

IEEE802.11DCF における端末間の送信機会公平化に関する研究

川崎 将和[†] 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 ^{††} 株式会社ハイエレコン [‡] 広島国際大学 情報通信学科

代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 では、パケットの衝突確率を低く抑えるために、Binary Exponential Backoff (BEB) 方式を採用している。BEB 方式は単純な操作でパケット衝突を軽減できるアルゴリズムであるが、高ネットワーク負荷や、隣接端末の偏りなどにより、送信機会の不公平が生じてしまう。

そこで本稿では、ネットワーク負荷や隣接端末の偏りと不公平状態との関係について議論を行う。また、既存の IEEE802.11 方式との互換性を維持しつつ、不公平状態を解決するために、適応的かつ自律的にフレームバーストを用いた手法を提案し、計算機シミュレーションによって評価したので、結果について報告する。

A Research of MAC Level Fairness on IEEE802.11DCF network

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

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

^{††} Hi-Elecon Co, Ltd.

[‡] Department of Information Technology, Hiroshima International University

IEEE802.11, which is a most and widely used wireless LAN standard, employs Binary Exponential Backoff (BEB) for reducing packet collisions. Although the BEB can avoid effectively packet collision by a simple mechanism, transmission unfairness arises under the high traffic environment and/or inequality of numbers of neighboring terminals situation. This paper discusses about relations between unfairness and above, and proposes a method of frame-burst transmission with adaptive and autonomous controlling for solving unfairness problem in keeping compatibility with legacy IEEE802.11DCF terminals. From the results of computer simulations, it is also reported that, our techniques improve fairness effectively with no performance degradation.

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 [1] であり、広く普及している無線 LAN の規格である IEEE802.11 [2] 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 [3]。BEB 方式では、送信が成功すると CW(Contention Window) を最小に、衝突により送信が失敗すると衝突前の CW の 2 倍に設定する。このため、送信を成功させた端末が次回にも送信を行う確率が高くなるため、高トラフィック環境下では端末間の送信不公平が生じてしまう [4]。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。

MILD(Multiplicative Increase and Linear Decrease) 方式 [5] は、送信成功時の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。バックオフカウンタコピー方式 [6] では、周辺端末とバックオフカウンタを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、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

合が生じる。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送信機会を失ってしまう可能性が高い。

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、自律分散的に不公平状態を軽減できる方式について検討する。まず、自律分散的に不公平状態を判断するため、伝送レートや隣接端末数、データサイズなどのパラメータを元に不公平状態と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に、閾値を元にフレームバーストを行う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、今後の検討課題について述べる。

2 バックオフアルゴリズム

MAC プロトコルでは、チャネル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バックオフアルゴリズムを定義する。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

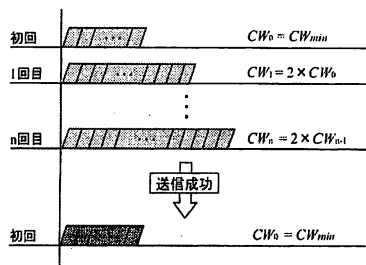


図 1: BEB 方式におけるバックオフ時間の増減例

方式について説明する。

2.1 BEB 方式

BEB 方式では、バックオフ時間を CW (Contention Window) にスロット時間¹を乗じた値に設定する [1]。 CW^2 は、送信が成功した場合は最小値に、送信が失敗した場合は失敗前の CW の 2 倍に設定する。 BEB における CW の増減規則を以下に示す³。

送信成功時:

$$CW = CW_{min}$$

送信失敗時:

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

BEB 方式では、 CW の値は送信失敗時に 2 倍にされるため、送信失敗が連続するとバックオフ時間の最大値は指数関数的に増加する。逆に、送信成功後 CW の値が CW_{min} に初期化されるため、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)。結果として、高トラフィック時は、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 [4]。

2.2 MILD 方式

BEB 方式では、送信の成否によって急激に CW の値を変化させるメカニズムが不公平状態を生じさせる原因となっていた。そこで、MILD 方式では CW の値を緩やかに変化させるメカニズムが採用されている [5]。 MILD における CW の増減規則を以下に示す⁴。

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 方式では送信後も CW を CW_{min} に初期化しないため、BEB 方式と比べて一番最後に送信を成功させた端末がネットワーク中

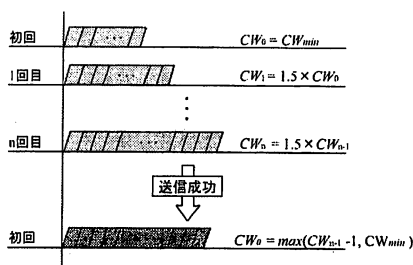


図 2: MILD 方式におけるバックオフ時間の増減例

で最小の CW 値を持つという確率が軽減される。

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、各端末が独立に CW の値を持つため、端末間でバックオフ時間の違いが生じ、送信機会の不公平状態が発生してしまう。

そこで、端末間での CW 値のばらつきを解消するため、全ての端末で CW 値を同じ値に設定する方式が提案された [5]。この方式はバックオフカウンタコピーと呼ばれる方式で、送信端末は CW 値を送信パケットのヘッダに記録することで隣接端末に自端末の CW 値を報知する。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同一の CW 値を共有できるため、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としている。

3 IEEE802.11DCF

3.1 IEEE802.11DCF におけるパケット送信制御

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。 IEEE802.11DCF では、送信要求の生じた端末は、キャリアセンスを行う。このとき、チャンネルが使用中であった場合は、未使用状態となるまで待機する。逆に、DIFS (DCF Inter Frame Space) 時間連続でチャンネルが未使用であることを検出した場合は、BEB 方式に従いバックオフ時間を設定したのちに、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 になると直ちにパケット送信を開始する。バックオフ減算中に他端末が送信を開始した場合は、減算を中断し、チャンネルが再度未使用状態になった後に減算を再開する。

3.2 フレームバースト

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値に設定される。そ

¹IEEE802.11b では、20μsec.

²IEEE802.11b では、 $CW_{min}=31$ 、 $CW_{max}=1023$ 。

³ $\min(a, b)$ は、 a, b のうち、小さい方の値を返す関数とする。

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

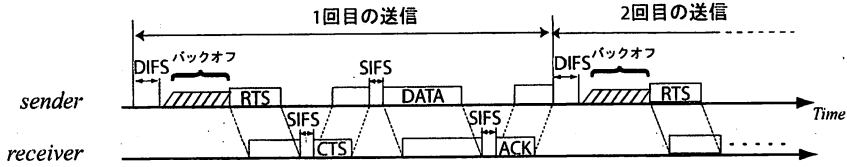


図 3: IEEE802.11 におけるパケット送信手順

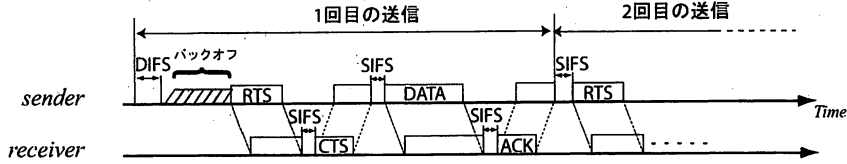


図 5: フレームバーストを使用した IEEE802.11 のパケット送信手順

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

図 4: IEEE802.11 におけるフレームフォーマット

のため、.11g は.11b に比べて Data Frame 単体の送信時間は短くすることができるが、送信開始前のバックオフ時間やフレーム間の送信待機時間は.11b と同じ長さの時間が必要となることから送信オーバーヘッドは大きくなる。結果として、.11g では最大伝送速度の向上幅に比べ、MAC レベルでのスループット向上幅は小さくなっている。

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より向上させるためにフレームバーストが提案されている [7]。フレームバーストは、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方式である。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 時間に短縮して送信することで、その他の端末の送信に割り込まれることなく、複数パケットの連続送信が可能となる。

表 1: シミュレーション諸元

Data Rate	1, 2, 5.5, 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/CTS handshake	Full-time ON
Payload	512, 1024 bytes
Packet Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Terminals	25
Terminals Location	Fixed

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 に示し、図 7 にこのネットワーク中の各端末のパケット到達率を示す。ネットワーク中の各端末の通信範囲は、円で示される範囲となっている。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 端末であることが確認できる。また、図 7 からは、隣接端末数の少ない端末はパケット到達率が高く、逆に隣接端末数の多い端末はパケット到達率が低いことが分かる。

ところで、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

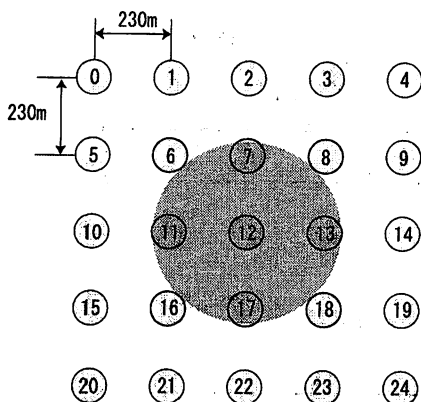


図 6: ネットワークトポロジ

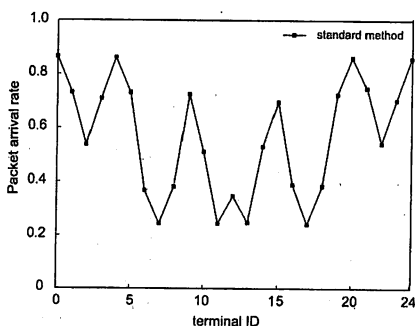


図 7: BEB における端末別パケット到達率

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、端末間で異なるのは隣接端末数のみとした。また、シミュレーションはトラフィックを 1.00, 0.75, 0.50, 0.25 の計 4 パターン行なった。このとき、トラフィック 1.00 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送受信が成功した場合に、チャン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。

$$\begin{aligned}
 T_{packet} &= DIFS + CW_{min} \times slottime/2 + RTS \\
 &\quad + SIFS + CTS + SIFS + Data \\
 &\quad + SIFS + Ack \\
 &= 1158 \times 10^{-6} + (656 + 8D_{size})/rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RTS &= 192 \times 10^{-6} + (16 + 4) \times 8/rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + 160/rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

$$CTS = 192 \times 10^{-6} + (10 + 4) \times 8/rate$$

表 2: 単位時間当りの送信可能最大パケット数 (データサイズ = 512byte)

Data Rate	1.00	0.75	0.50	0.25
1 Mbps	33.841	25.381	16.92	8.46
2 Mbps	56.593	42.445	28.297	14.148
5.5 Mbps	98.907	74.18	49.454	24.727
11 Mbps	125.79	94.34	62.893	31.447

表 3: 単位時間当りの送信可能最大パケット数 (データサイズ = 1024byte)

Data Rate	1.00	0.75	0.50	0.25
1 Mbps	19.988	14.991	9.994	4.997
2 Mbps	35.829	26.872	17.915	8.957
5.5 Mbps	72.286	54.214	36.143	18.071
11 Mbps	101.92	76.437	50.958	25.479

$$= 192 \times 10^{-6} + 112/rate \quad [sec]$$

$$\begin{aligned}
 Data &= 192 \times 10^{-6} + (24 + 8 + D_{size} + 4) \times 8/rate \\
 &= 192 \times 10^{-6} + (36 + D_{size}) \times 8/rate \quad [sec]
 \end{aligned}$$

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

表 2, 3 に各データサイズ, 伝送レート, トラフィックにおける送信可能な最大パケット数を示す。

5 不公平状態の自律分散的な判断

本章では、各端末が自律分散的に不公平状態を判断する方法について示す。提案方式では、各端末は自端末がどの程度送信チャンネルを使用しているかを表すチャンネル占有率 ($O_{channel}$) を元に、自身が不公平状態に陥っているかどうかを判断する。しかしながら、チャンネル占有率のどの値が不公平状態にあるかどうかの境であるかは、各端末が置かれた状況に依存すると考えられる。そこで、各端末の送信パケット成功率を基準とする手法について検討する。

送信成功パケット数 R , 隣接端末数 N , 最大隣接端末数 N_{max} ⁵, データサイズ D_{size} としたとき、チャンネル占有率 $O_{channel}$ を以下のように定義する。

$$\begin{aligned}
 O_{channel} &= \frac{\text{送信成功パケット数}}{\text{送信可能パケット数}} \\
 &= \frac{R}{(T_{packet} \times N_{max})^{-1} \times 10^6} \\
 &= \frac{R \times N_{max}}{(1158 + (656 + 8D_{size}/rate)) \times 10^6}
 \end{aligned}$$

ここで各端末は、閾値である隣接率 N/N_{max} を $O_{channel}$ が下まわったとき、不公平状態に陥ったと判

⁵最大隣接端末数 N_{max} は、ネットワーク中の各端末が互いにブロードキャストすることによって、把握するものとする。

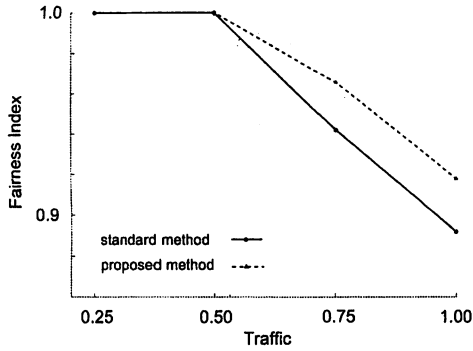


図 8: トラフィックの値と Fairness Index の関係 (データサイズ=512byte, 伝送レート=11Mbps)

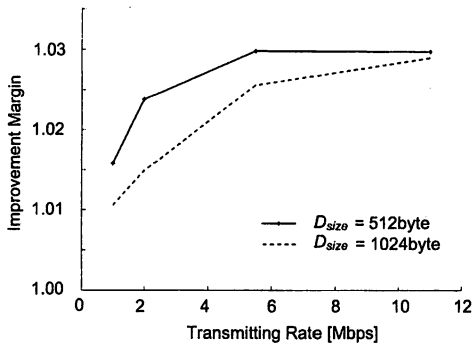


図 9: 提案手法における Fairness Index 改善向上幅 (トラフィック=1.00)

断しフレームバーストを行う。本稿でのトポロジでは、 $N_{max} = 5$ のため、隣接端末数 3, 4, 5 の端末の隣接率はそれぞれ 0.6, 0.8, 1.0 になる。

6 フレームバースト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 節で述べたフレームバーストを用いた手法を計算機シミュレーションにより評価する。

6.1 チャンネル占有率とフレームバーストを用いた不公平状態の解決

我々のこれまでの得られた研究成果 [9] から、端末間のパケット生成レートが同一である場合、送信機会の不公平状態は端末間での隣接端末数の偏りによって生じることを確認している。そこで、本節ではこの特性を不公平状態の解決手法に利用する。

評価に用いたパラメータはこれまでと同様に表 1 に示す値を用いた。ネットワーク全体の公平性を評価する指標として Fairness Index [8] を用いた。Fairness Index は、ネットワーク間の公平性を定量的に表現することがで

きる。Fairness Index f は、 n を端末数、 $X_i (1 \leq i \leq n)$ を端末 i のパケット到達率とした場合、次式で表される。

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

なお、Fairness Index は $0 \leq f \leq 1$ の値を取り、1 に近づく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 8 にチャンネル占有率とフレームバーストを用いることによる不公平状態の改善効果を示し、図 9 にトラフィック=1.00 における同方式の Fairness Index 改善向上幅を示す。図 8 より、提案手法により不公平状態に陥りやすい高トラフィックで高い不公平改善効果を示していることが確認できる。

図 9 の Improvement Margin は、既存手法、提案手法の Fairness Index をそれぞれ $f_{standard}$, $f_{proposed}$ とした場合、次式で求められる。

$$\frac{f_{proposed}}{f_{standard}}$$

高伝送レートかつデータサイズの小さい状況において提案手法の不公平状態改善効果が高かった理由として、総フレームバースト回数の増加が考えられる。表 2, 3 を見ても分かる通り、伝送レートが高く、データサイズが小さいほど T_{packet} は短くなり、単位時間当りの送信可能パケット数は多くなる。これにより、不公平状態にある端末がシミュレーション中にフレームバーストを行う回数が増加し、送信機会不公平状態が改善されたと考えられる。

次に、高伝送レートにおいて、データサイズの違いに Fairness Index の改善効果の差があまり見られなかった理由として、以下のことが考えられる。伝送レート 11Mbps において、データサイズ 512byte, トラフィック 1.00 での既存手法、提案手法のそれぞれ Fairness Index は約 0.89, 0.92 である。それに対し、データサイズ 1024byte の場合では、既存手法、提案手法のそれぞれ Fairness Index は約 0.88, 0.91 である。Fairness Index の最大は 1.00 であることから、元々 Fairness Index の高いデータサイズ 512byte, 伝送レート 11Mbps では、Improvement Margin が向上しなかったと考えられる。

6.2 チャンネル占有率とフレームバーストを用いたネットワークスループットの向上

図 10 にトラフィックに対するネットワーク全体のパケット到達率を示し、図 11 にトラフィック=1.00 における同方式のパケット到達率向上幅を示す。図 10 から、ネットワークが混雑する高トラフィックにおいて、提案手法によりパケット到達率が向上することが確認できる⁶。さらに図 11 から、データサイズが小さく、伝送レートが高い場合においてパケット到達率の向上効果は高いことが確認できる。図 11 の Improvement Margin

⁶6.1 と同様、11Mbps の他に、5.5Mbps, 2Mbps, 1Mbps のそれぞれ 512byte, 1024byte の全てのトラフィックにおいてパケット到達率が向上することを確認している。

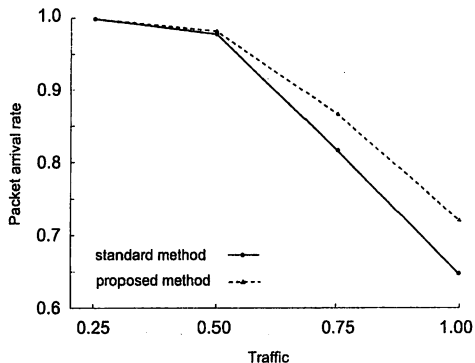


図 10: パケット到達率 (データサイズ=512byte, 伝送レート=11Mbps)

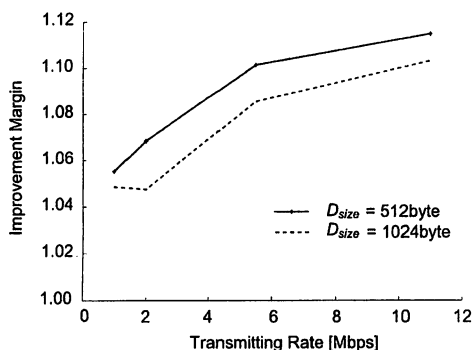


図 11: 提案手法におけるパケット到達率向上幅 (トラフィック=1.00)

は、既存手法、提案手法のパケット到達率をそれぞれ $P_{standard}$, $P_{proposed}$ とした場合、次式で求められる。

$$\frac{P_{proposed}}{P_{standard}}$$

高伝送レートかつデータサイズの小さい状況において提案手法の不公平状態改善効果が高かった理由として、フレームバースト回数の増加が考えられる。6.1でも述べた通り、高伝送レート、データサイズの小さい状況では、フレームバースト回数が増加する。フレームバーストは DIFS+バックオフ時間を SIFS に短縮するため、端末の送信延期時間が短縮できる。つまり、フレームバーストを行う回数が増加するほどチャンネルのアイドル時間を通信に使用できるため、ネットワーク全体のパケット到達率を向上させることが出来たと考えられる。

以上の結果より、1回の通信時間が短い状況下ほど、提案手法による送信機会不公平改善効果とネットワークスループット向上効果が高くなることを確認できた。

7 おわりに

本稿では、IEEE802.11DCFにおける端末間の送信不公平問題について議論し、チャンネル占有率により適応的かつ自律分散的にフレームバーストを行うことで、不公平状態を改善する方式を提案した。

提案方式の評価を行った計算機シミュレーションの結果より、伝送レート 11Mbps, 5.5Mbps, 2Mbps, 1Mbps, パケットサイズ 512byte, 1024byte のいずれにおいても送信不公平状態を改善させ、さらにパケット到達率を向上させることから、その有効性を確認した。しかしながら、さまざまなトポロジで検証していないため、トポロジに依存せず効果があるとはいえない。今後は、さまざまなトポロジでシミュレーションを行い、提案方式により、トポロジに依存せず効果があるかを検証していきたい。

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] 重安 哲也, 松野 浩嗣, 森永 規彦, "無線 LAN 各規格の概要とプロトコル," 情報処理, Vol.45, No.8 (2004年8月), pp.793-800, 2004
- [4] C.Koksa, H.Kassab, and H.Balakrishnan, "An Analysis of Short-Term Fairness in Wireless Media Access Protocols," *Proc of ACM SIGMETRICS '2000*,pp 118-119,2000.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 河本 麻衣, 重安 哲也, 松野 浩嗣, "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", マルチメディア通信と分散処理研究会 (DPS-125),pp 19-24 ,2005.