

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[†] 松野 浩嗣[‡] 森永 規彦[†]
[†] 広島国際大学 工学部[‡] 山口大学大学院 理工学研究科

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するために、バックオフアルゴリズムとして 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、現在までに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、それらの提案された方式は 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、これに加えて従来の提案方式は、ネットワーク中の全端末が提案方式を採用するという前提で構成されるため、従来端末が混在するネットワーク環境下で使用することができない。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、IEEE802.11DCF 端末との混在環境においても、LPB 方式を用いれば公平度が向上することを明らかにした結果について報告する。

Proposal of Method for Improving MAC Level Fairness under the Coexisting Situation with Legacy IEEE802.11DCF Terminals

Tetsuya Shigeyasu[†] Hiroshi Matsuno[‡] Norihiko Morinaga[†]
[†] Faculty of Engineering, Hiroshima International University
[‡] Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

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 mechanism, transmission unfairness arises under high traffic environment. Then, a large number of algorithms aimed at reducing unfairness on BEB have been reported. Most of those algorithms could increase fairness, but it also decreases throughput. In addition, these algorithms have developed based on the assumption that all terminals equip the same algorithm. This paper proposes an adaptive method that 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 legacy IEEE802.11DCF terminals as well as terminals utilizing the proposed method.

1 はじめに

MAC(Media Access Control) 層におけるパケットの再送はバックオフアルゴリズムによって計画される。典型的なバックオフアルゴリズムは BEB(Binary Exponential Back-off) [1] であり、IEEE802.11DCF [2] のような分散方式の MAC プロトコルに多く採用されている。BEB 方式では、送信までのバックオフ期間を生成するために乱数発生範囲として CW(Contention Window) を使用する。CW は送信が失敗するたびに 2 倍に増加するが、送信が成功すると一度に最小値に初期化されてしまう。そのため、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 の値のばらつきが大きくなることから、端末間の送信機会に不公平が生じてしまう [3]。

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) [4] では、CW を BEB に比べて緩やかに増減する方式を提案している。また、文献 [5], [6] では、さらに CW のばらつきを小さくするために、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、不公平状態を軽減す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 [7]。そのため、文献 [8, 9, 10, 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行われている。

ところで、これら全ての提案方式では、ネットワー

ク中の全端末が提案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。

これは、不公平状態を軽減する多くの方式がバックオフアルゴリズムを改良していることに起因する。例えば、文献 [12] ではチャネルのビジー期間、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、ネットワーク中のアクティブ状態にある端末数 [13]、自端末に割り当てられた重み [9]、もしくはそれ以外の基準 [10, 14, 15] 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。

そのため、既存の IEEE802.11DCF 端末が混在するネットワークでは、既存端末は当然のことながら不公平状態にある端末に対して配慮することは無いため、結果として不公平状態は改善されない。

そこで、本論文では、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に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する方式を採用するために、既存の IEEE802.11DCF 端末との混在環境においても、不公平状態の改善を期待できる。以降、本論文を次のように構成する。まず、BEB 方式

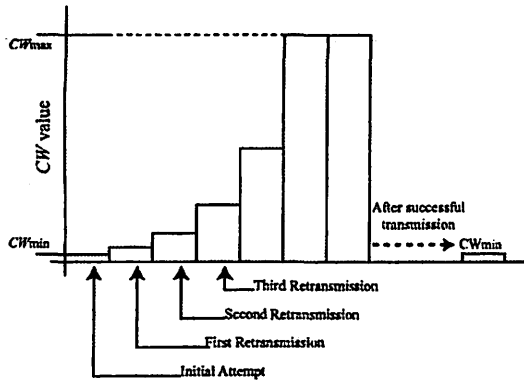


図 1: Control procedure of CW on BEB algorithm

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 節で本論文のまとめを述べる。

2 BEB (Binary Exponential Back-off) 方式

MAC 層において、衝突等によって失われたパケットの再送は、バックオフアルゴリズムによって計画される。以下では、分散制御方式の MAC プロトコルにおいて広く採用される BEB 方式の動作について述べる。

図 1 は 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わかる。また、逆に、送信が成功した場合には、一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 [3]。

3 IEEE802.11DCF

3.1 IEEE802.11DCF における送信制御

図 2, 3 に IEEE802.11DCF におけるパケット形式、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 では、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ネルの使用状況を調査する。その結果、チャネルが DIFS (DCF Inter Frame Space) 時間連続でチャ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、直ちに宛先端末に対して RTS を送信する。図 2 に示すように、RTS には宛先 (RA) と送信元アドレス (TA) が記

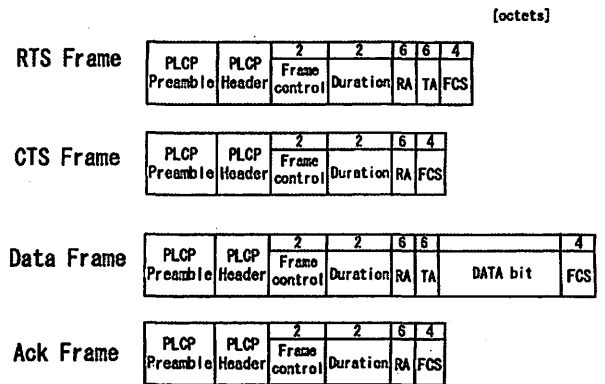


図 2: Packet formats of IEEE802.11

表 1: Simulation parameters

Data Rate	11 Mbps
Communication Range	250 m
SIFS	10 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot	20 μ sec
Contention Window Size	Min: 31, Max: 1023
MAC header	DATA: 24, RTS: 16, CTS, ACK: 10 (bytes)
Frame Check Sequence	4 bytes
PLCP header and preamble	192 μ sec
RTS threshold	0
Payload	512 bytes
Packet Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Terminals	50
Terminals Location	random

録されており、RTS を受信した端末は宛先の端末アドレスを確認し、自端末宛であれば、CTS を返信する。その後、CTS 受信した送信端末は DATA の送信を開始する。

3.2 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。

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。

4 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する 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。シミュレーション緒元は表 1 に、ネットワークポロジは図 5 にそれぞれ示す。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 2-4 の隣接端末を持つことが確認できる。また、本節における評価実験では、端末間での隣接端末数の偏りから生じる送信機会の不公平状態を調査す

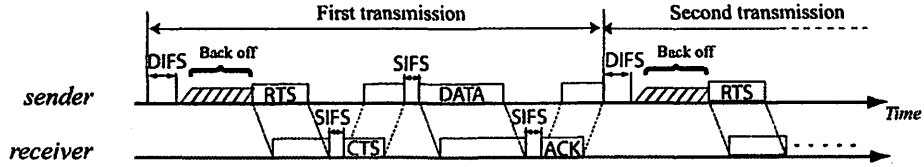


図 3: A packet transmission procedure of IEEE802.11DCF

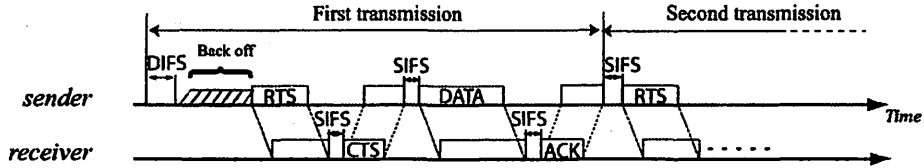


図 4: Successive transmissions of packets

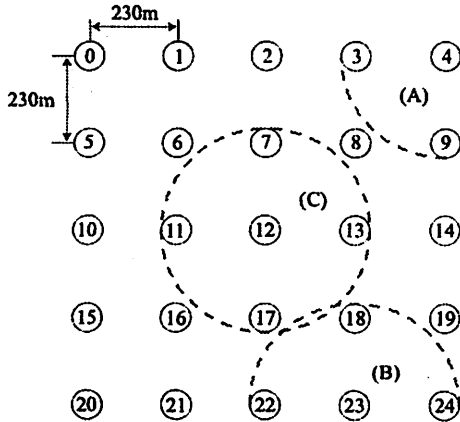


図 5: Network topology

るため、隣接端末数を除くその他全てのパラメータは同じものを用いている。

4.1 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。

$$BW_i = \frac{Th_i}{ABW_i}, \quad (1)$$

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り当て帯域幅とする。 ABW_i は次式から導出する。

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

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 に示す通りとなる。従って、チャンネルが衝突無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無く繰り返されることとなる。また、そのような場合の

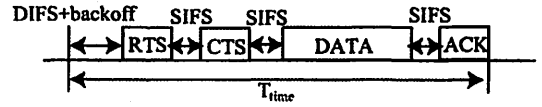


図 6: Time length required for transmitting one packet

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。

$$MaxTh = \frac{Data\ size}{T_{time}} \quad (3)$$

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

また、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とした場合、 $MaxTh_i$ は次式の通りとなる。

$$MaxTh_i = \frac{MaxTh}{N_i + 1}. \quad (5)$$

4.2 送信機会の不公平状態の調査

図 7 に IEEE802.11DCF においてトラフィックが飽和状態にある場合の各端末の帯域使用率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。同図において、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域使用率とした。

同図より、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。

5 IEEE802.11DCF における不公平状態の軽減方式

本節では、スループットを低下させずに IEEE802.11DCF における送信機会不公平状態を軽減する 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。

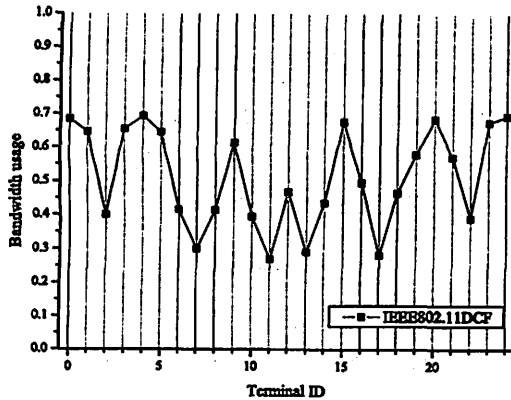


図 7: Bandwidth usage rates on IEEE802.11DCF

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。

5.1 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。

$$BW_i \begin{cases} > 1: & \text{Overrun state} \\ = 1: & \text{Fair state} \\ < 1: & \text{Unfair state} \end{cases} \quad (6)$$

5.2 LPB 方式の制御方式

LPB 方式の制御方式を以下に述べる。

1. 新たな送信を開始する端末は自端末の公平状態を式 (6) により判断する。
2. 上記の判断結果から、自端末が fair もしくは overrun state である場合は、端末はそのまま次のステップに進む。また、Unfair state である場合には、unfair flag をセットした後に、次のステップへ進む。
3. DCF 規格に従いパケットを送信する。
4. 上記の送信の成功後、端末は unfair flag をチェックし、flag がセットされている場合には、次のステップへと進む。そうでない場合は、一連の送信手続きを終了する。

(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
- バッファが空である場合: 端末は unfair flag をリセットした後に一連の送信手続きを完了する。

(b) 端末は上記のステップ (a) に戻り、送信手続きを続行する。

¹3.2 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、一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。

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送信は、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。この際の送信も RTS, CTS を交換することにより新たな NAV することで、隠れ端末の影響を抑制する。

5.3 重み付け LPB (Weighted LPB)

前節において、LPB 方式は状態判別式 (6) に従うものと定義した。しかしながら、同式では、 BW_i は各端末の割り当て帯域幅である ABW_i に大きく影響を受けるが、BEB 方式において、送信機会の不公平状態が発生するトラフィック飽和状態では、 ABW_i は $MaxTh_i$ となる (式 (2) 参照)。

また、この $ABW_i (= MaxTh_i)$ は端末 i の隣接端末数が少なければ少ないほど、その値が大きくなることから、そのような端末は式 1 における BW_i も比較的小さな値をとり易くなる。そのため、そのような端末が式 (6) に従って連続送信を行った場合は、隣接端末数が多い端末に比べてバースト送信の機会が大きく増加すると考えられる。

ここで、4.2 節の結果である図 7 を参照いただきたい。同図において、互いに隣接する端末 5 と 6 に着目すると、5 は 6 に比べて高い帯域使用率を示していることが確認できる。さて、この状態で式 (6) に従う LPB 方式を適用すると、逆に両端末の帯域使用率の差が広がってしまうと考えられる。これは、5 は 6 に比べて高い帯域使用率を示しているにも関わらず、隣接端末数が 6 に比べて少ないために、5 がより多くの複数パケットのバースト送信を行ってしまうと考えられるからである。

そこで、この問題を解決するために、本節では重み付け LPB (WLPB) 方式を提案する。WLPB において、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 2 に図示したように、RTS, DATA のヘッダには宛先ならびに送信元アドレスが記載されている。そのため、例えば、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 であると知ることができる。

次に、端末は自端末の隣接端末数である 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 (6) に代えて以下の式 (7) を使用することとする。

ここで、隣接端末数が周囲の端末に対して少ない場合には帯域使用率 BW_i を $\frac{1}{2}$ とするのは、隣接端末数に大きな偏りを与えたトポロジ (図 5) において、帯域使用率の大きな差を生じている端末 5, 6 間においてその値が約 2 倍程度であるためである。

$$\frac{BW_i}{2} \begin{cases} > 1: & \text{Overrun state} \\ = 1: & \text{Fair state} \\ < 1: & \text{Unfair state} \end{cases} \quad (7)$$

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する。

6 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。まず、ネットワーク全体で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 [16]。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。

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^n BW_i)^2}{n \sum_{i=1}^n BW_i^2} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (8)$$

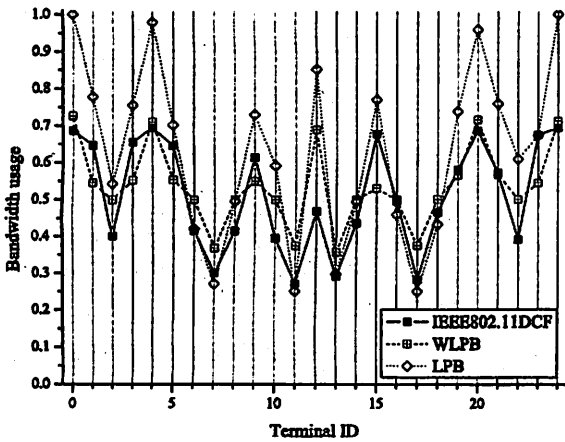


図 8: Bandwidth usage rates on mesh topology

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。

6.1 メッシュトポロジにおける性能評価

図 8 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、各端末のトラフィックは飽和状態にあるものとした。同図に示す結果より、WLPB 方式の結果がその他の 2 方式に比べて、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。

次に、図 9 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 特性を示す。同図において、横軸はネットワーク中の全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、全ての方式は、高トラフィック時において 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 方式はその他の方式に比べて常に高い公平度を示していることから、WLPB 方式が有効に機能していることが確認できる。

図 10 にトラフィック-スループット特性を示す。これらから、WLPB 方式は、LPB 方式と比べると低いスループット性能ではあるが、既存方式である IEEE802.11DCF と同等のスループット性能を有することが確認できる。

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できることがわかる。

6.2 一般的なネットワークトポロジでの WLPB 方式の性能評価

本節では、WLPB 方式をより一般的なネットワークトポロジ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、端末を $1000m \times 1000m$ のフィールド上にランダムに配置し、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。それら以外のシミュレーション諸元はこれまでと同様に表 1 を用いた。尚、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 方式のみを評価対象とした。

まず、図 11 にトラフィック-Fairness Index 特性を示す。同図において、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

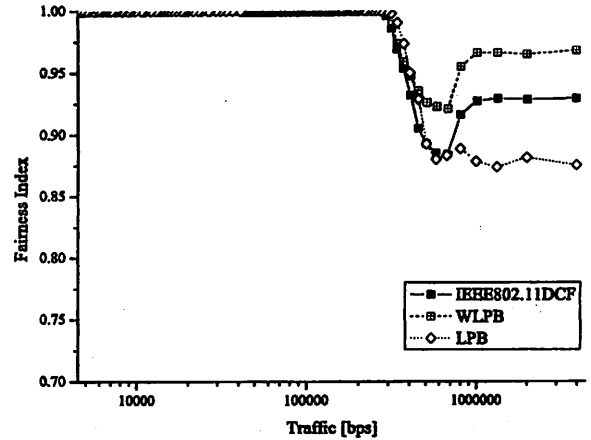


図 9: Characteristics of traffic-fairness index performance on mesh topology

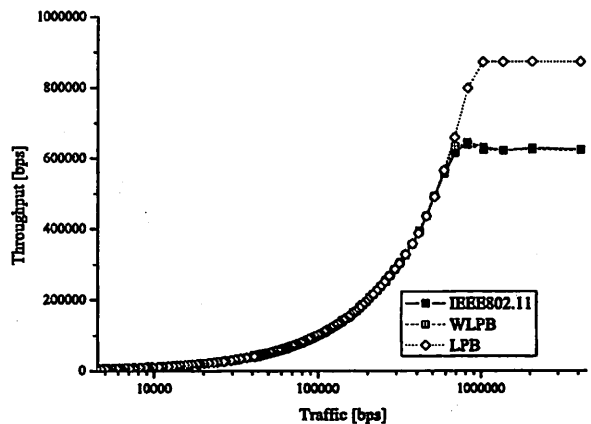


図 10: Characteristics of traffic-throughput performance on mesh topology

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。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 が向上することがわかる。また、WLPB 方式の割合が増加に従い、Fairness Index の値も高くなることがわかる。

次に、図 12 にトラフィック-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。

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 方式はその性能を有効に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改善の改善方式と異なり、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ことにあると考えられる。

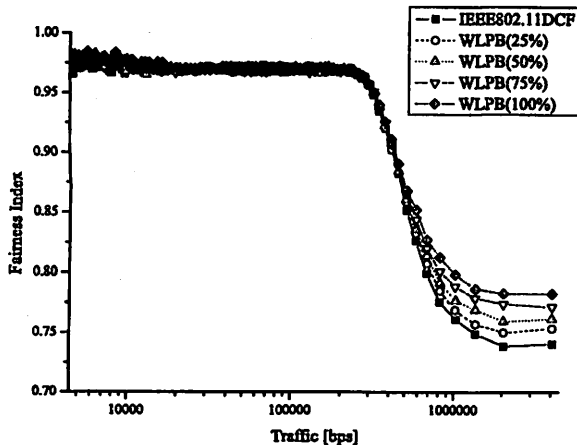


図 11: Improving ratio on fairness performance by applying the proposed method

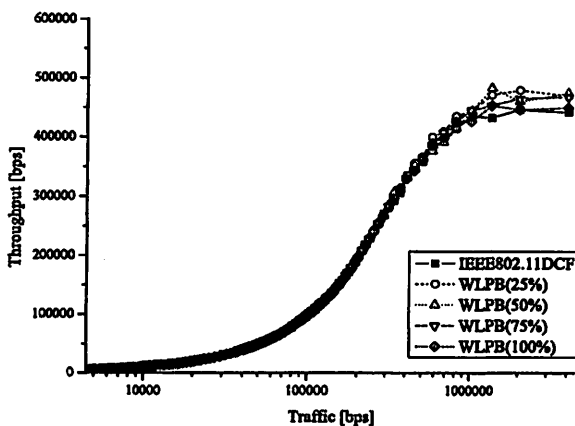


図 12: Improving ratio on throughput performance by applying the proposed method

7 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する方式について議論した。また、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を踏まえ、これを軽減する方式として WLPB 方式を提案した。

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できることを明らかとした。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 端末が混在するようなネットワークにおいても、その効果を発揮することも明らかとした。

また、本論文では全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、連続送信の適応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って、端末ごとに異なる送信機会を割り当てることも可能である。従って、マルチ

ホップ通信を行う際には、他のネットワークと接続するゲートウェイ端末や多くのデータフローの通信経路に選択された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提案方式は有効であると考えられる。

さて、本論文では、端末の移動や各端末に発生するトラフィックが変動しないモデルにおいて評価を行った。しかしながら、より現実的な評価を与えるためには、これらを考慮することが必要であると考えられる。また、そのようなモデルを考慮する際には WLPB 方式の制御で使用している各端末におけるトラフィック量 T_r や隣接端末数 N_i 等をどの程度の時間間隔で測定するかについてより詳細な議論を行う必要があると考えられる。

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] S. Shenker, "Some Conjectures on the Behavior of Acknowledgement-Based Transmission Control of Random Access Communication Channels," *Proc. of 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] C.Koksa, H.Kassab, and H.Balakrishman, "An Analysis of Short-Term Fairness in Wireless Media Access Protocols," *Proc of ACM SIGMETRICS '2000*,pp 118-119,2000.
- [4] V.Bharghavan, A.Demers, S.Shenker, and L.Zhang, "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's," in *Proc. ACM SIGCOMM '94*, pp.212-25, 1994.
- [5] T. Ozugur, M. Nagshineh, P. Kermani, C. Olsen, B. Rezvani, and J. Copeland, "Balanced Media Access Methods for Wireless Networks," *ACM MOBICOM*, pp.21-32, 1998.
- [6] T. Ozugur, M. Nagshineh, P. Kermani, and J. Copeland, "Fair Media Access for Wireless LANs," *IEEE GLOBECOM'99*, pp.570-579, 1999.
- [7] T.Nandagopal,T.Kim,X.Gao and V.Bharghavan, "Achieving MAC Layer Fairness in Wireless Packet Networks", *Proc. of ACM MobiCom'00*,pp.87-98,2000.
- [8] P. Yong, H. Wu, S. Cheng, and K. Long, "A New Self-adapt DCF Algorithm," *IEEE GLOBECOM'02*, Vol.1, pp.87-91, 2002.
- [9] D. Qiao, and K. Shin, "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] R. Bruno, C. Chaudet, M. Conti, and E. Gregori, "A Novel Fair Medium Access Control for 802.11-based Multi-Hop Ad hoc Networks," *The 14th IEEE LANMAN2005*, in CD-ROM 6pages, 2005.
- [11] Y. Kwon, Y. Fang, and H. Latchman, "A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs," *IEEE INFOCOM'03*, 2003.
- [12] X. TIAN, X. CHEN, T. IDEGUCHI, and Y. FANG, "Improving Throughput and Fairness in WLANs through Dynamically Optimizing Backoff," *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol.E88-B, No.11, pp.4328-4338, 2005.
- [13] F. Cali, M. Conti, and E. Gregori, "Dynamic Tuning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, no. 6, pp. 785-799, 2000.
- [14] Y. Peng, H. Wu, S. Cheng, and K. Long, "A new self-adapt DCF algorithm," *IEEE GLOBECOM'02*, vol.1, pp.87-01, 2002.
- [15] Y. XIAO, L. ZHANG, X. SHAN, Y. REN, and Z. MA, "Neighbor-Medium-Aware MAC Protocol with Fairness for Wireless Ad Hoc Networks," *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, Vol.E87-B, No.9, pp.2738-2746, 2004.
- [16] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," *Technical Report DEC-TR-301*, Digital Equipment Corporation, Sept.1984