

フレームバースティングによる IEEE802.11 の送信機会不公平解決法の提案

河本 麻衣[†] 重安 哲也[‡] 松野 浩嗣^{††}

[†] 山口大学大学院 理工学研究科 [‡] 広島国際大学 情報通信学科 ^{††} 山口大学 理学部

代表的な無線 LAN の規格である IEEE802.11 では、送信パケットの衝突確率を低く抑えるために、バックオフアルゴリズムに BEB (Binary Exponential Back-off) 方式を採用する。しかし、BEB 方式では、隣接端末数の偏りなどから端末間において送信機会の不公平が発生してしまう。そこで、本稿では、IEEE802.11 における送信機会の不公平問題の発生と隣接端末数の偏りについて調査する。次に IEEE802.11 規格との互換性を保ちながら不公平問題を解決する方式として、フレームバースティングを使用した方式を提案し、同方式の効果について報告する。

A Proposal for Achieving MAC Level Fairness of IEEE802.11 by Frame Bursting Mechanism

Mai Kawamoto[†] Tetsuya Shigeyasu[‡] Hiroshi Matsuno^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

[‡] Department of Information Technology, Hiroshima International University

^{††} Faculty of Science, Yamaguchi University

In order to reduce probability of a packet collision, BEB (Binary Exponential Back-off) algorithm is implemented in IEEE802.11 that is widely used wireless LAN standard. However, on BEB algorithm, a MAC level unfairness is caused by inequality of numbers of neighbors between terminals. In this paper, we investigate a relationship between inequality of numbers of neighbors and MAC level unfairness on IEEE802.11. Then, we propose a method achieving fairness using frame bursting while keeping compatibility with IEEE802.11. And, we report results of an effect evaluation of the proposed method.

1 はじめに

MAC(Media Access Control) 層における衝突パケットの再送処理はバックオフアルゴリズムによって決定される。代表的なバックオフアルゴリズムは BEB(Binary Exponential Back-off) 方式 [2] であり、広く普及している無線 LAN の規格である IEEE802.11[1] をはじめとした多くのネットワーク規格に採用されている。

BEB 方式は衝突が発生するたびにバックオフ時間を 2 倍に、逆に送信が成功するとバックオフ時間を最短に設定するという単純な制御で衝突確率を効果的に低減できる。しかしながら、BEB 方式はその特性上、一番最後に送信を成功させた端末が次の送信権も容易に取得できるよう設定されているため、高トラフィック時には端末間の送信機会不公平が頻繁に発生してしまう。

そのため、送信機会の不公平を解消するとして、既にいくつかのアルゴリズムが提案されている。たとえば、MILD(Multiplicative Increase and Linear Decrease) 方式 [4] は、送信成功時にバックオフ時間を緩やかに減算することにより不公平状態の発生を回避している。これに対し、バックオフカウンタコピー方式では、バックオフ時間を周辺端末と共有し同値に設定することで不公平状態の発生を軽減している。

さて、これらの方式は効果的に不公平を軽減すること

ができるが、既に広く普及している IEEE802.11 規格のネットワークと組み合わせて運用する際には不具合が生じてしまう。例えば、IEEE802.11 ではバックオフカウンタを共有するよう構成されていないため、バックオフカウンタコピー方式を適用することはできない。また、IEEE802.11 は BEB 方式を採用しているため、MILD 方式と混在した場合、MILD 方式を採用する端末のみが不必要に送信機会を失ってしまう可能性が高い。

そこで、本稿では既存の IEEE802.11 規格のネットワークを組み合わせて運用した場合にも不公平問題を軽減することのできる方式を検討する。まず、他端末と新たな情報をやり取りせずに自端末の不公平状態を判断するための条件として、リトライカウンタの出現回数に着目し、同カウンタと端末スループットの関係について議論する。次に、既存端末と共存しながら自端末の不公平状態を改善するため、フレームバースティングとリトライカウンタを用いた不公平改善方式を提案する。最後に、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した結果について報告し、今後の問題点について述べる。

2 バックオフアルゴリズム

MAC プロトコルでは、キャリアビジーもしくはパケットの衝突にともなう再送の時期を決定するために

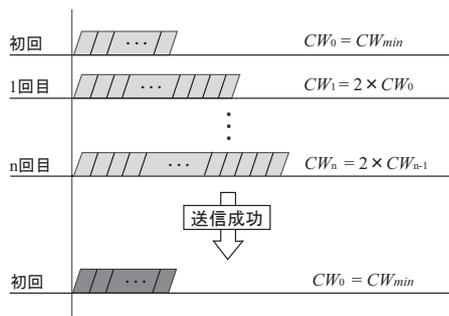


図 1: BEB 方式のバックオフ時間の増減

バックオフアルゴリズムが定義される。以下では、代表的なバックオフアルゴリズムとして、BEB 方式と MILD 方式について説明する。

2.1 BEB 方式

BEB 方式では、衝突が発生すると CW (Contention Window: 乱数発生範囲) の範囲内の乱数を発生させ、この乱数にスロット時間¹を掛けバックオフ時間に設定する [2]。BEB 方式における CW の増減規則を以下に示す²。

送信成功時:

$$CW = CW_{min}$$

送信失敗時:

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

BEB 方式では、送信失敗時には CW の値が 2 倍にされるため、バックオフ時間の最大値は指数関数的に増加する。しかしながら、送信を成功させた場合は一度に CW_{min} ³まで CW の値が引き下げられるため、一番最後に送信を成功させた端末が最小の CW 値を持つ (図 1)。そのため、高トラフィック時には、特定の端末のみが連続的に送信を成功させてしまうという問題点が報告されている [3]。

2.2 MILD 方式

MILD 方式では、BEB 方式と同様に CW の範囲内で乱数を発生させた後にスロット時間を掛けてバックオフ時間に設定する。しかしながら、BEB 方式において送信機会の不公平を生じさせる原因となっていた、急激な CW の変化を避けるメカニズムが採用されている [4]。MILD における CW の増減規則を以下に示す⁴。

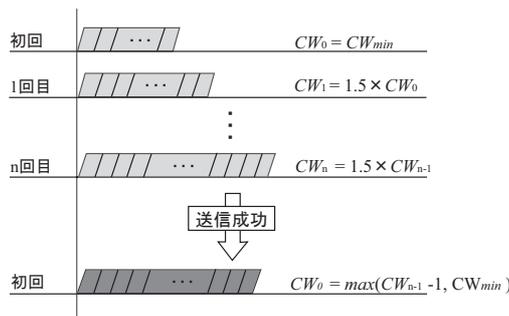


図 2: MILD 方式のバックオフ時間の増減

送信成功時:

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

送信失敗時:

$$CW = \min(1.5CW + 1, CW_{max})$$

図 2 から分かるように、MILD 方式では送信を成功させた端末も一度に CW を最小値には戻さないために、BEB 方式と比べて一番最後に送信を成功させた端末が最小の CW 値を持つ確率が軽減される。

2.3 バックオフカウンタコピー方式

BEB 方式、MILD 方式ではともに、各端末が個別に CW の値を保持するために、端末間でバックオフ時間の違いを生じさせ、送信機会の不公平を生じさせてしまう。

そこで、端末ごとの CW 値のばらつきを解消するために、全ての端末で CW 値を同値に設定する方式が提案された [4]。具体的には、パケットのヘッダ部分に現在の CW 値を記録し送信を行なう。このとき、隣接端末はこのパケットを傍受することにより、自端末にも同じ CW 値を設定する。このようにすることで、高トラフィック時においても全ての端末が同じ条件でバックオフ時間を設定することができるため、結果として送信機会の不公平状態を改善することができる。

3 IEEE802.11

IEEE802.11a/b/g は現在広くオフィスや家庭に普及する無線 LAN 規格であるが、パケットの送信を制御する MAC 副層は全て IEEE802.11DCF [1] を基本としている。

3.1 IEEE802.11DCF におけるパケット送信

図 3 に IEEE802.11DCF におけるパケット送信手順を、図 4 にフレームフォーマットを示す。同図のように、送信要求の生じた端末はまず、キャリアセンスを行う。このとき、チャネルが使用中であった場合は、チャネルが未使用となるまで待機する。逆に、DIFS (DCF Inter Frame Space) 時間連続でチャネルが未使用であった場合は、BEB 方式に従いバックオフ時間を設定し、次に

¹IEEE802.11b では、スロット時間は $20\mu sec$ に設定されている

²ここで $\min(a, b)$ は、 a, b のうち、小さい方の値を返す関数とする。

³IEEE802.11b では、 $CW_{min} = 32$, $CW_{max} = 1023$ に設定されている。

⁴ここで、 $\max(a, b)$ は、 a, b のうち、大きい方の値を返す関数とする。

RTS Frame	PLCP Preamble	PLCP Header	16		4
			802.11RTS Frame		
CTS Frame	PLCP Preamble	PLCP Header	10	4	4
			802.11CTS Frame	FCS	
Data Frame	PLCP Preamble	PLCP Header	24	8	4
			802.11MAC Header	LLC Header	
Ack Frame	PLCP Preamble	PLCP Header	10	4	4
			802.11Ack Frame	FCS	

図 4: IEEE802.11 におけるフレームフォーマット

バックオフ時間の減算を開始する。その後、バックオフ時間の残りが 0 になったときに初めてパケットの送信を開始する（バックオフ時間の現在中にチャネルが他端末に使用された場合は、減算と一時中断し、チャネルが再度未使用となった後に、現在を再開する。）。

3.2 フレームバースティング

最大伝送速度 54Mbps の無線 LAN 規格である IEEE802.11g (.11g) では、先行する最大伝送速度 11Mbps の無線 LAN 規格である IEEE802.11b (.11b) と同一の周波数帯域を使用する。そのため、両規格が共に干渉することが無いよう、互換性を考慮して同一の MAC パラメータが使用されている。例えば、.11g は .11b に比べて高い伝送速度でパケットを送信することができるが、DIFS や SIFS の時間やバックオフ時間に関係するスロット時間は共に同じ固定値に設定される。そのため、.11g は .11b に比べてパケット単体の送信時間は短くすることができるが、パケット送信開始前のバックオフ時間やパケット間の送信待機時間は .11b と全く同じ時間が必要となることから送信オーバーヘッドが大きくなる。結果として、.11g では最大伝送速度の向上幅に比べ、MAC 層レベルでのスループット向上幅は大きくない。

そこで、.11g における送信オーバーヘッドを削減し MAC 層でのスループットを向上させるためにフレームバースティングが規定されている [5]。フレームバースティングとは、送信終了後に次の送信開始までの DIFS+バックオフ時間を取り除き、パケットを連続して送信することで、時間当たりのパケット送信可能数を増加させる技術である。図 5 に示すように、連続してパケットを送信する場合は、送信後の DIFS+バックオフ時間を SIFS 時間に置き換えて送信を行なうことで、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送信できる。

4 IEEE802.11DCF における送信機会不公平の発生

バックオフアルゴリズムとして BEB 方式を採用する IEEE802.11DCF における送信機会の不公平状態の発

表 1: シミュレーション諸元

Data Rate	2 Mbps
Communiaction Range	250 m
SIFS	10 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot	20 μ 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 μ sec
RTS/CTS handshake	Full-time ON
Payload	1024 bytes
Packet Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Terminals	25
Terminals Location	Fixed

生を計算機シミュレーションを用いて調査する。

計算機シミュレーション諸元を表 1 に、ネットワークポロジを図 6 に示す。

図に示すように、各端末は 230m 間隔でメッシュ型に配置される。図中の (A), (B), (C) はそれぞれ、端末番号 4, 12, 23 が通信可能な範囲を示しており、これらから、ネットワーク中の各端末の隣接端末数は 2 から 4 端末であることがわかる。

本稿におけるシミュレーションでは、ネットワークポロジの偏りから生じる送信機会の不公平状態を調査するために、それ以外の各端末におけるパケット生成レートをはじめとしたすべてのパラメータは同一に設定し、端末ごとによって異なるのは隣接端末数のみとしている。また、シミュレーションはトラフィックを 100%, 75%, 50%, 25% と 25% ずつ変化させた計 4 パターン行なった。このとき、トラフィック 100% とは、ネットワーク中のある箇所において、生成されたパケット数が衝突なく全て成功裏に送受信が行なわれた場合に、チャネルを完全に使い切る割合でパケットが生成される状態とする。

以下に、1 パケットを送信するために要する時間 T_{packet} を示す。

$$\begin{aligned}
 T_{packet} &= DIFS + CW_{min} \times slottime/2 \\
 &\quad + RTSFrame + SIFS + CTSFrame \\
 &\quad + SIFS + DataFrame + SIFS \\
 &\quad + AckFrame \\
 &= 5590 \times 10^{-6} \quad [sec] \\
 RTSFrame &= 192 \times 10^{-6} + (16 + 4) \times 8/rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + 160/rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

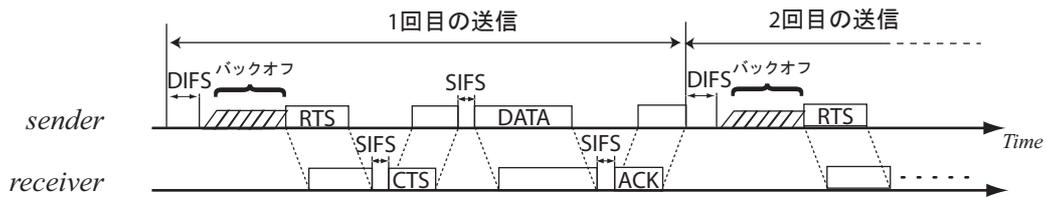


図 3: IEEE802.11 におけるパケット送信手順

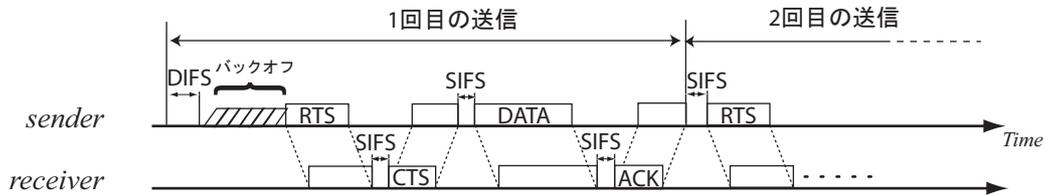


図 5: フレームバースティングを使用した IEEE802.11 のパケット送信手順

$$\begin{aligned}
 CTSFrame &= 192 \times 10^{-6} + (10 + 4) \times 8 / rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + 112 / rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 DataFrame &= 192 \times 10^{-6} + (24 + 8 + Data + 4) \\
 &\quad \times 8 / rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + 288 / rate + Data \\
 &\quad \times 8 / rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 AckFrame &= 192 \times 10^{-6} + (10 + 4) \times 8 / rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + 112 / rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

これらから、2Mbps において送信可能な最大パケット数は $1/T_{packet} = 178.9$ [packet/sec] であることがわかる。さらに、図 6 において隣接端末数が最大となる端末 12 の通信範囲内の端末数は 5 であることから、トラフィック 100% の場合の一端あたりでのパケット生成レートは $178.9/5 = 35.78$ [packet/sec] となる。同様に、75% では 26.8 [packet/sec]、50% では 17.9 [packet/sec]、25% では 8.9 [packet/sec] となる。

図 7 に、パケットの生成レートごとの、ネットワーク全体のパケット到達確率を示す。パケットの到達確率は、ネットワーク全体で生成された全てのパケットのうち送受信が成功したパケットの割合を示している。同図より、トラフィックが高くなるにつれ、パケット到達率が低下することが分かる。

次に、図 8 に、端末ごとのパケット到達確率を示す。図中横軸は図 6 における端末番号を表している。パケット生成レートが 25% の場合は、全ての端末のパケット到達率は 90% 以上であり、端末ごとの到達率の大きな違いを確認することはできないが、パケット生成レートが増加するに伴い、端末ごとにパケット到達率の差

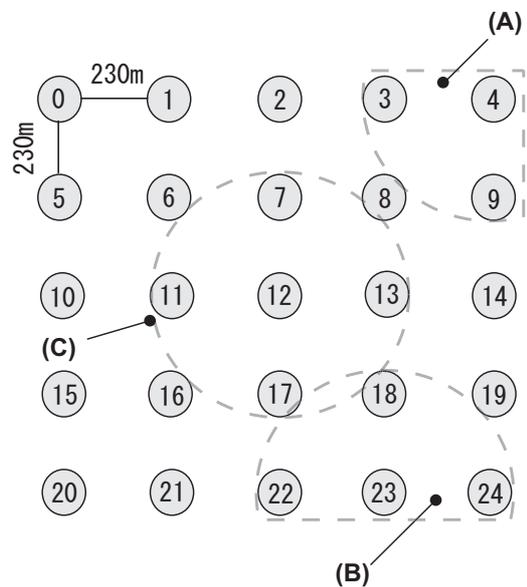


図 6: ネットワークトポロジ

が生じ、送信機会の不公平が生じることがわかる。

また、同図より、隣接端末を多くもつ端末ほど他の端末に比べてパケット到達率は低くなり、送信機会の不公平を強いられることがわかる。

5 フレームバースティングを用いた送信機会不公平性の解決

端末間の送信機会不公平性を改善するために、3.2 節で説明を行ったフレームバースティングを用いた手法を提案する。具体的には、図 8 で示すような、パケット到達率が低く、不公平状態にある端末にフレームバーストを行なわせることにより、端末間のパケット到達率の差を小さくすることを検討する。

まず、各端末が自端末の不公平状態を自律的に判断する情報としてリトライカウンタに着目する。リトラ

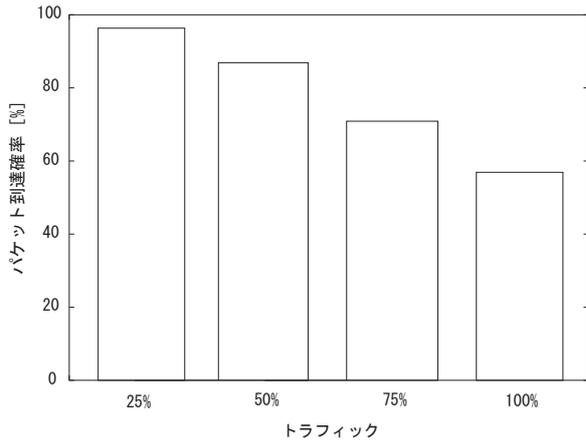


図 7: ネットワーク全体のパケット到達確率

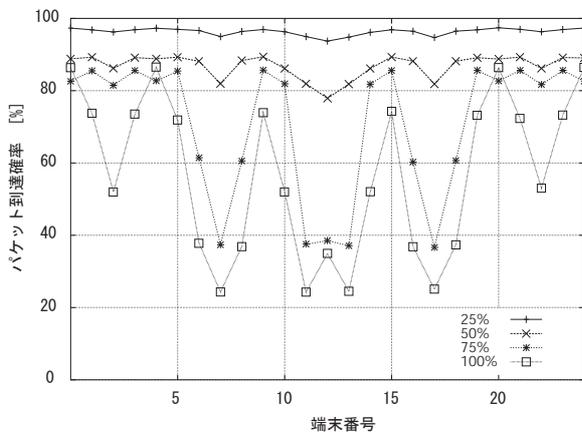


図 8: 端末ごとのパケット到達確率

リトライカウンタとは、パケットの再送回数を記録するカウンタであり、パケットを再送するたびに 1 ずつ加算されるが、パケットの送信が成功した場合には 0 に初期化される。逆に、パケットが再送を繰り返しリトライカウンタの上限値に達した場合には、そのパケットは破棄された後にリトライカウンタは 0 に初期化される。

IEEE802.11DCF では、CSMA/CA のみで通信を行う場合は *Station Short Retry Count (SSRC)* が、オプションの RTS/CTS を用いる場合には *Station Long Retry Count (SLRC)* がリトライカウンタとして使用され、上限値はそれぞれ 7, 4 に設定される [1]。

図 9 に、端末ごとのパケット到達率とリトライカウンタの出現確率を示す。同図では、一定時間ごとに各端末のリトライカウンタの値を調べた結果、値が n であった割合を $slrc = n$ の折れ線で示している。また、各端末のパケット到達率の結果は棒グラフで示している。同図に示す結果から、パケット到達率の高い端末は、比較的低いリトライカウンタの値が多く出現している。これに対し、不公平状態に陥っている端末、つまりパケット到達率の低い端末は、比較的高いリトライカウンタの値が多く出現することがわかる。

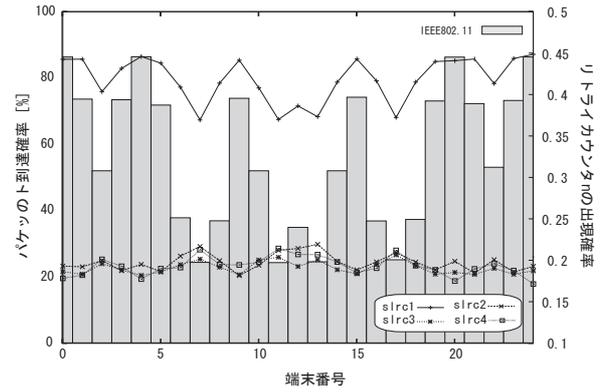


図 9: 端末の不公平状態とリトライカウンタの出現確率の関係

5.1 リトライカウンタとフレームバースティングを用いた不公平状態の解決

これまでの結果から、不公平状態に陥る端末は高い確率で高リトライカウンタ値を持つことが確認された。そこで、本節ではこの特徴を利用した不公平状態の解決手法の提案を行なう。

提案手法では、リトライカウンタが一定以上に達した端末にフレームバーストをさせることにより、不公平状態にある端末の送信回数を増加させる。具体的には、各端末にパケットの送信成功後にリトライカウンタ値を参照させ、あらかじめ設定されたフレームバースト閾値を超えていた場合には、次の 1 パケットをフレームバーストにより連続して送信させる。

評価に用いたパラメータはこれまでと同様に表 1 を用いた。また、ネットワーク全体の公平性を評価する指標として Fairness Index [6] 値を用いる。Fairness Index は、ネットワーク間の公平性を数値的に見るために用いられるものである。Fairness Index 値 f は、以下のように、 n を端末番号、 $X_i (1 \leq i \leq n)$ を端末 i のパケット到達率とした場合、以下の式で表される。

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

なお、Fairness Index 値は $0 \leq f \leq 1$ の値を取り、1 に近いほどネットワーク全体が公平な状態にあることになる。

図 10 に、リトライカウンタとフレームバースティングを用いることによる不公平状態の改善効果を示す。同図において、 $slrc = n$ はフレームバースト閾値を示し、IEEE802.11 は提案方式を採用しない従来方式の結果を示す。同図から、提案方式は高トラフィック時、特にトラフィックが 100% の場合に最も高い不公平状態の改善効果を示すことが確認できる。

次に、最も不公平状態が改善されたトラフィック 100% における端末ごとの状態を確認するため、図 11 に端末ごとのパケット到達率を示す。同図から、提案手法を

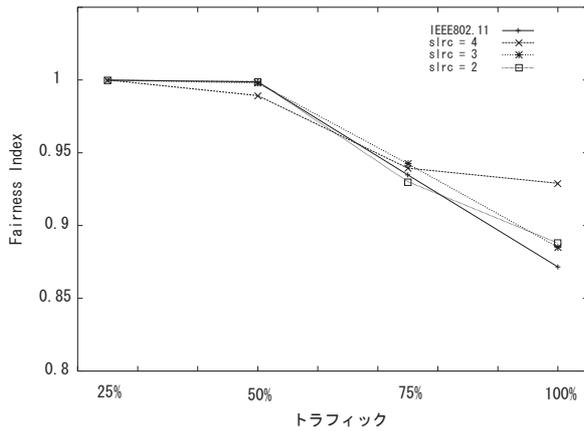


図 10: リトライカウンタとフレームバースティングによる不公平状態の改善効果

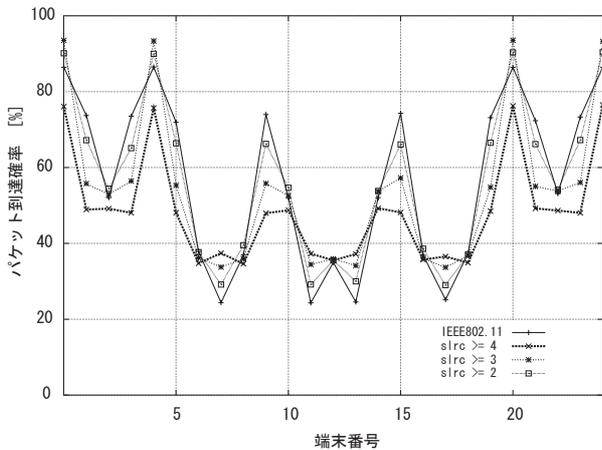


図 11: 提案方式を適用した端末ごとのパケットの到達確率

用いることにより，端末ごとのパケット到達率の差が小さくなっていることがわかる．

5.2 不公平状態の改善とネットワークスループットの関係

図 12 に提案手法を用いた場合のトラフィックに対するネットワーク全体のスループットの値を示す．同図から，低トラフィック時，すなわち，Fairness Index 値が高くネットワークが不公平状態にない場合には，提案方式を使用することによりネットワーク全体のスループットが上昇しているが，高トラフィック時では，逆に提案手法を用いることによりネットワーク全体のスループットが低下してしまうことが分かる．

6 おわりに

本稿では，IEEE802.11DCF における送信機会の不公平問題について議論を行い，端末が自律的に不公平状態を解決するためにリトライカウンタとフレームバースティングを用いた手法の提案を行った．

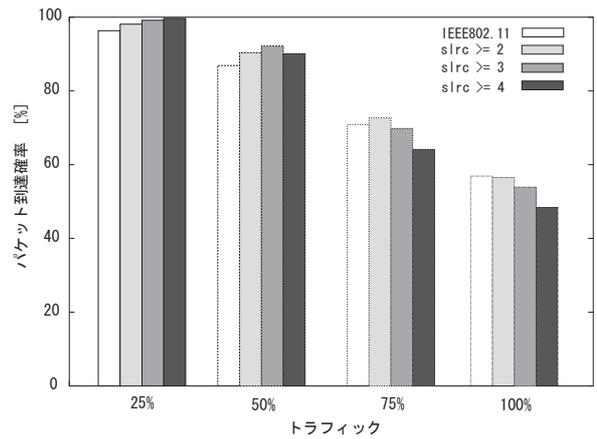


図 12: 提案手法を用いた場合のネットワーク全体のパケット到達確率

提案手法の評価を行なった計算機シミュレーションの結果から，高トラフィック時において提案手法は IEEE802.11DCF に比べて高い公平度が得られることから，その有効性を確認した．

しかしながら，ネットワーク全体のスループットを示した結果からは，不公平状態が発生しやすい高トラフィック時において，提案手法を用いることにより，スループットが低下してしまうことも確認した．

今後は，隣接端末数に応じてフレームバースト閾値を適応的に変化させるなどの手法も検討することにより，より効果的な不公平問題の解決手法の検討を行っていく予定である．

参考文献

- [1] *Editors of IEEE802.11*, "Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer(PHY) specifications,Draft Standard," IEEE802.11,1997.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] *Editors of IEEE802.11*, "IEEE802.11e draft/D4.1 Part II: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specification: Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS)," IEEE802.11, 2003.
- [6] 長谷川 剛, 板谷 夏樹, 村田 正幸, "バックボーンルータにおける RED の動的閾値制御方式", 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2001-11),pp.1-6,2001.