) 方式<sup>16)</sup> と、隠れ端末が存在するマルチホップ環境下における送信機会の公平性を改善するとして提案された DFWMAC (Distributed Foundation Wireless Medium Access Control) 方式<sup>17)</sup> の2 方式を取り上げた。

### 5.2.1 FCR, DFWMAC 方式の概要

#### 5.2.1.1 FCR 方式

FCR 方式では、スループットを向上させるために、自端末のバックオフタイムが必要以上に長いと判断した場合は同タイムを急速に減算し、短時間で送信可能となるよう制御する。具体的には、通常、FCR においてバックオフ手続き中の端末は、IEEE802.11DCF と同様に、チャンネルのアイドルを検知した場合は1 スロットずつバックオフタイムを減算するが、チャンネルが  $CW_{min} \times 2$  スロット以上連続してアイドル状態である場合には、アイドルを検知するたびにバックオフタイムを半分に減算する。逆に、バックオフ手続き中に新たな送信を検知した場合にはチャンネルが高トラフィック状態にあると判断し、衝突確率を軽減させるために自端末のバックオフタイムを2 倍に設定する。

また、FCR は送信成功時には IEEE802.11DCF と同様に CW を最小値に設定するが、IEEE802.11DCF のように一部の端末のみが連続して送信することでチャンネルを独占するこ

とを防ぎ、送信機会の不公平性を改善するために、Successive Packet Transmission limit を新たに設定し、連続送信成功回数がこの設定値を超えた端末に対しては、強制的に CW を最大値に設定し、同端末の次の送信時間を大幅に延期させる。

#### 5.2.1.2 DFWMAC

DFWMAC 方式では、マルチホップ環境下における送信機会の公平性を改善するために、自端末と隣接端末のチャンネルの使用時間を計測する。その結果、自端末のチャンネルの使用時間が少なければ CW を半分に減じ、そうでなければ CW を2 倍の値に増加させることで端末間でのチャンネル使用時間の公平性を向上させる。ここで、チャンネル使用時間を算出する際に、隠れ端末の存在に配慮するために、隣接端末から送信される CTS を傍受することで得られる情報を利用して、隣接端末と隠れ端末の送受信に費やされるチャンネル使用時間を推測する。

このように、DFWMAC では、チャンネル使用時間の公平性を向上させることができるが、CW の値は、チャンネルのトラフィック状態とは無関係に、自端末と隣接端末のチャンネル使用時間の大小関係のみによって増減されるため、高トラフィック環境下ではバケットの衝突を頻繁に発生させてしまう。

#### 5.2.2 計算機シミュレーション

図 15 に、図 5 のメッシュ型トポロジにおける帯域使用率を評価した結果を示す。評価は IEEE802.11DCF, LPB, WLPB の3 方式を対象とし、シミュレーション諸元は表 1 と同じものを用い、すべてのエリアでチャンネルが輻輳している状態とした。なお、FCR のみ

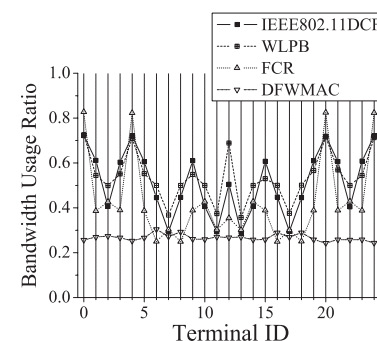


図 15 メッシュトポロジにおける帯域使用率  
Fig. 15 Bandwidth usage rates on mesh topology.

に適用される Successive Packet Transmission limit は文献 16) と同じ値である 10 に設定した。

図 15 に示す結果より、帯域使用率が大幅に低下する DFWMAC 方式を除く 3 方式では、WLPB 方式の端末間での帯域使用率のばらつきが最も小さいことが確認できる。

これに対し、FCR では帯域使用率の最大値と最小値の差が IEEE802.11DCF に比べ逆に大きくなっていることが分かる。この理由は次のように考えられる。FCR では、端末間での隣接端末数の偏りへの対応はプロトコル上特に考慮されておらず、送信機会の公平化に関しては、前述のように単に連続送信パケット数のみで制限している。これに加え、FCR ではアイドルスロットが連続する場合、急速にバックオフタイムが減少するが、隠れ端末等のキャリアセンスが行き届かない端末がパケットを送信している場合でもキャリアを検知しなければ急激にバックオフタイムは減少する。結果として、隠れ端末の送信回数が高トラフィック時には、IEEE802.11DCF 以上に端末間での送信機会の公平性が悪化したと考えられる。

また、DFWMAC では、端末間の大きなばらつきを生じていないが、IEEE802.11DCF と比べて大幅に帯域使用率が小さくなっていることが確認できる。これは、前述のように、DFWMAC はトラフィック状態とは無関係に CW の値を増減させるために、チャンネルが輻射している状態ではこのような制御方式ではパケット衝突を頻発させてしまい、結果としてすべての端末の帯域使用率が低下してしまったと考えられる。

さて、表 3 に 4 方式における帯域使用率の平均値と分散を示す。この結果からも、帯域使用率の平均値が大幅に低下する DFWMAC 方式を除く 3 方式において端末間の帯域使用率の分散は WLPB が最小となっていることが確認できる。

次に、様々なトラフィック状態における公平性の変化を明らかにするために、トラフィック-Fairness Index 特性を図 16 に示す。同図において、横軸はネットワーク中のすべての端末に生じたトラフィックの総和としている。同図に示す結果より、すべての方式は高トラフィック時において大きく Fairness Index が低下することが確認できる。また、どのようなトラフィック量が発生している場合にも WLPB と DFWMAC はその他の方式に比べてつねに高い公平度を示していることが確認できる。

図 17 にトラフィック-スループット特性を示す。同図の結果から、WLPB 方式は、既存方式である IEEE802.11DCF とつねに同等のスループット性能を有することが確認できる。これとは逆に、図 16 において、高い Fairness Index 特性を示していた DFWMAC のスループット特性は IEEE802.11DCF と比べて大きく低下していることも確認できる。

表 3 3 方式の帯域使用率の平均値と分散

Table 3 Average and variance of bandwidth usage rates on three methods.

	IEEE802.11DCF	WLPB	FCR	DFWMAC
平均値	0.514	0.537	0.417	0.267
分散	0.022	0.012	0.022	0.0002

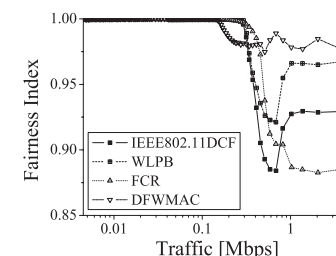


図 16 メッシュトポロジにおけるトラフィック-Fairness Index 特性

Fig. 16 Characteristics of traffic-fairness index performance on mesh topology.

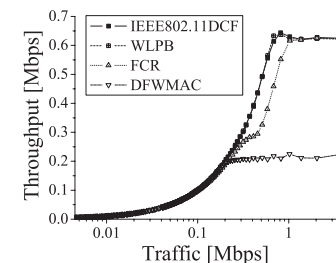


図 17 メッシュトポロジにおけるトラフィック-スループット特性

Fig. 17 Characteristics of traffic-throughput performance on mesh topology.

以上の結果から、WLPB 方式は IEEE802.11DCF と比べてスループットを低下させることなく、効果的にネットワーク全体の送信機会の公平度を向上させることができることが分かる。

### 5.3 IEEE802.11DCF 端末との混在環境下における性能評価

本節では、不公平状態改善方式である WLPB, FCR, DFWMAC の 3 方式がそれぞれ既存の IEEE802.11DCF 端末と混在するネットワーク環境下において性能を評価した結果について報告する。具体的には、25 端末を 1,000 m × 1,000 m のフィールド上にランダム

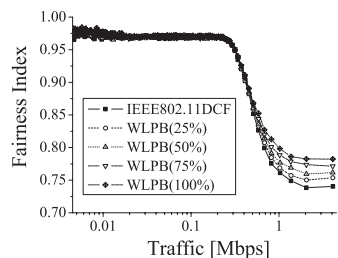


図 18 WLPB と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-Fairness Index 特性

Fig. 18 Characteristics of traffic-fairness index performance under the coexisted topology with WLPB and IEEE802.11.

に配置し、IEEE802.11DCF 端末がネットワーク上に混在する状況について調査した。

本節におけるグラフに示す 1 プロットのデータはこれまでと同様に 1,000 回のシミュレーション結果の平均値としている。なお、計算機によってランダム配置された端末の平均隣接端末数は 3.762 であり、隣接端末数の分散は 3.960 であった。また、以降で示す図表中において、方式名 ( $x\%$ ) と示した場合は、同方式を採用する端末の存在割合が  $x\%$ であることを示している。具体的には、WLPB( $x\%$ ) は、ネットワーク中に占める WLPB 方式を採用する端末の割合が  $x\%$ であることを示すと同時に、 $100 - x\%$ の端末は IEEE802.11DCF 方式を採用する端末であることを示している。

まず、図 18 に WLPB 方式と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-Fairness Index 特性を示す。同図に示す結果より、ネットワーク中にどのような割合で WLPB 方式が存在した場合にも、IEEE802.11DCF 端末のみから構成されるネットワークと比べて Fairness Index が向上することが分かる。また、WLPB 方式の割合が増加するに従い、Fairness Index の値も高くなること分かる。

次に、図 19 に WLPB 方式と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-スループット特性を示す。同図からも、どのような割合で WLPB 方式を採用する端末が存在した場合にも、IEEE802.11DCF のみのネットワークと同等以上のスループット性能が確保できていることが確認できる。また、表 4 に示す帯域使用率の平均値からも、WLPB の帯域使用率の平均は低下していないことが確認できる。

図 20、図 21 に FCR と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-Fairness Index 特性ならびにトラフィック-スループット特性をそれぞれ示す。図 20 より、FCR のみでネットワークが構成される場合を除き、すべての混在割合の結果において FCR が混在すること

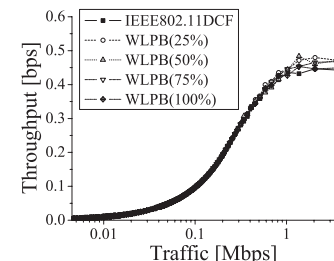


図 19 WLPB と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-スループット特性

Fig. 19 Characteristics of traffic-throughput performance under the coexisted topology with WLPB and IEEE802.11.

表 4 WLPB と IEEE802.11DCF が混在する場合の帯域使用率の平均値

Table 4 Average of bandwidth usage rates under the coexisted topology with WLPB and IEEE802.11DCF.

	IEEE802.11	WLPB			
		25%	50%	75%	100%
平均値	0.721	0.722	0.722	0.734	0.740

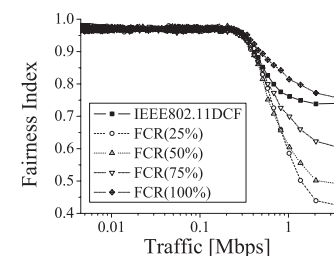


図 20 FCR と IEEE802.11DCF が混在する場合のトラフィック-Fairness Index 特性

Fig. 20 Characteristics of traffic-fairness index performance under the coexisted topology with FCR and IEEE802.11DCF.

により IEEE802.11 のみのネットワークよりも Fairness が低下することが確認できる。また、これとは逆に、図 21 から、FCR のみで構成される場合以外のネットワークではスループットが上昇していることが確認できるが、Fairness 特性の改善ならびに IEEE802.11 と同等以上のスループットを両者ともに満たすことができないと確認できる。

表 5 に示す帯域使用率の平均値から、FCR の存在割合が高いネットワークの帯域使用率

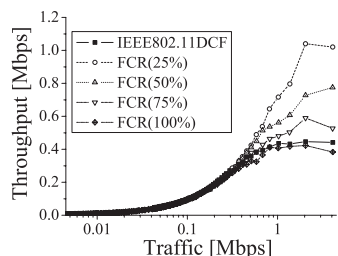


図 21 FCR と IEEE802.11DCF が混在する場合のトラフィック-スループット特性

Fig. 21 Characteristics of traffic-throughput performance under the coexisted topology with FCR and IEEE802.11DCF.

表 5 FCR と IEEE802.11DCF が混在する場合の帯域使用率の平均値

Table 5 Average of bandwidth usage rates under the coexisted topology with FCR and IEEE802.11DCF.

	IEEE802.11		FCR		
		25%	50%	75%	100%
平均値	0.721	0.688	0.652	0.582	0.387

が小さいことが分かる。これは、図 21 に示す結果と相反する結果であるかのように見受けられるが、この理由は次のように考えられる。

式 (1) に示した帯域使用率の定義では、その値は各端末の隣接端末数を考慮した割当て帯域幅 ( $ABW_i$ ) に対する各端末のスループットであるとした。そのため、実際の端末スループットが低い端末であっても、隣接端末数が多ければその端末の帯域使用率は大きくなる。したがって、図 21 ならびに表 5 に示した結果のように、ネットワーク全体のスループットが高いにもかかわらず、帯域使用率の平均値が低い理由は、FCR が混在するネットワークは、IEEE802.11 のみで構成されるネットワークと比べて、割当て帯域幅の小さい端末（隣接端末数の多い端末）の帯域使用率が小さく、また、割当て帯域幅の大きな端末（隣接端末数の少ない端末）の帯域使用率が比較的大きかったためであると考えられる。このことは、送信機会の公平度を示した図 20 の結果において、FCR の混在するネットワークでは Fairness Index が低下していることから確認できる<sup>\*1</sup>。

\*1 4.3 節にも述べたとおり、隣接端末数の少ない端末はもともと送信権を獲得しやすい端末であるといえるが、そのような端末が FCR 適用によってさらに多くの送信機会を得ることによって Fairness Index が低下したと考えられる。

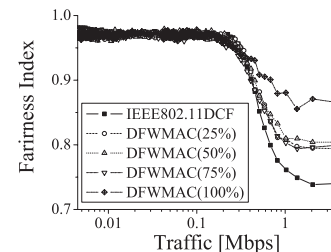


図 22 DFWMAC のランダムトポロジにおけるトラフィック-Fairness Index 特性

Fig. 22 Characteristics of traffic-fairness index performance on random topology of DFWMAC.

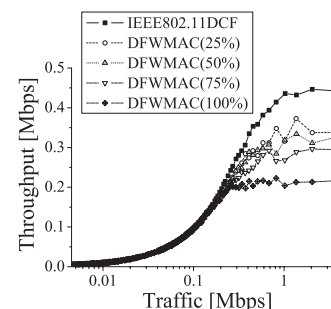


図 23 DFWMAC のランダムトポロジにおけるトラフィック-スループット特性

Fig. 23 Characteristics of traffic-throughput performance on random topology of DFWMAC.

図 22、図 23 に DFWMAC と IEEE802.11 が混在する場合のトラフィック-Fairness Index 特性ならびにトラフィック-スループット特性をそれぞれ示す。

まず、図 22 に示す結果からは、DFWMAC がどのような条件で混在する場合にも IEEE802.11 のみで構成されるネットワークよりも高い Fairness を達成できることが確認できる。しかしながら、図 23 に示す結果から、DFWMAC が混在する場合には、どのような場合にも IEEE802.11 に比べてスループットが低下してしまうことも確認できる。これらから、前述の FCR の場合と同じく、DFWMAC が既存方式と混在する環境下では、Fairness 特性の改善ならびに IEEE802.11 と同等以上のスループットを両者ともに満たすことができないと確認できる。

表 6 に帯域使用率の平均値を示す。なお、同表に示す帯域使用率の平均値と図 23 に示すスループットの大小関係が相反するよう見受けられるが、その理由は、前述の表 5 なら

表 6 DFWMAC と IEEE802.11DCF が混在する場合の帯域使用率の平均値

Table 6 Average of bandwidth usage rates under the coexisted topology with DFWMAC and IEEE802.11DCF.

	IEEE802.11		DFWMAC		
		25%	50%	75%	100%
平均値	0.517	0.690	0.6530	0.592	0.385

びに図 21 の場合と同じであると考えられる。

さて、本節に示した以上の結果より、IEEE802.11DCF 端末と混在するネットワーク環境下においても、WLPB 方式はその他の既存方式に比べて高い性能を発揮することが確認できるが、その理由は、WLPB 方式は従来の不公平状態にある端末にとって受動的な改善方式と異なり、不公平状態にある端末が、複数パケットの連続送信により自端末の不公平状態を能動的に解消するという方式を採用するためであると考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11DCF のバックオフアルゴリズムとして広く採用されている BEB 方式に起因する送信機会の不公平状態の発生を軽減させる方式について議論した。論文では、まず、IEEE802.11DCF における送信機会不公平状態の発生状況を調査した結果から、WLPB 方式の提案を行った。

WLPB 方式の有効性を評価するために行った計算機シミュレーション結果から、同方式は IEEE802.11DCF と比べてスループットを低下させることなく、効果的に送信機会の公平度を向上させることができることを明らかにした。さらに、WLPB 方式は送信機会の不公平状態にある端末が能動的に自身の状態を改善するという方式を採用しているため、IEEE802.11DCF 端末が混在するネットワークにおいても、その効果を発揮することを明らかにした。

さて、本論文ではすべての端末に等しく送信機会を与える方法について検討を行ったが、連続送信の適用は不公平状態の判別式を用いて行っていることから、この値を変更することにより、端末ごとに異なる送信帯域を割り当てることも可能である。そのため、マルチホップ通信を行う際に、複数ネットワークに接続するゲートウェイ端末や多くの通信フローの中継経路に選択される端末により多くの送信機会を適応的に割り当てるといった際にも WLPB 方式を利用することは可能であると考えられる。

したがって、本論文では WLPB 方式を MAC 層、すなわちリンクレベルの不公平状態

を解消する方式としてのみ議論したが、今後は、同方式を応用することで、リンクレベルと通信フローレベルの双方の公平性を実現する方式としてさらなる検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究 (B) (No.18700075) の援助を受けている。

## 参考文献

- 1) Shenker, S.: Some Conjectures on the Behavior of Acknowledgement-Based Transmission Control of Random Access Communication Channels, *Proc. ACM SIGMETRICS*, pp.245–255 (1987).
- 2) Editors of IEEE802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Draft Standard, IEEE802.11 (1997).
- 3) Koksa, C., Kassab, H. and Balakrishnan, H.: An Analysis of Short-Term Fairness in Wireless Media Access Protocols, *Proc. ACM SIGMETRICS 2000*, pp.118–119 (2000).
- 4) Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S. and Zhang, L.: MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs, *Proc. ACM SIGCOMM '94*, pp.212–225 (1994).
- 5) Ozugur, T., Nagshineh, M., Kermani, P., Olsen, C., Rezvani, B. and Copeland, J.: Balanced Media Access Methods for Wireless Networks, *ACM MOBICOM*, pp.21–32 (1998).
- 6) Ozugur, T., Nagshineh, M., Kermani, P. and Copeland, J.: Fair Media Access for Wireless LANs, *IEEE GLOBECOM'99*, pp.570–579 (1999).
- 7) Nandagopal, T., Kim, T., Gao, X. and Bharghavan, V.: Achieving MAC Layer Fairness in Wireless Packet Networks, *Proc. ACM MobiCom'00*, pp.87–98 (2000).
- 8) Peng, Y., Wu, H., Cheng, S. and Long, K.: A New Self-adapt DCF Algorithm, *IEEE GLOBECOM'02*, Vol.1, pp.87–91 (2002).
- 9) Qiao, D. and Shin, K.: Achieving Efficient Channel Utilization and Weighted Fairness for Data Communications in IEEE802.11 WLAN under the DCF, *The 10th IEEE International Workshop on Qos*, pp.227–236 (2002).
- 10) Bruno, R., Chaudet, C., Conti, M. and Gregori, E.: A Novel Fair Medium Access Control for 802.11-based Multi-Hop Ad hoc Networks, *The 14th IEEE LAN-MAN2005*, in CD-ROM 6 pages (2005).
- 11) Kwon, Y., Fang, Y. and Latchman, H.: A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs, *IEEE INFOCOM'03*, pp.853–862 (2003).
- 12) Tian, X., Chen, X., Ideguchi, T. and Fang, Y.: Improving Throughput and Fairness in WLANs through Dynamically Optimizing Backoff, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E88-B, No.11, pp.4328–4338 (2005).
- 13) Cali, F., Conti, M. and Gregori, E.: Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol

to Achieve a Theoretical Throughput Limit, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.8, No.6, pp.785-799 (2000).

- 14) Xiao, Y., Zhang, L., Shan, X., Ren, Y. and Ma, Z.: Neighbor-Medium-Aware MAC Protocol with Fairness for Wireless Ad Hoc Networks, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E87-B, No.9, pp.2738-2746 (2004).
- 15) Jain, R., Chiu, D.D. and Hawe, W.D.: A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems, Technical Report DEC-TR-301, Digital Equipment Corporation (1984).
- 16) Kwon, Y., Fang, Y. and Latchman, H.: Performance Analysis for a New Medium Access Control Protocol in Wireless LANs, *Wireless Networks*, Vol.10, No.5, pp.519-529 (2004).
- 17) Wang, Y. and Beansaou, B.: Achieving Fairness in IEEE802.11 DFWMAC with Variable Packet Lengths, *IEEE GLOBECOM'01*, Vol.6, pp.3588-3593 (2001).

(平成 20 年 2 月 6 日受付)

(平成 20 年 12 月 5 日採録)

## 推薦文

本論文は、IEEE802.11DCF の MAC レベルの公平性を改善するバックオフアルゴリズムとして、WLPB (Weighted Limited Packet-Burst) を提案している。WLPB は、十分なスループットが得られていない端末が連続してフレームを送信することにより、不公平状態を軽減させるように動作する。積極的な公平性向上策をとる方式の新規性は高く、また本論文では、シミュレーションにより従来方式の端末と混在する環境においても有効性が示されており、推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会前主査 櫻井紀彦)



重安 哲也 (正会員)

平成 12 年山口大学理学部自然情報学科卒業。平成 14 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 14 年広島国際大学社会環境科学部助手、平成 19 年同大学工学部助教。無線通信プロトコルに関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会各会員。



松野 浩嗣 (正会員)

昭和 57 年山口大学工学部電子工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院修士課程修了。昭和 59~62 年山口短期大学、昭和 62~平成 6 年大島商船高等専門学校勤務。平成 7 年山口大学理学部助教授。平成 17 年同教授、平成 18 年同大学大学院理工学研究科教授。計算機ネットワーク構築技術と生命のシステムの理解に関する研究に従事。理学博士。IEEE、電子情報

通信学会各会員。



森永 規彦

昭和 43 年大阪大学大学院博士課程修了。同大学工学部助手、講師、助教授を経て、昭和 62 年同大学工学部教授。平成 15 年大阪大学名誉教授、広島国際大学情報通信学科教授、平成 17 年同大学社会環境科学部長、平成 19 年同大学工学部長、平成 20 年同大学長、現在に至る。工学博士。無線通信、衛星通信、移動通信、光通信等の通信方式に関する研究、ならびに通信システムに対する干渉雑音対策技術に関する研究に従事。電子情報通信学会元副会長、元関西支部長、宇宙航空研究開発機構客員開発部員、自治体衛星通信機構評議員、総務省独立行政法人評価委員会委員 (委員長代理)、平成 7 年度電子情報通信学会論文賞、平成 10 年度同業績賞、平成 16 年度同功績賞、平成 17 年同名誉員、平成 10 年度情報化月間通産大臣表彰。IEEE Fellow、電子情報通信学会名誉員・フェロー。