

MAC・PHY 融合技術を用いた Collision detection による超高効率無線伝送の研究開発

代表研究者 平栗 健史 日本工業大学工学部・准教授
共同研究者 西森 健太郎 新潟大学工学部・准教授
共同研究者 吉野 秀明 日本工業大学工学部・教授

1 はじめに

無線 LAN (Local Area Network) [1]では、高速伝送の実現手段として MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送技術が採用されている [2][3]. しかし、PHY (Physical) 層で高い伝送速度が得られても、MAC (Medium Access Control) 層では、帯域利用効率が非常に低いため、実効スループットが低下する課題がある. この課題を解決するために、衝突検知技術による新しいアクセス制御技術を提案した. この提案方式は、MIMO 伝送のフレーム構成を利用し、衝突/干渉を検出するとともに即座に再送制御を行うことができるため、約 90% の伝送効率が得られ、スループットも従来方式より 1.5 倍以上向上する.

本研究では、提案方式のスループット特性および伝送効率の特性を明らかにした. また、マルコフ連鎖モデルを用いた理論解析モデルを考案し、計算機シミュレーションの評価結果と比較を行った. この結果、理論解析と計算機シミュレーション結果がほぼ一致したことにより、提案方式の妥当性および有効性を確認した.

2 提案方式の概要

提案方式のアクセス制御手順を図 1 に示す. データを送信する場合は、従来方式と同様に DIFS (Distributed Inter-Frame Space) と呼ばれる一定期間のキャリアセンス後、ランダム時間の Backoff 処理によるキャリアセンスを実施する. これらのキャリアセンス中にチャンネル Idle であれば送信処理に移行する. データを送信する前には、各アンテナから順次チャンネル推定のためのプリアンプルが送信される. 例えば、アンテナ (ANT#1) から最初にショートプリアンプルが送信され、ANT#2 では、他の無線局から送信される干渉波を検出するためのキャリアセンスを実施する. ショートプリアンプル送信中において、チャンネルが Idle であれば、データを各アンテナから空間多重によってデータを同時に送信する. チャンネルが Busy の場合は、データ (Payload) を送信する前に送信処理を即座に中断し、再送制御に移行する. 再送制御では、これらの手順を繰り返し実施する.

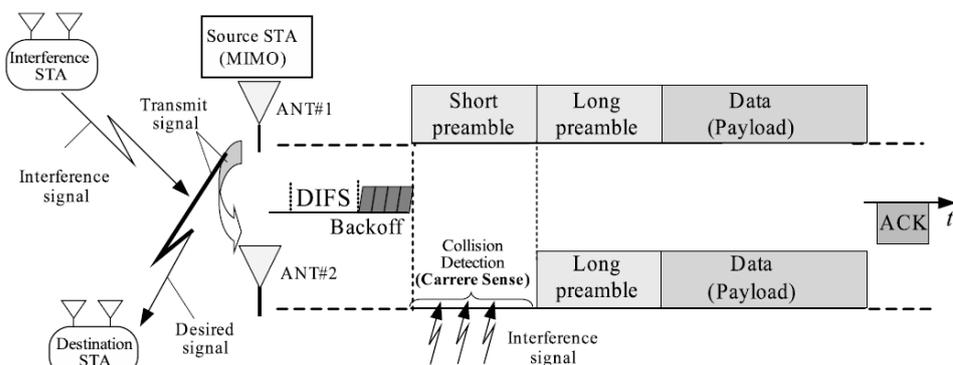


図 1 MIMO フレームを用いた提案方式の伝送手順

2 提案方式の計算機シミュレーション評価

提案方式および従来方式は、計算機シミュレーション（OPNETModeler）[4]を用いて評価し、比較対象となる従来方式は IEEE802.11g および IEEE802.11n に準拠したアクセス制御方式を用いた。無線 LAN ネットワーク構成は、1AP(Access Point) のセルに 1~40 台の STA(Station) を帰属させる。発生させたトラフィックは、STA から AP 方向に UDP (User Data-gram Protocol) トラフィックの packet データを連続で送信し、パケットの衝突が頻繁に生じる無線環境とした。本評価では、提案方式の衝突検知の効果を解析することを目的とし、MIMO アンテナの機能は衝突検知のみに用いた。図 2 に実効スループット特性、図 3 に伝送効率を示す。

図 2 のスループット特性の評価は、STA 数が 20 台と 40 台のそれぞれを設置したネットワーク構成において評価し、全ての STA (20STAs / 40 STAs) から発生する総トラフィックを横軸とし、AP で受信するデータ全ての総スループット特性を縦軸に示す。各伝送レートの提案方式はトラフィック量が増加した際もわずかにスループットは低下するが、帰属する STA 数に関わらず高いスループットが得られた。従来方式は、トラフィック量を増やすとパケット衝突率も増加するため、再送制御によるオーバーヘッドの影響が大きくなり、スループットは抑制される。また伝送レートが高くなるにつれ、このオーバーヘッドは大きく影響している。

次に、図 3 の伝送効率は、STA 数が 1~40 台へ増加した際の帯域の利用率の変化を評価した。ここで示す伝送効率は、1 台の STA が AP と通信をする際に得られるスループット値を基準 (100%) として、STA 数を増やした際に得られた総スループットを正規化して求めている。1STA 当たりで発生するトラフィック量は、帰属する STA 数の全てで無線帯域が飽和するように設定した。すなわち、図 2 の評価と同様に 12Mbit/s、24Mbit/s、54Mbit/s 以上のトラフィックを発生している。また、有線 LAN との伝送効率を比較するために、Ethernet : 100Base-Tx における伝送効率もあわせて評価を行った。従来方式は STA 数が増加すると伝送効率は低下し、伝送レート 24Mbit/s、54Mbit/s における STA 数 40 台の場合では約 65% となる。一方、提案方式では有線 LAN よりも約 10% 低くなるが、STA 数が 40 台まで増加した際も高い伝送効率が維持されている。また伝送レート 12Mbit/s において、提案方式と従来方式は共に他の伝送レートよりも伝送効率は高い特性が得られている。これは、伝送レートが低い場合にはオーバーヘッドの影響は少ないことが原因と考えられ、これらの結果より伝送レートが高くなるほど提案方式は高い効果が得られる [5]。

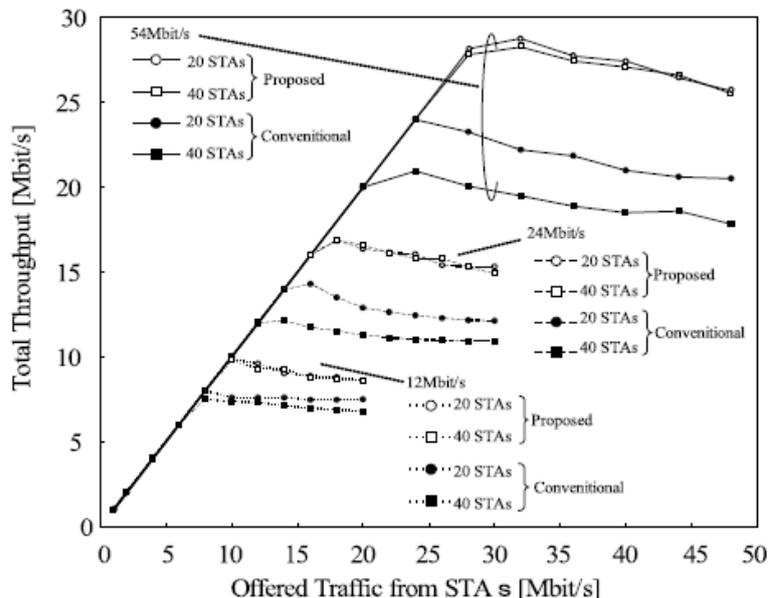


図 2 実効スループット特性の比較

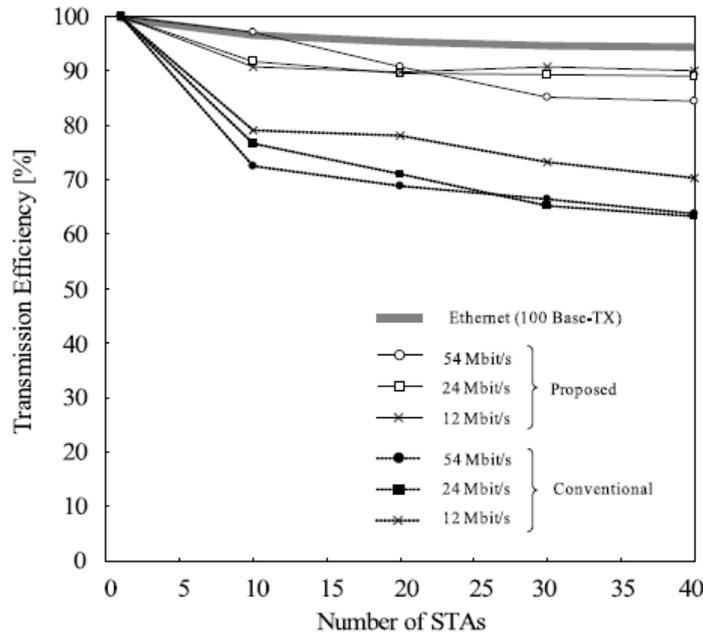


図3 伝送効率の比較

3 提案方式の理論解析による評価

マルコフ連鎖モデルを用いた提案方式の理論解析モデルを考案し、計算機シミュレーションの評価結果と比較を行った。この結果、理論解析と計算機シミュレーション結果がほぼ一致したことにより、提案方式の妥当性および有効性を明らかにした。

これまでのシミュレーション結果の妥当性を確認するため、マルコフ連鎖モデルを用い、提案方式の理論解析モデルを考案した。マルコフ連鎖とは、時間変化によって起こる状態遷移に対して、遷移確率が過去の状態によらず、現在の状態のみで決まるという確率過程の一種である。今回の理論解析で用いたモデルは、バックオフによる送信確率導出のために利用した。

まず、全体の送信確率を状態遷移から考える。ここで、送信されたパケットが送信に成功する確率 $P(TX|s=i)$ とし、送信に失敗し、再送する確率 $P(s=i|TX)$ を求めると、

$$P(TX|s=i) = \frac{1}{1 + E[b_i]} \quad (1)$$

$$P(s=i|TX) = \frac{(1-p)p^i}{1-p^{R+1}} \quad (2)$$

となる。ここで、 s はバックオフステージ、 $E[b_i]$ はスロットタイム、 p は衝突確率、 R は最大再送回数である。以上の二つの式よりパケットの送信確率を算出すると、

$$\tau = \frac{1}{\sum_{i=0}^{R+1} \frac{1-p}{1-p^{R+1}} p^i (1 + E[b_i])} \quad (3)$$

となり、送信確率が求まる。また、衝突確率 p は以下のようになり、

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (4)$$

τ と p の値は、逐次代入法を用い、式(3)(4)より求める。続いて各端末の送信確率を求める。1 端末が送信する確率 P_{tr} 、および、送信成功確率 P_s は以下の式のようになる。

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (5)$$

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (6)$$

また、送信成功時にかかる時間 T_s と送信失敗時にかかる時間 T_c を求める。従来方式では、

$$T_s = H + DATA + SIFS + ACK + DIFS + \sigma \quad (7)$$

$$T_c = H + DATA + EIFS + \sigma \quad (8)$$

となり、提案方式では、

$$T_s = CS + H + DATA + SIFS + ACK + DIFS + \sigma \quad (9)$$

$$T_c = CS + EIFS + \sigma \quad (10)$$

となる。CSはキャリアセンス時間、Hはヘッダー送信時間、 σ は1スロットタイムである。これらの式から導いた値を用いて式(11)よりスループットを求めることができる。

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_c + P_{tr} (1 - P_s) T_c} \quad (11)$$

図8に従来方式のシミュレーション値と理論値、図9に提案方式の計算機シミュレーション値と理論値の比較評価結果を示す。今回の評価では、パケット衝突による純粋な効果と、理論解析と計算機シミュレーションの比較による妥当性を確認するため、MIMO伝送による複数のストリームや、フレームを連続送信するフレームアグリゲーションは用いず、シングルストリームのみで評価を行った。また、提案方式との公平な評価を行うために、従来方式は、IEEE802.11g準拠のMIMOを用いない伝送方式としている。図8の従来方式の結果では、伝送レート12、24Mbit/sで計算機シミュレーション値と理論値の傾向が一致していることがわかる。これにより、理論解析結果と計算機シミュレーション結果は、妥当な結果だといえる。また、伝送レート54Mbit/sにおいて、端末10台、20台のとき、シミュレーション結果のスループットが低い原因として、伝送レートが高くなった際、一定時間で送信することができるパケットが増えるため衝突のための再送によるバックオフステータ

ジの切り替えが多かったためだと考えられる。図5の提案方式の比較結果においては、計算機シミュレーション結果と理論値の傾向が、伝送レートが異なる場合においてもほぼ一致し

ていることが確認できた。以上のことから、これまでシミュレーションを行ってきた提案方式の評価結果は妥当だったといえる。また、提案方式の有効性が、十分得られることが確認できた[6]。

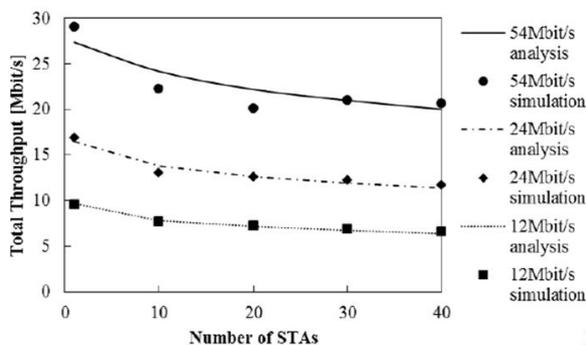


図4 従来方式の比較

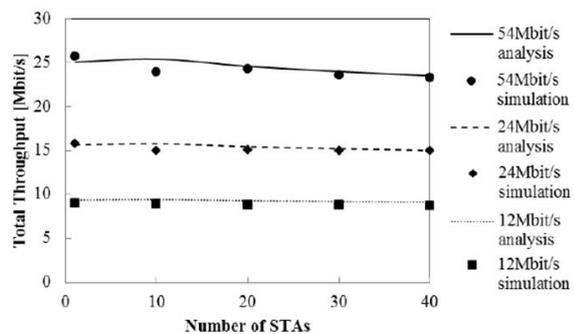


図5 提案方式の比較

【参考文献】

- [1] IEEE802.11 Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, March 2012.
- [2] J. H. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," IEEE J. Select Areas Commun., vol. SAC-5, pp. 871-878, June 1987.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," Wireless Personal Commun., vol. 6, pp. 311-335, 1998.
- [4] OPNET: http://www.johokobo.co.jp/opnet_rd/opnet_rd_index.html
- [5] T. Hiraguri, K. Nishimori, T. Ogawa, R. Kataoka, H. Takase, M. Hideo, "Access control scheme for collision detection utilizing MIMO transmission," IEICE ComEX, Vol. 2, No. 4, pp.129-134, April. 2013.
- [6] 森野善明, 平栗健史, 小川知将, 西森健太郎, 吉野秀明, "MIMO 伝送を用いた Collision Detection アクセス制御方式の理論解析," 信学技報, vol. 113, no. 361, RCS2013-219, pp. 77-81, 2013 年 12 月

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Access control scheme for collision detection utilizing MIMO transmission	IEICE Communications Express	2013 年 4 月
Interference detection method using wireless LAN based MIMO transmission	IEICE Communications Express	2013 年 7 月
M. Kawahara, K. Nishimori, R. Kataoka, T. Hiraguri, H. Makino	Proceeding in Asia Pacific Microwave Conference 2013 (APMC)	2013 年 11 月
無線 LAN ベースの MIMO 伝送を利用した干渉信号検出法	電子情報通信学会技術報告 (アンテナ・伝播研究会)	2013 年 5 月
MIMO 伝送を利用した Collision detection ～多重伝送とアグリゲーションによるスループット特性/伝送効率の評価～	電子情報通信学会技術報告 (通信方式研究会)	2013 年 7 月
衝突検出機能を用いた超高効率無線伝送の提案および通信品質 ～通信品質に係わる遅延時間およびパケット損失特性の評価～	電子情報通信学会技術報告 (コミュニケーション・クオリティ研究会)	2013 年 7 月
MIMO 伝送を用いた Collision Detection ～実現のための干渉電力推定について～	電子情報通信学会技術報告 (無線通信システム研究会)	2013 年 12 月
MIMO 伝送を用いた Collision Detection ～アクセス制御方式の理論解析～	電子情報通信学会技術報告 (無線通信システム研究会)	2013 年 12 月
MIMO 伝送を用いた Collision Detection のための屋内伝搬特性評価	電子情報通信学会技術報告 (アンテナ・伝播研究会)	2014 年 1 月
〔特別招待講演〕無線 LAN の動向と要求される新しい技術	電子情報通信学会技術報告 (通信方式研究会)	2014 年 3 月
無線 LAN の MIMO-OFDM 伝送におけるショートプリアンプルを用いた干渉検出方法の実験評価	2013 年電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集	2013 年 9 月

MIMO 伝送における衝突検出機能を用いたスループットおよび伝送効率の評価	2013年電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集	2013年9月
無線 LAN における Collision Detection の定量評価	2014年電子情報通信学会総合大会予稿集	2014年3月
無線 LAN における MIMO 伝送を用いた Collision Detection のための実伝搬測定	2014年電子情報通信学会総合大会予稿集	2014年3月
MIMO 伝送における衝突検出機能を用いたアクセス制御の理論解析	2014年電子情報通信学会総合大会予稿集	2014年3月