無線 LAN 端末間の送信時間の公平性を達成するアクセス方式*

諏訪下敦規[†]・稲井 寛[†]

An Access Method to Achieve Transmission Time Fairness in Wireless LANs*

Atsuki SUWASHITA[†] and Hiroshi INAI[†]

In wireless LANs (Local Area Networks), each station adapts its transmission rate according to the channel condition. Thus stations with different transmission rates coexist in a LAN. In such a LAN, the standard access method DCF (Distributed Coordination Function) causes the problem called performance anomaly, all the stations have the same throughput in spite of their transmission rates since the DCF provides equal access privileges among stations. In order to solve the problem, this paper proposes an access method which achieve transmission time fairness. Under the proposed method, the access point calculates the backoff periods for all stations. That could eliminate packet collisions and redundant idle periods. Via simulation, we show effectiveness of our method in comparison with the existing ones.

1. はじめに

安価で手軽な通信手段として、ノートパソコン、タブレット端末、スマートフォンなどの多くの可搬型電子機器が無線 LAN[1] の通信方式を利用している。一般的に無線通信では、回線の制約を受けないため、端末の増設や移動が容易であるが、その一方で、雑音や電波干渉などの影響を受けて、通信路の品質が絶えず変動する。これに対処するため、無線 LAN 機器には、通信路の品質を常時モニタし、品質が悪いときには伝送速度を下げ、良いときには伝送速度を上げる機能が備えられており、品質に応じて動的に伝送速度を調節する方式 [2–5] も検討されている。

上述の状況下では、通信範囲内に伝送速度の異なる端末が混在する。このとき問題となるのが、DCF(Distributed Coordination Function) とよばれる標準の媒体アクセス方式である。DCF は、伝送速度にかかわらず、すべての端末に平等に送信機会を与えるため、すべての端末のスループットが等しくなると、高速な端末はその能力を十分に発揮することができない。この問題は performance

anomaly[6] とよばれており、その基本的な解決策は、各端末がパケット送信時間の合計（以降、送信時間という）を等しくすることである。これにより、各端末のスループットは伝送速度に応じたものとなる。

送信時間の公平性を達成するための研究として、文献 [7,8] は、高速な端末ほど、最大パケットサイズを大きくする方式を提案している。しかし、この方式には、低速な端末の最大パケットサイズが小さくなってオーバーヘッドが増加するという問題がある。また、文献 [7,9,10] は、高速な端末ほど、ウィンドウサイズの初期値 CW_{min} を小さくして送信機会を増やす方式を提案している。しかし、この方式には、端末数が増えたとき、パケットの衝突が増加して全体のスループットが低下するという問題がある。さらに、文献 [11] で提案されている STF-MAC(Successful Transmission time Fair Media Access Control) では、パケット送信が成功するたびに、各端末は、待機中のスロット境界でパケットを送信する確率（以降、送信確率という）を計算する。この確率は、パケットサイズと伝送速度のモニタ結果に基づいて、送信時間の公平性が達成されるように決定される。以上の既存方式は、いずれも競合型のアクセス方式を前提としているため、パケット衝突やアイドル期間によるスループットの低下が避けられない。

そこで、本論文では、パケット衝突やアイドル期間の発生しない非競合型アクセスにより、送信時間の公平性

* 原稿受付 2017 年 9 月 4 日

[†] 岡山県立大学 情報工学部 Okayama Prefectural University; 111, Kuboki, Soja city, Okayama 719-1197, JAPAN

Key Words: wireless LANs, access method, transmission time fairness, performance anomaly.

を達成する方式を提案する。非競合型アクセスの実現にあたって、提案方式では、AP(Access Point)が各端末の待機時間を一元管理する。なお、提案方式のような非競合型アクセス方式として、APが各端末にポーリングをかける PCF(Point Coordination Function)[1]が規定されているが、この方式には、ポーリングのオーバーヘッドが大きいという問題がある。

また、いずれの先行研究も、すべての端末が当該方式を採用している場合を想定した性能評価しかなされていない。これに対して、本論文では、新しい方式が普及する過程で想定される DCF 標準端末が混在する場合の性能評価も行っており、提案方式の有効性を示す。

なお、本論文の元となった講演論文を文献 [12–14] に示している。最初に提案方式を発表した論文が文献 [12] である。文献 [13] では、パケットが消失した場合および DCF 端末が混在する場合への対処法について検討している。文献 [14] では、不飽和トラヒック下においても提案方式が有効となることを検証している。これらの講演論文で発表した成果を踏まえて、本論文では、AP と端末の動作を詳述するとともに、待機時間一覧表の有効期間に関する検討を加えている。

以下、2. では、簡単な実用例をあげながら、提案方式における AP と端末の動作について詳述する。そして、3. では、他の方式との性能比較を行って、提案方式の有効性を明らかにする。最後に、4. で、本研究で得られた結果のまとめと今後の課題について述べる。

2. 提案方式

提案方式の骨子は次のとおりである。

- (1) STF-MAC と同様の方法で、端末 i ($= 1, 2, \dots, N$) の送信確率 τ_i を計算する。
- (2) 端末 i の待機時間 w_i を $1/\tau_i$ [slot] とする。
- (3) スループットの向上を図るため、待機時間からアイドル時間を減じる。具体的には、 $w_i \leftarrow w_i - \min(w_i, \dots, w_N)$ とする。

ただし、 N は端末数を表す。骨子の (1) および (2) は AP の動作、(3) は各端末の動作である。以下、簡単な実用例をあげながら、AP と端末それぞれの動作について詳述する。

2.1 AP の動作

パケット送信が成功するたびに、AP は、STF-MAC と同様の方法（付録参照）で、全端末および自身の送信確率を計算する。このとき、AP は各端末の伝送速度を把握する必要があるが、これについては、PLCP(Physical Layer Convergence Protocol) ヘッダに書き込まれている伝送速度を読み出すことによって得られる。

さて、STF-MAC により算出される端末 i の送信確率を τ_i 、STF-MAC 運用下における端末 i の待機時間を表す確率変数を W_i とすると、 W_i はパラメータ τ_i の幾何

STA #	AP	1	2	3	4	5
Backoff	8	64	47	32	33	32 → 33 → 34

Fig. 1 An example of the AP's waiting time table

分布に従うため、 $E[W_i] = 1/\tau_i$ [slot] となる。したがって、全端末の平均送信時間が等しくなるとき、端末 i の平均待機時間は $1/\tau_i$ [slot] となる。

そこで、提案方式では、 $1/\tau_i$ [slot] を端末 i の待機時間とする。このとき、 $1/\tau_i$ [slot] がすでに算出済みの待機時間と重複した場合は、重複がなくなるまで、端末 i の待機時間をインクリメントする。たとえば、Fig. 1 のように AP および端末 1~4 の待機時間が求められていたときに、端末 5 の待機時間が 32 と算出されたとする。これは端末 3 の待機時間と重複するので、インクリメントして 33 とする。しかし、これも端末 4 の待機時間と重複するので、再度インクリメントして 34 とする。

上述の手順により、パケット送信が成功するたびに、AP および全端末の待機時間が更新される。AP は待機時間の一覧表を、その有効期間とともに、定期的にブロードキャストする。なお、有効期間の必要性については、次節で述べる。

2.2 端末の動作

AP は STF-MAC の送信確率に基づいて待機時間を算出するため、全端末が AP から受け取った待機時間を遵守すると、平均送信時間の公平性が保たれる。また、待機時間の重複がないため、パケット衝突が発生せずスループットが向上する。これらのことに加えて、待機時間からアイドル時間を減じることにより、スループットをさらに向上させることを考えた。

以下、具体例をあげながら、各端末の動作手順を説明する。簡単のため、端末台数を 3 とし、上りトラヒックのみを扱っているが、下りトラヒックについても同様に考えることができる。なお、手順中のフレーム間スペースはすべて SIFS(Short Inter-Frame Space) とする。

- (0) AP から受け取った待機時間一覧表をメモリに保管する。これらの値は有効期間内に随時読み出されるが、次の新しい一覧表を受け取るまで書き替えられることはない。ある端末が受け取った待機時間一覧表の例を Fig. 2 の (0) に示している。
- (1) 待機時間一覧表をワーキング表（作業用の表で随時書き換えられる）にコピーする。以降、Fig. 2 の (1)~(3) は、ある端末内のワーキング表を示している。
- (2) 全端末がワーキング表に従って待機すると、最小の待機時間がアイドル時間となる。そこで、スループットを向上させるために、待機時間からアイドル時間を減じる。Fig. 2 の (1) では、端末 3 の待機時間が最小の 32 なので、各端末の待機時間から 32 を減じる。この結果、Fig. 2 の (2) に示すよう

に、端末 3 の待機時間が 0 となるので、端末 3 はパケットを送信して ACK を待つ。それ以外の端末は、ACK を傍受する態勢に入る。

- (3) パケットを送信した端末および ACK を傍受した端末は、待機時間一覧表に基づいて、パケット送信端末の次の待機時間を設定する。ここではかの端末の待機時間と重複した場合は、重複がなくなるまで、当該端末の待機時間をインクリメントする。Fig. 2 の (3) では、パケットを送信した端末 3 の次の待機時間が、(0) で保管されている一覧表に基づいて、32 に設定される。しかし、これは端末 1 の待機時間と重複するので、インクリメントして 33 とする。

これ以降の有効期間内において、全端末が (2) および (3) と同様の動作を繰り返す。

AP と全端末がこれまでに述べた動作に従うと、平均送信時間の公平性が保たれるとともに、パケット衝突とアイドル時間が解消されてスループットが向上すると考えられる。しかし、そのためには、送信を許された端末はその時点でパケットを所持しており、かつ、伝送エラーは発生しないという前提が必要となる。実際には、端末がパケットを所持しているとは限らず、伝送エラーも発生し得るので、以下では、それらの問題への対処法について述べる。

(0) で AP からブロードキャストされる待機時間一覧表の受信に失敗した端末には、次の一覧表を受信するまで、パケットの送信を停止させる。そのため、一覧表には、ブロードキャスト間隔以下に設定された有効期間が付加されている。これは、異なる一覧表に基づいたパケット送信による衝突の頻発を防止するための処置である。

(2) で送信を許された端末がパケットを所持していないとき、当該端末は何も送信しない。そこで、AP は、前の ACK 送出完了から SIFS 経過後、送信を許された端末からのパケットの受信開始を認識できなければ、当該端末を宛先とする ACK を送出する。これは、パケットが送信されないままむだに経過するアイドル時間を削減するための処置である。

(2) で送信を許された端末はパケットを送信したが、エラー回復不可能なパケットとなって AP に到達したときは、AP は自身を宛先とする ACK を送出する。これは、送信端末にエラーを通知し、他の端末を (3) の手順に進ませるための処置である。これにより他の端末は、送信端末宛または AP 宛の ACK を傍受すれば (3) の手順に進むことができる。なお、送信端末が再送できるのは、次に自分の送信が許されるときである。

(3) で ACK の傍受に失敗した端末は、自身のワーキング表を修復する必要がある。たとえば、各ワーキング表が Fig. 2 の (2) のときに端末 1 が ACK の傍受に失敗すると、各ワーキング表は Fig. 3 の (3) を経て (4) のようになる。このとき、端末 2 がパケットを所持していない、

STA #	1	2	3
(0)	64	47	32
(1)	64	47	32
(2)	32	15	0
(3)	32	15	32 → 33

Fig. 2 An example of transition of working table at a station

	STA1's Table	STA2's Table	STA3's Table
	1 2 3	1 2 3	1 2 3
(3)	32 15 0	32 15 33	32 15 33
(4)	32 15 0	17 0 18	17 0 18
Recovery			
(4.1)	32 15 33		
(4.2)	17 0 18		

Fig. 3 An example of recovery of the station 1's working table

	STA1's Table	STA2's Table	STA3's Table
	1 2 3	1 2 3	1 2 3
(3)	32 15 33	32 15 0	32 15 33
(4)	17 0 18	32 15 0	17 0 18
(5)	17 47 18	32 15 0	17 47 18
Recovery			
(5.1)		32 15 33	
(5.2)		17 0 18	
(5.3)		17 47 18	

Fig. 4 An example of recovery of the station 2's working table

または、端末 2 のパケット送信が成功すると、AP から端末 2 宛の ACK が送出される。しかし、端末 1 が期待している ACK の宛先は端末 3 または AP である。このように、期待していない ACK を傍受した端末は、期待している ACK の傍受に失敗している可能性が高いので、期待している ACK が傍受できたときの手順を実行する。この場合は、Fig. 3 の (4.1), (4.2) のようになって、傍受した端末 2 宛の ACK が正しくなるように、端末 1 のワーキング表が修復される。

一方、各ワーキング表が Fig. 2 の (2) のときに端末 2 が ACK の傍受に失敗すると、各ワーキング表は Fig. 4 の (3) を経て (4) のようになる。端末 2 は送信を許され

ているが、当の端末 2 は宛先が端末 3 または AP の ACK を待っている。端末 2 からパケットが送信されないため、AP は端末 2 宛の ACK を送出する。そして、各ワーキング表は Fig. 4 の (5) のようになる。端末 2 は自分宛の ACK、すなわち期待していない ACK を受信したので、期待している ACK を傍受できたときの手順を実行する。この場合は、Fig. 4 の (5.1), (5.2) のようになって、自分にパケットの送信が許された状態となる。しかし、自分がパケットを送信してもよい時刻は過ぎているので、パケットを送信せず、送信後の手順を実行する。すると、(5.3) のようになって、自身のワーキング表が修復される。

ここで述べた対処法は完全なものではない、たとえば、チャンネル状態が非常に悪く、Fig. 3 の端末 1 の ACK 傍受失敗に引き続いて、(4) で端末 2 が送信したパケットがエラーとなったとする。このとき、端末 1 が AP 宛の ACK を傍受すると、端末 1 は端末 3 のパケット送信が失敗したと解釈し、ワーキング表を修復しない。しかし、チャンネル状態が非常に悪くない限り、上述の対処法により、ほとんどの問題を解決することができるものと考えられる。

3. 性能評価

本章では、シミュレーションにより、提案方式の性能を評価する。まず、提案方式のパラメータである待機時間一覧表の有効期間長について検討する。つぎに、他方式の性能との比較により、提案方式の有効性を明らかにする。そして最後に、方式が普及する過程において発生する DCF が混在する場合の性能について検討する。

3.1 シミュレーションの条件

1 台の AP と N 台の端末から構成されたインフラストラクチャモードの無線 LAN を考える。ここでは、各方式の性能を比較しやすくするため、次のような仮定をおいた。

- 上りトラヒックのみ発生する。
- 各端末は常に送信すべきパケットを所持している。
- ビットエラーは発生しない。
- AP および端末が待機時間の計算等の処理に要する時間は無視できるほど小さい。
- 端末台数は一定である。すなわち、新規参入や途中退去はない。
- 隠れ端末は存在しない。
- 各端末の伝送速度は変化しない。
- ペイロード長は 1500 バイト固定長である。

無線 LAN に特有のパラメータは IEEE 802.11b に準拠するものとし、各端末の伝送速度は 11 [Mbps] あるいは 1 [Mbps] のいずれかとする。以降、前者を高速端末、後者を低速端末とよぶことにする。

3.2 待機時間一覧表の有効期間

提案方式では、待機時間一覧表の受信に失敗した端末への対処として、一覧表に有効期間を設定している。有効期間が長いと、一覧表の受信に失敗した端末の送信停止期間も長くなるので、その端末のスループットが低下する。一方、有効期間が短いと、低速端末のパケット送信機会が失われる恐れがある。たとえば、本数値例で送信時間の公平性が保たれているとき、高速端末の送信機会は、低速端末のその 11 倍となっている。このように伝送速度の差が大きい場合には、低速端末の送信確率が非常に小さくなる、すなわち、待機時間が非常に長くなる。そのため、有効期間が短いと、その期間内に低速端末に送信機会が廻ってこない可能性がある。

Figs. 5, 6 に、端末総数 $N = 20$ とし、高速端末の台数 M (このとき低速端末の台数は $N - M$ となっている) と有効期間を変化させた場合の高速端末の送信時間の割合を示す。ここで、高速端末の送信時間の割合とは、高速端末の送信時間の合計を全端末の送信時間の合計で割った数であり、理想的には M/N となる。図には、 M が奇数のときの理想的な値を点線で示している。図中のマーカ $\bigcirc$, $\triangle$, $\square$, $\times$, $\diamond$ は、それぞれ Fig. 5 では $M = 1, 3, 5, 7, 9$, Fig. 6 では $M = 11, 13, 15, 17, 19$ のときのシミュレーション結果を表している。

多少のばらつきはあるものの、有効期間が 200 [msec] 以上であれば、送信時間の公平性がほぼ保たれていると考えられる。その一方で、有効期間が 100 [msec] のとき上述の問題が発生している。高速端末が 5 台以下ならば、低速端末は送信機会を得られているが、高速端末が 7 台以上になると、低速端末は送信機会を得られていない。

結果を見やすくするため、図には高速端末の台数 M が奇数の場合しか載せていないが、偶数の場合も含めて、理想値とシミュレーション値の平均自乗誤差が最も小さくなったのは 800 [msec] のときであった。そこで、以降に示す数値例では、有効期間を 800 [msec] とする。

3.3 性能比較

提案方式では AP が集中管理しているため、PCF を比較対象に加えることにする。以下、本節では、全端末がそれぞれ DCF, PCF, STF-MAC, 提案方式に従ってパケット送信を行っている場合のチャンネルのスループットを比較する。

Fig. 7 に、端末総数 $N = 20$ とし、高速端末の台数 M (低速端末の台数は $N - M$) を 0 から 20 まで変えたときのスループットの比較を示す。各端末の送信時間がほぼ等しければ、低速端末が高速端末に置き換えられるたびに、スループットが一定量増加する。したがって、送信時間の公平性が保たれていれば、高速端末の増加に伴って、スループットは線形的に増加することになる。

DCF では、伝送速度にかかわらず、各端末が均等に送信機会を得る。そのため、平均的に見ると、各端末が

Fig. 5 Transmission time ratio of high rate stations versus validity time of backoff table when the numbers of high rate stations are 1, 3, 5, 7 and 9

Fig. 6 Transmission time ratio of high rate stations versus validity time of backoff table when the numbers of high rate stations are 11, 13, 15, 17 and 19

Fig. 7 Comparison of the throughputs

1回ずつ送信して一つのサイクルを終えると捉えることができる。低速端末が高速端末に置き換えられるたびに、両者のパケット長の時間差だけサイクル長が短くなるため、スループットが増加する。このとき、低速端末の占める割合が高いと、サイクル長が大きいため、スループットの増加量はそれほど大きくはならない。これに対して、高速端末の占める割合が高いと、サイクル長が小

さいため、スループットは急激に増加する。本数値例では、15台あたりから急増している。

PCFについては、APが、各端末の伝送速度の比に応じた割合で、ポーリングをかけることとした。そして、その特長を生かすため、コンテンション期間を最短（最大長のデータパケット送信に要する時間）に設定した。また、コンテンション期間とコンテンション・フリー期間の合計を100 [msec]とした。高速端末の増加に伴って、スループットはほぼ線形的に増加しているが、高速端末が多くなると、提案方式やSTF-MACよりもスループットが低くなる。これは、高速端末が多くなると、ポーリングのための制御パケットの時間比率が高くなって、オーバーヘッドが大きくなるためと考えられる。

STF-MACおよび提案方式では、送信時間の公平性が保たれているため、高速端末の増加に伴って、スループットが線形的に増加している。アイドル時間を削減したぶん、および衝突を回避したぶん、提案方式のスループットが高くなっている。しかし、公平性を保つために、低速端末にある程度の送信機会を与えなければならないため、スループットが大幅に向上するわけではない。

3.4 DCF が混在するときの性能

STF-MAC、提案方式により送信時間の公平性を保つためには、APおよび全端末がそれぞれの方式に対応している必要がある。しかし、方式が普及する過程においては、方式に未対応の端末が混在する状況下での運用を考えなければならない。そこで、本節では、標準方式であるDCFのみに対応した端末が混在する状況を想定した性能評価を行う。以下、DCF、STF-MAC、提案方式に対応している端末をそれぞれDCF端末、STF端末、提案方式端末とよぶことにする。

STF端末とDCF端末が混在している状況下では、各端末は自身の方式でパケットを送信する。すなわち、STF端末は自身が算出した送信確率に従ってパケットを送信し、DCF端末は自身がランダムに定めた待機時間が経過した後パケットを送信する。

これに対して、提案方式端末とDCF端末が混在している状況下では、2.1節で述べたように、待機時間一覧表の有効期間内において、APと提案方式端末がSIFS間隔でパケットを送信し続けている。そのため、DIFS期間のアイドル状態が現れず、DCF端末は送信機会を得られない。そこで、DCF端末がパケットを送信する時間を確保するために、有効期間 I_{valid} をブロードキャスト間隔 I_{broad} より短く設定し、 I_{valid} 終了後、次の待機時間一覧表のブロードキャストまで、提案方式端末はパケットを送信しない。これにより、DIFS期間のアイドル状態が現れるので、DCF端末がパケットを送信することができる。以上で述べた仕組みにより、有効期間が切れてから次のブロードキャストが発生するまでの期間（長さ $I_{\text{broad}} - I_{\text{valid}}$ ）は、DCF端末のみがパケットを送

Fig. 8 Throughput versus the number of high-rate stations when the number of DCF stations is 10

Fig. 9 Transmission time ratio versus the number of high-rate stations when the number of DCF stations is 10

信することになる。以下、この期間を DCF 期間とよび I_{DCF} と表記する。すなわち、

$$I_{\text{broad}} = I_{\text{valid}} + I_{DCF}$$

である。ここでは、簡単のため、有効期間 I_{valid} と DCF 期間 I_{DCF} が、それぞれ提案方式端末の台数 N_{Pro} と DCF 端末の台数 N_{DCF} に比例するように、

$$I_{\text{valid}} = \frac{N_{\text{Pro}}}{N_{DCF} + N_{\text{Pro}}} I_{\text{broad}}$$

$$I_{DCF} = \frac{N_{DCF}}{N_{DCF} + N_{\text{Pro}}} I_{\text{broad}}$$

とする。なお、端末が提案方式に対応していることを示すには、MAC ヘッダの実質的な未使用フィールドの活用が考えられる。たとえば、プロトコルバージョン・フィールドには、現状では 0 が入っているため、ここに 0 以外の値を入れておくことが考えられる。

まず、方式がそれほど普及していない場合の例として、STF 端末、DCF 端末が 10 台ずつの場合と提案方式端末、DCF 端末が 10 台ずつの場合の性能を比較する。高速端末台数を 0 から 20 まで 2 台ずつ (DCF 端末、STF 端末または提案方式端末をそれぞれ 1 台ずつ) 増加させたときのスループットを Fig. 8 に、STF-MAC または提案方

Fig. 10 Throughput versus the number of high-rate stations when the number of DCF stations is 4

Fig. 11 Transmission time ratio versus the number of high-rate stations when the number of DCF stations is 4

式に対応している高速および低速端末の送信時間の割合を Fig. 9 に示す。いずれの図においても、高速端末台数の 2 台ずつの増加に伴って、低速端末台数は 2 台ずつ減少する。すなわち、図の横軸の値が x のとき、DCF 高速端末、DCF 低速端末の台数はそれぞれ $x/2$, $(20-x)/2$ となる。また、このとき、STF または提案方式の高速端末、低速端末の台数はそれぞれ $x/2$, $(20-x)/2$ となる。

Fig. 8 より、STF 端末と DCF 端末が混在する状況下では、DCF 端末のみで高速端末を増加させたとき (Fig. 7 の DCF) と同様の傾向が現れる。この原因は STF-MAC で算出される STF 端末の送信確率が小さいためと考えられる。そのため、STF 端末は DCF 端末に比べて送信機会を得にくく、Fig. 9 に示すように、送信時間の割合が小さくなっている。これに対して、提案方式端末と DCF 端末が混在する状況下では、スループットはほぼ線形的に増加している。これは、パケット送信時間帯を方式ごとに完全に分離しているため、Fig. 9 もその効果が現れていることを示している。

つぎに、方式の普及がある程度進んだ場合の例として、STF 端末 16 台、DCF 端末 4 台の場合と提案方式端末 16 台、DCF 端末 4 台の場合の性能を比較する。上述の数値例と同様、高速端末台数を 0 から 20 まで 2 台ずつ増加

させたとき（この増加に伴って低速端末台数は 2 台ずつ減少する）のスループットを Fig. 10 に、STF-MAC または提案方式に対応している高速および低速端末の送信時間の割合を Fig. 11 に示す。ただし、この場合は、高速端末台数が 8 台になった時点で、DCF 端末はすべて高速端末となる。以降の高速端末の増加では、STF 端末または提案方式端末の高速端末が 2 台ずつ増加する。

Fig. 10 より、STF 端末と DCF 端末が混在する状況下では、高速端末 8 台以下のとき、DCF の影響を強く受け、スループットが徐々に増加した後、急激に増加するという Fig. 7 と同様の傾向が見れる。高速端末が 8 台を超えると、DCF 端末はすべて高速に置き換えられているため、DCF の影響は小さくなる。このとき、スループットが、提案方式端末と DCF 端末が混在する状況下よりも大きくなっている。しかし、これは、Fig. 11 に示すように、STF 低速端末の送信時間の割合が小さく、そのぶん DCF 高速端末が送信機会を多く得ているためである。これに対して、提案方式では、方式ごとのパケット送信時間帯を分離しているので、DCF の影響は小さく、また、Figs. 10, 11 に示すように、送信時間の公平性がほぼ保たれている。

4. おわりに

本論文では、伝送速度の異なる端末が混在している無線 LAN で問題となる performance anomaly を解決するために、各端末の送信時間の公平性を達成するアクセス方式を提案し、既存方式との性能比較により、その有効性を示した。提案方式の特長は、パケット衝突やアイドル時間が発生しない非競合型アクセスにより、高いスループットが得られることである。また、提案方式が普及する過程で想定される DCF 端末が混在する状況への対処法も示した。

提案方式では、伝送エラー発生時に、各端末が管理するスケジュール決定用のワーキング表に齟齬が生じて、パケット衝突が頻発する恐れがある。この問題への対処として、論文中にワーキング表の修復法を示した。チャネル状態が非常に悪くない限り、有効な対処法と考えられるが、これを完全なものとするのが今後の課題として残されている。

また、各方式の特徴を比較しやすくするため、やや極端な仮定のもとでの性能評価を行った。今後は、下りトラフィックが多く発生する場合や、総端末数に対して実際に通信する端末が少ない場合などのより現実的な状況を想定した評価が望まれる。

参考文献

- [1] M. S. Gast: *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*, O'Reilly (2003)
- [2] S. Biaz and S. Wu: ERA: effective rate adaptation for WLANs; *NETWORKING 2008, Ad Hoc and Sensor*

- Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, LNCS 4982, pp. 901–913 (2008)
- [3] A. Kamerman and L. Monteban: WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band; *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 2, No. 3, pp. 118–133 (1997)
- [4] M. Lacage, M. H. Manshaei and T. Turletti: IEEE 802.11 rate adaptation: a practical approach; *Proc. 7th ACM MSWiM*, pp. 126–134 (2004)
- [5] S. H. Y. Wong, H. Yang, S. Lu and V. Bharghavan: Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks; *Proc. 12th ACM MobiCom*, pp. 146–157 (2006)
- [6] M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel and A. Duda: Performance anomaly of 802.11b; *Proc. INFOCOM 2003*, pp. 836–843 (2003)
- [7] G. R. Cantieni, Q. Ni, C. Barakat and T. Turletti: Performance analysis under finite load and improvements for multirate 802.11; *Computer Communications*, Vol. 28, No. 10, pp. 1095–1109, Elsevier (2005)
- [8] S.-H. Yoo, J.-H. Choi, J.-H. Hwang and C. Yoo: Eliminating the performance anomaly of 802.11b; *Networking – ICN 2005*, LNCS 3421, pp. 1055–1062 (2005)
- [9] M. Heusse, F. Rousseau, R. Guillier and A. Duda: Idle sense: An optimal access method for high throughput and fairness in rate diverse wireless LANs; *Proc. ACM SIGCOMM '05*, pp. 121–132 (2005)
- [10] H. Kim, S. Yun, I. Kang and S. Bahk: Resolving 802.11 performance anomalies through QoS differentiation; *IEEE Communication Letters*, Vol. 9, No. 7, pp. 655–657 (2005)
- [11] H. Lee and C.-H. Choi: Achieving airtime fairness and maximum throughput in IEEE 802.11 under various transmission durations; *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E94-B, No. 11, pp. 3098–3106 (2011)
- [12] 諏訪下, 稲井: IEEE 802.11 無線 LAN におけるエアタイムフェアネス達成時のフレーム衝突低減方式; 電子情報通信学会技術研究報告, IN2013-49 (2013)
- [13] 諏訪下, 稲井: 無線 LAN においてエアタイムフェアネスを達成するアクセス方式 – データフレームロスと DCF 端末混在への対処 –; 電子情報通信学会技術研究報告, NS2013-164 (2014)
- [14] 諏訪下, 稲井: 無線 LAN において送信時間の公平性を達成するフレーム衝突低減方式 – 不飽和トラフィック下での有効性の検討 –; 電子情報通信学会技術研究報告, IN2014-107 (2015)

付 録

STF-MAC における送信確率算出法

まず、上りのトラフィックのみで公平性を考える。端末台数を n 、端末 i ($= 0, 1, \dots, n-1$) の送信確率を τ_i とすると、スロットがアイドルとなる確率 P_{idle} は

$$P_{\text{idle}} = \prod_{k=0}^{n-1} (1 - \tau_k)$$

となるので、端末 i のデータフレーム送信が衝突により失敗する確率 $P_{\text{col},i}$ は次式ようになる。

$$P_{\text{col},i} = 1 - \prod_{k \neq i} (1 - \tau_k) = 1 - \frac{P_{\text{idle}}}{1 - \tau_i} \quad (\text{A1})$$

また、端末 i のデータフレーム送信が、成功したときに費やされる時間 b_i 、衝突により失敗したときに費やされる時間 c_i はそれぞれ次のようになる。

$$b_i = PLCP_{\text{oh}} + \frac{MAC_{\text{oh}} + S_i + FCS}{r_i} + SIFS + ACK + DIFS$$

$$c_i = PLCP_{\text{oh}} + \frac{MAC_{\text{oh}} + S_i + FCS}{r_i} + EIFS$$

ただし、 $PLCP_{\text{oh}}$ は PLCP オーバヘッド送信時間、 MAC_{oh} は MAC オーバヘッド長、 S_i は端末 i のペイロード長、 FCS は FCS 長、 r_i は端末 i の伝送速度、 $SIFS$ は SIFS 期間、 ACK は ACK フレーム送信時間、 $DIFS$ は DIFS 期間、 $EIFS$ は EIFS 期間である。

$i > j$ ならば $c_i \geq c_j$ 、3 台以上の衝突はないとすると、スロット時間を δ として、全体のスループット Thr_{agg} は次式のようになる。

$$Thr_{\text{agg}} = \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i (1 - P_{\text{col},i}) S_i$$

$$\left/ \left[\delta P_{\text{idle}} + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \tau_i (1 - P_{\text{col},i}) + \sum_{i=0}^{n-1} c_i \sum_{j=0}^{i-1} \left\{ \tau_i \tau_j \prod_{k \neq i,j} (1 - \tau_k) \right\} \right] \right.$$

分母の第 1 項はアイドル、第 2 項は送信成功、第 3 項は衝突のときに費やされる時間の期待値である。そこで、端末 i の ST (Successful Transmission) 時間を

$$E[T_i] = b_i \tau_i (1 - P_{\text{col},i}) = b_i \tau_i \frac{P_{\text{idle}}}{1 - \tau_i} \quad (\text{A2})$$

と定義し、拘束条件 $E[T_0] = E[T_1] = \dots = E[T_{n-1}]$ のもとで、 Thr_{agg} を最大にする $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{n-1}$ を求める。

拘束条件と (A2) 式より、 τ_0 と τ_i の間に、次式の関係が得られる。

$$\tau_i = \frac{b_0 \tau_0}{(b_0 - b_i) \tau_0 + b_i} \quad (\text{A3})$$

(A1), (A3) 式を利用し、

$$A = b_0 \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i}{b_i}$$

$$B = nb_0$$

$$C = b_0^2 \sum_{i=0}^{n-1} c_i \sum_{j=0}^{i-1} \frac{1}{b_i b_j}$$

$$x = \frac{\tau_0}{1 - \tau_0}$$

とおくと、

$$Thr_{\text{agg}} = \frac{Ax}{Cx^2 + Bx + \delta}$$

となる。 $dThr_{\text{agg}}/dx = 0$ を解くと、 Thr_{agg} を最大にする τ_0 (τ_0^* と表記する) が、次式のように得られる。

$$\tau_0^* = \frac{\sqrt{\delta/C}}{1 + \sqrt{\delta/C}}$$

下りのトラフィックも含めて公平性を考えるときは、拘束条件に $E[T_{\text{AP}}] = E[T_0] + E[T_1] + \dots + E[T_{n-1}]$ 、すなわち、

$$b_{\text{AP}} \tau_{\text{AP}} \frac{P_{\text{idle}}^{\text{UD}}}{1 - \tau_{\text{AP}}} = P_{\text{idle}}^{\text{UD}} \sum_{i=0}^{n-1} b_i \frac{\tau_i}{1 - \tau_i}$$

を加える。ただし、 $P_{\text{idle}}^{\text{UD}} = (1 - \tau_{\text{AP}}) P_{\text{idle}}$ である。すると、 τ_{AP} と τ_0 の間に次式の関係が得られる。

$$\tau_{\text{AP}} = \frac{nb_0 \tau_0}{(nb_0 - b_{\text{AP}}) \tau_0 + b_{\text{AP}}}$$

Thr_{agg} は次式のようになる。

$$Thr_{\text{agg}} = \left\{ \tau_{\text{AP}} (1 - P_{\text{col,AP}} S_{\text{AP}}) + \sum_{i=0}^{n-1} \tau_i (1 - P_{\text{col},i}) S_i \right\}$$

$$\left/ \left\{ \delta P_{\text{idle}}^{\text{UD}} + b_{\text{AP}} \tau_{\text{AP}} (1 - P_{\text{col,AP}}) + \sum_{i=0}^{n-1} b_i \tau_i (1 - P_{\text{col},i}) + T_{\text{col}} P_{\text{col}} \right\} \right.$$

ただし、

$$T_{\text{col}} P_{\text{col}} = \sum_{i=0}^{n-1} \max(c_i, c_{\text{AP}}) \tau_i \tau_{\text{AP}} \prod_{j \neq i, \text{AP}} (1 - \tau_j)$$

$$+ \sum_{i=0}^{n-1} c_i \sum_{j=0}^{i-1} \left\{ \tau_i \tau_j \prod_{k \neq i,j} (1 - \tau_k) \right\}$$

である。ここで、

$$D = S_{\text{AP}} \frac{nb_0}{b_{\text{AP}}} + b_0 \sum_{i=0}^{n-1} \frac{S_i}{b_i}$$

$$E = 2nb_0$$

$$F = nb_0^2 \sum_{i=0}^{n-1} \max(c_i, c_{\text{AP}}) \frac{1}{b_{\text{AP}} b_i} + b_0^2 \sum_{i=0}^{n-1} c_i \sum_{j=0}^{i-1} \frac{1}{b_i b_j}$$

$$x = \frac{\tau_0}{1 - \tau_0}$$

とおくと,

$$Thr_{\text{agg}} = \frac{Dx}{Ex^2 + Fx + \delta}$$

となるので, $dThr_{\text{agg}}/dx = 0$ を解くと, 次式のような τ_0^* が得られる.

$$\tau_0^* = \frac{\sqrt{\delta/F}}{1 + \sqrt{\delta/F}}$$

著者略歴

す 諏 訪 下 敦 規

2013 年 3 月岡山県立大学情報工学部情報通信工学科卒業, 2015 年 3 月同大学院情報系工学研究科博士前期課程システム工学専攻修了. 同年 4 月ドコモ・システムズ(株)入社. 在学中, 無線 LAN のアクセス方式に関する研究に従事.

い 稲 井

ひろし 寛 (正会員)

1985 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業, 1987 年同大学院博士前期課程修了. 1988 年神戸大学総合情報処理センター助手, 1993 年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科助教授, 2000 年同教授, 現在に至る. 主として計算機および通信システムの性能評価, 通信プロトコル, 分散処理に関する研究に従事. 工学博士. ACM, IEEE, 電気学会, 電子情報通信学会の各会員.