

無線アドホックネットワークにおけるフレーム結合に基づく ペーシング方式の提案

中村 直毅[†] 北形 元[‡] 白鳥 則郎[‡]

[†] 東北大学大学院医学系研究科

[‡] 東北大学大学院情報科学研究科/電気通信研究所

あらまし IEEE 802.11 では、RTS/CTS 交換機能による仮想キャリアセンス機構を用いて隠れ端末問題を効果的に解決することができる。しかしながら、無線アドホックネットワークにおけるマルチホップ通信では、IEEE 802.11 の RTS/CTS 交換による仮想キャリアセンス機構を用いても、他の無線端末の通信による電波干渉の回避できない *Interference* 問題が存在する。この結果、ネットワークロード、ネットワークサイズ、および無線端末の移動速度などが増加するにつれて問題が顕著に表われ、チャネル利用率の減少や、極端なパフォーマンスの低下が発生する。そこで、MAC 層においてネットワークに送出されるフレーム数を効果的に調節することにより *Interference* の発生を抑制することで、無線アドホックネットワークにおけるマルチホップ通信時のパフォーマンスを向上させるフレーム結合型ペーシング方式を提案する。本方式は、Frame Aggregation アルゴリズムと Extra Backoff アルゴリズムから構成され、経路中のセッション数を効果的に調整する。ネットワークシミュレータ ns2 による性能評価を通し、チューニングの結果最大 98% スループットが向上することを確認し、本提案方式の有効性を確認した。

Pacing scheme based on Frame aggregation over MANET

Naoki Nakamura[†], Gen Kitagata[‡], and Norio Shiratori[‡]

[†] School of Medicine, Tohoku University

[‡] Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

Abstract IEEE 802.11 solves hidden terminal problem by using RTS/CTS handshaking mechanism. However, the said mechanism can not solve the *Interference Problem* whenever the *Interference Range* is larger than the *Transmission Range*. Such situation is exacerbated in Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs), where frame relay is done in a multihop fashion through a chain of intermediate nodes, and results in severe performance degradation. In this paper, we present an efficient pacing scheme to adjust the timing of frame transmission in a MANET deployed over IEEE 802.11 nodes. Unlike previous works that limit the amount of frames to be injected into the network, we propose frame aggregation to reduce the number of frames traveling through the network. In addition, we also use extra backoff to maintain the desired performance. By taking different scenarios into account, we conduct intensive simulations. Simulation results show that by appropriately adjusting system parameters, our pacing scheme could lead to a maximum of 98% performance improvement in throughput. In addition, unlike previous works, which need to rely on TCP congestion control, our proposed mechanism is free from the aid from upper layers and thus can be easily deployed over MANETs.

1 はじめに

限られたネットワーク資源を効果的に使用する無線メディアアクセス制御 (MAC: Medium Access Control) の実現に向け、多くの研究がなされてきた [1] [2]。その結果、IEEE 802.11 は現在最も広く知られた無線 LAN の標準規格として用いられるようになった。IEEE 802.11 では、CSMA/CA に基づいた自律分散制御が行われ、コリジョンをできる限り軽減するために、ランダムなタイミングでパケットを送信する方式が採用さ

れている。また、データの受信確認は、ACK フレームによる受信応答によって行なわれる。さらに、隠れ端末問題によるコリジョンを効果的に防ぐため RTS/CTS (Request-to-Send/Clear-to-Send) 交換機構と仮想キャリアセンス機構 [3] が導入されている。しかしながら、マルチホップ通信が行われるモバイルアドホックネットワークでは、*Interference* による影響により、隠れ端末問題が発生し、パフォーマンスが大幅に低下することが知られている [4] [5]。[8] [9] においては、*Interference* の影響を軽減する方式が提案されているが、TCP に特

化しており、別の上位プロトコルに対応できないため、上位層に依存しなく interference の影響を受けにくい拡張型 IEEE 802.11 の実現が望まれている。

本研究では、TCP や UDP などの上位層に依存することなく Interference の影響を軽減を可能とする、フレームの送信タイミングを効果的に調整するフレーム結合型ペーシング方式を提案する。本提案方式は、フレームの結合とバックオフタイマーの延長から構成され、経路中のフレーム数とフレームの送信タイミングを調整することで、Interference の発生を軽減し、IEEE 802.11 のパフォーマンスが向上することが可能である。ネットワークシミュレーター ns2 を用いた計算機シミュレーションを通して、チューニングの結果スループットが最大 98% 向上することを確認し、本提案方式の有効性を確認した。

本稿の構成は、以下の通りである。2 章では、関連研究について説明する。3 章では、マルチホップ通信が行われる際に発生する Interference 問題の概略について説明する。続く 4 章では、本提案方式を説明する。5 章では、計算機シミュレーションによる性能評価を行い、本提案方式が効果的に機能することを確認し、本提案方式の有効性を示す。最後に 6 章で結論を述べる。

2 関連研究

TCP の輻輳制御アルゴリズムや ACK 応答を用いて Interference 問題を軽減する研究がなされてきた [8] [9]。これらの方式は、経路中のフレーム数をホップ数の 1/4 に調整することで Interference を効果的に軽減できるという考えに基づいて提案されている。[8] では、LRED (Link-layer Random Early Dropping) を用いた TCP 輻輳制御機能の改良と Backoff timer の調節を行っている。この方式では、MAC 層における再送回数を計測し、再送回数が小さい場合には低確率でフレームを破棄し、再送回数が大きい場合には高確率でフレームを破棄を行う。フレームが破棄されると、上位層へフレームが破棄されたことが通知され、TCP の輻輳制御が動作し、トラフィックの送出が抑制される。つまり、LRED を用いることによって、TCP の Congestion Window が最適化され、さらに、送信フレーム長を考慮した Backoff timer が生成することで、経路中のフレーム数の効果的な調整が行われる。[9] では、TCP トラフィックの RTT を用いたペーシング方式を提案している。この方式では、RTT を計測によって Interference の影響を予測し、経路中のフレーム数を調整している。具体的には、TCP の ACK パケットを受け取ると、送信されたフレーム長、ACK フレーム長、計測された RTT の値、平均 RTT の値から次のフレームの送信までにどれだけ遅延させるかを導出し、TCP の輻輳制御により経路中のフレーム数を調整している。上記 2 つの手法は TCP トラフィックを用いた場合には一定の効果を上げている。しかしながら、TCP の機能を活

用しているため、UDP トラフィックを用いた場合には適用できない。そこで、MANET 環境において MAC 層で Interference 問題解決し、上位層に依存せず、効率よいデータの転送を行うために、積極的かつ効果的に Interference の影響を削減できる通信方式の実現が必要である。

また、Interference を軽減するには、フレームの送信回数を削減することも有効である。そのため、フレームの結合を行う方式が提案されている [10][11]。IEEE 802.11n[10] では、チャンネルを有効に活用するため、複数のフレームを結合することで性能改善を試みている。しかしながら、Interference の影響については考慮されていない。また、[11] では、受信信号に含まれるノイズ量 (SNR) に基づいて、適切なフレーム長を算出する。フレームを送出する場合は自分より優先度の低いフレームを結合 (Piggyback) 一つのフレームとして送信する。この手法においては、ネットワークロードが高い場合には SNR 比が高くなるため、算出されるフレーム長が短くなり、フレーム結合が効果的に機能しないという課題が残されている。

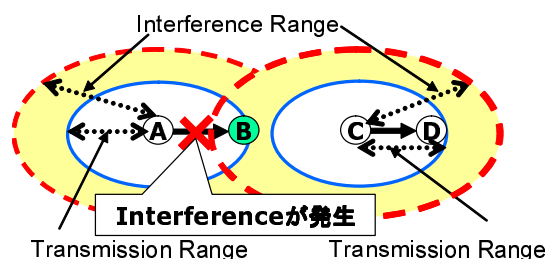


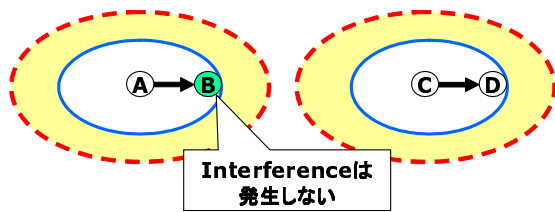
図 1: Interference の発生の例

3 Interference 問題

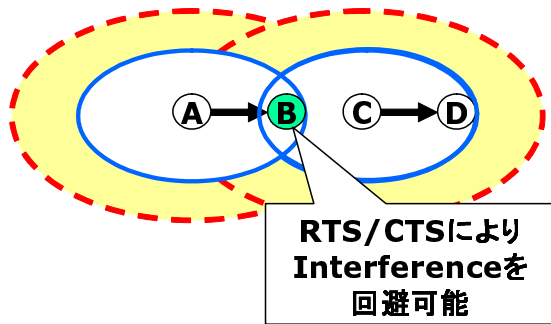
無線端末から発信された電波は、距離に応じて減衰する。そのため、他の無線端末が電波を正常に受信し、その内容を復号できる範囲が存在し、これを Transmission Range と呼ぶ。また、電波は到達するが、その内容を正常に復号できない範囲が存在し、これを Interference Range と呼ぶ。Transmission Range と Interference Range の関係を図 1 に示す。

IEEE 802.11 では、RTS/CTS 交換による仮想キャリアセンス機構を用いたチャンネル予約により、他の無線端末の通信による電波干渉を回避する機能を有している。しかしながら、Interference Range 内の無線端末は、RTS/CTS 交換における制御フレームを受信し、復号することができないため、RTS/CTS 交換機能だけでは隠れ端末を回避できない。この問題を、Interference 問題と呼ぶ。

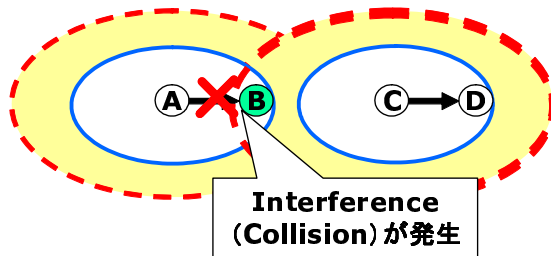
Interference 問題を分析するため、図 2 に無線端末 A と無線端末 B が通信可能な場合の電波の受信状況に応じたフレームの衝突の状況においてを分類したもの



(a) フレームの衝突が発生がない場合



(b) プロトコルにより回避可能なフレームの衝突が発生する場合



(c) プロトコルで回避できないフレームの衝突が発生する場合

図 2: 受信状況に基づいたフレームの衝突の分類

を示す。

図 2(a) は、無線端末 B と無線端末 C の間に十分な距離がある状況である。従って、線端末 B は、無線端末 C から送信される電波が届かない無線端末 A から送信されるフレームに衝突は発生しない。

図 2(b) は、RTS/CTS 交換機能を用いることによってフレームの衝突を回避できる状況である。ここでは、無線端末 B は、無線端末 A および無線端末 C の Transmission range に含まれており、無線端末 A と無線端末 B、無線端末 B と無線端末 C は、互いに通信できる状況である。そこで、無線端末 A および無線端末 C が同時にフレームを送信する場合、互いのフレーム同士で衝突が起き、フレームの消失が生じる。しかしながら、RTS/CTS 交換機能を用いることによって、無線端末 A および無線端末 C は、異なったタイミングでフレームを送信し、フレームの衝突の回避が可能である。

図 2(c) は、無線端末 B は、無線端末 A の Transmission Range に含まれており、無線端末 C の Interference Range に含まれている状況である。無線端末 B は、無線端末 C からの RTS/CTS 交換の制御フレームを復号できないため、無線端末 A からの通信開始を把握することは困難である。そのため、RTS/CTS 交換機能を用いたフレームの衝突の回避ができないため、フレームの消失が発生する。これを Interference 問題と呼ぶ。

この Interference 問題は、ネットワークサイズ、ネットワークロード、および端末の移動速度などが増加するにつれ顕著になり、利用可能なチャンネルの容量の減少や、極端なパフォーマンスの低下を生じる。従って、無線アドホックネットワークにおいて、Interference 問題の解決は、重要な課題である。

本研究で対象としている Interference 問題は、図 3 に示すように、予測可能型 Interference と予測不可能型 Interference の 2 つに分類される。予測可能型 Interference は、図 3(a) に示すように、無線端末 A が送出したフレームが、マルチホップ通信の経路上の無線端末 B、無線端末 C、無線端末 D と中継される際に、中継するフレーム同士が衝突するものである。この時、各無線端末からフレームを送信するタイミングをある程度予想することが可能なため、フレームの送信量や送信タイミングを調整することで、フレームの衝突の発生を軽減することができると考えられる。一方、図 3(b) に示すように、予測不可能型 Interference は、無線端末が送出したフレームとマルチホップ通信の経路外の無線端末が送出したフレームが衝突するものである。このフレームの衝突は、IEEE 802.11 の機能の範囲では回避できない。一般に、マルチホップ転送される無線アドホックネットワークでは、予測可能型 Interference は、予測不可能型 Interference よりも頻繁に発生することから、本研究では、予測可能型 Interference に焦点をあてる。

[8, 9] では、マルチホップ通信が行われる際に発生するフレームの衝突を軽減するため、経路中に送出するフレーム数を調整するメディアアクセス機能の改良を施し、フレームの衝突を軽減している。しかしながら、これらの方式は、TCP の輻輳制御機能を用いているため、TCP トラフィック以外には適用できないといった課題が残っている。

4 フレーム結合型ペーシング方式の提案

MAC 層においてネットワークに送出されるフレーム数を効果的に調節することにより、マルチホップ通信が行われる際に発生する予測可能型 Interference の発生を抑制できるフレーム結合型ペーシング方式を提案する。本提案方式の詳細な動作については、図 4 のフローチャートに示す。

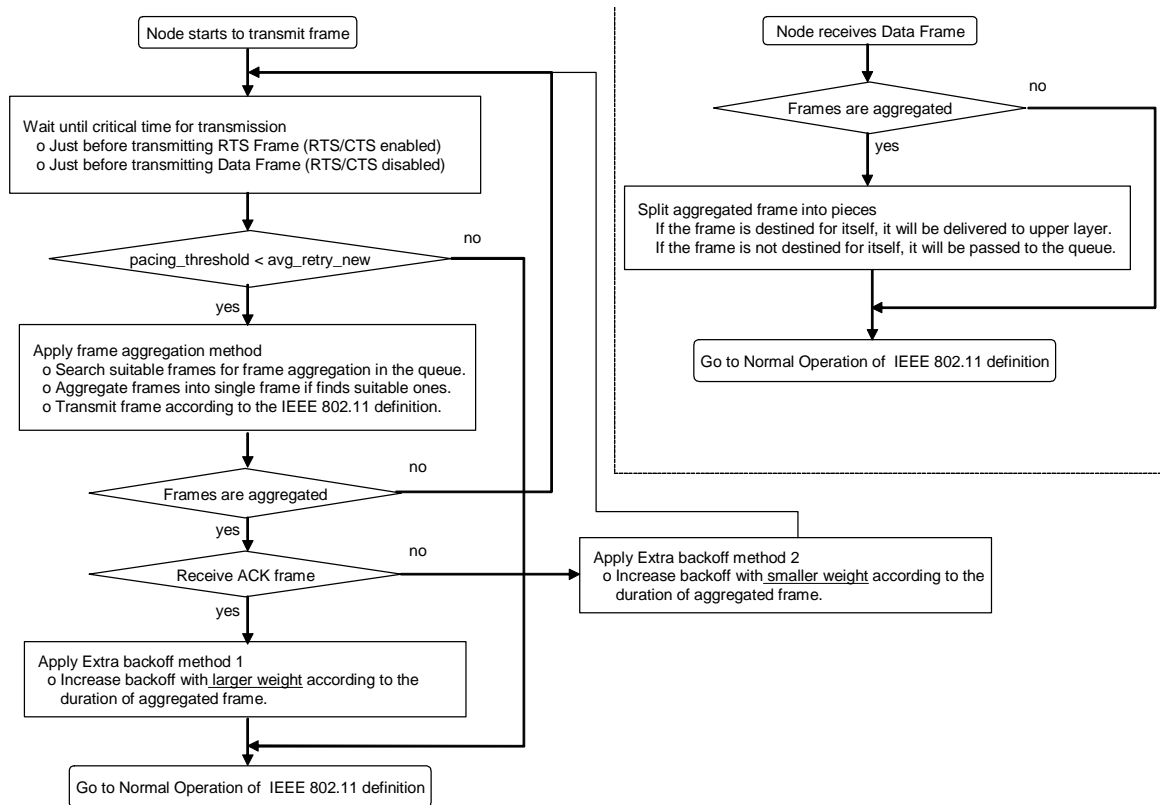
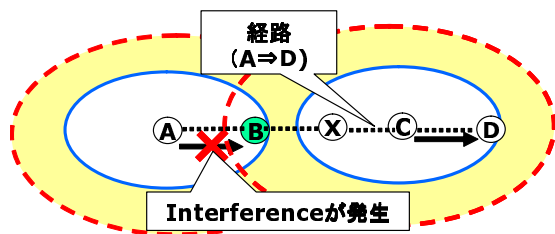
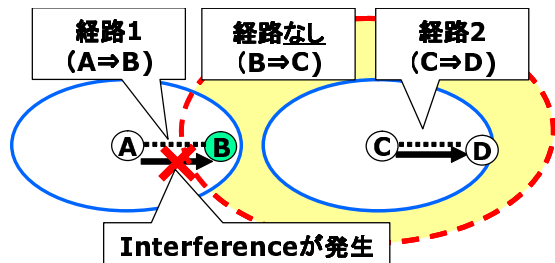


図 4: 提案方式のフローチャート.



(a) 予測可能型 Interference



(b) 予測不可能型 Interference

図 3: Interference の分類

本提案方式は、Frame Aggregation アルゴリズムと、Extra Backoff アルゴリズムから構成される。Frame Aggregation アルゴリズムでは、同一の経路を通るフレーム同士を結合することで、経路内のフレーム数を削減することができる。また、Extra Backoff アルゴリズムでは、バックオフタイムを延長することで、フレームの送出タイミングを調整し、予測可能型 Interference の発生を抑制する。なお、これらの仕組みは、ペーシングを行い Interference の発生を抑制するものであるため、Interference が発生しないようなネットワークの負荷の低い状況で用いると、逆にパフォーマンスが低下する可能性がある。よって、Interference が発生する場合にのみこれらの仕組みを用いることが効果的である。そこで本方式では、Interference の発生の度合いを測るパラメータとして、MAC 層におけるフレームの平均再送回数を用いる。

4.1 平均再送回数の計測

Interference の発生が増加すると、フレームの損失数が増加し、IEEE 802.11 の再送機構によりフレームが再送される回数が増加する。そこで、Interference の発生の度合いを測るパラメータとして、MAC 層におけるフレームの平均再送回数を用いる。平均再送回数 avg_retry_{new} は、式 (1) で与える。

$$avg_retry_{new} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} avg_retry + \frac{\beta}{\alpha + \beta} retry \quad (1)$$

ここで、 avg_retry は、再送回数の算出処理を行うまでに算出された平均再送回数であり、 $retry$ は、1 フレームを送出してから受信応答の ACK フレームを受け取るまでの再送カウンタの値である。なお、 α 、 β は、移動平均の重みである。この平均再送回数 avg_retry_{new} は、1 フレームの送信が成功するか、または、 $retry$ が IEEE 802.11 にて規定されている最大再送回数 ($RetryLimit$) を超えた際に更新する。

4.2 Frame Aggregation アルゴリズム

Frame Aggregation アルゴリズムでは、ネクストホップが同一のフレームを送信キューから探索する。ネクストホップが同一のフレームが見つかった場合は、MTU の最大サイズを越えない範囲内で最大 fa_pkt_count 個のフレームを結合する。なお、 fa_pkt_count は、設計者が調整可能なパラメータである。一方、結合したフレームを受信した無線端末は、フレームを分解し、自端末宛のフレームの場合には上位層へ送り、他端末宛のフレームは、送信キューへ送る。

なお、1 つのフレームを送信する際に、平均再送回数 avg_retry_{new} が、閾値 $pacings_threshold$ を越えた場合のみ、本 Frame Aggregation アルゴリズムを用いてフレーム結合を行う。具体的な $pacings_threshold$ の値は、式 (2) で与える。

$$pacings_threshold = \frac{1}{RetryLimit} retry_count \quad (2)$$

ここで、 $retry_count$ は、Frame Aggregation アルゴリズムを使用するかを決定するパラメータあり、 $[0, RetryLimit]$ の範囲の値をとる。例えば、平均再送回数が $RetryLimit$ に到達し、フレームが損失した時点で Interference が発生した見なす場合には、 $retry_count = RetryLimit$ と与えられる。

また、平均再送回数 avg_retry_{new} が、閾値 $pacings_threshold$ を越えていない場合には、IEEE 802.11 に準拠したフレームの送出を行う。

4.3 Extra Backoff アルゴリズム

上述の Frame Aggregation アルゴリズムによって、フレーム結合を行うことで経路中のフレーム数を減らし、Interference の発生を抑制することができる。しかしながら、過度なフレーム結合が行われることにより、フレーム長が増大し、Interference によるフレームの損失確率が高くなり、パフォーマンスが低下することが懸念される。

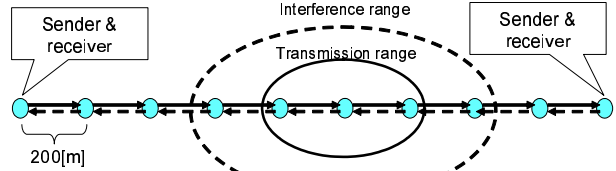


図 5: シミュレーションで用いた Chain トポロジ

そこで、本方式では、マルチホップ通信時の予測可能型 Interference を考慮し、式 (3) に示すように、IEEE 802.11 で規定されたバックオフタイムに加えて、結合したフレーム長に相当を基にしたバックオフタイムを付加する。これにより、経路中のフレーム数や送信タイミングを調整し、予測可能型 Interference の発生を抑制することができる。

$$backofftime = rand_backoff + random(0, extra_backoff * tx_time(pb_pkt)) \quad (3)$$

ここで、 $rand_backoff$ は IEEE 802.11 で規定されている Random Backoff アルゴリズムによって算出されるバックオフタイムである。また、 $tx_time(pb_pkt)$ は、Frame Aggregation アルゴリズムにより、結合されたフレームを送信するために必要となる送信時間であり、 $extra_backoff_ratio$ はその送信時間に対するバックオフタイムの倍率である。また、 $random(a, b)$ は、 (a, b) の一様乱数を発生させる関数である。即ち、IEEE 802.11 のバックオフタイムの算出法に従い、 $(0, extra_backoff * tx_time(pb_pkt))$ の範囲からランダムな値を選択し、 $rand_backoff$ に付加する。

5 Performance Evaluation

提案方式の有効性を確認するため、ネットワークシミュレータ $ns-2$ [6] を用いた計算機シミュレーションによる性能評価を行う。まず、提案方式を $ns-2$ 上に実装し、CBR トラフィックを送信した際の、IEEE 802.11 および提案方式を用いた際のスループットを計測し、提案方式の性能を評価する。

5.1 シミュレーション環境

無線リンクの帯域を $1[Mbps]$ 、 $Transmission_Range$ を $250[m]$ 、 $Interference_Range$ を $550[m]$ とし、omni-directional アンテナを用いた。また、システムパラメータとして、slot time を $20[\mu sec]$ 、SIFS を $10[\mu sec]$ 、DIFS を $20[\mu sec]$ 、伝搬遅延時間を $2 \mu sec$ 、RTS-Threshold を 0 bytes と与えた。また、ルーティングプロトコルは、AODV (Ad hoc OndemandDistance Vector) [7] を用いた。

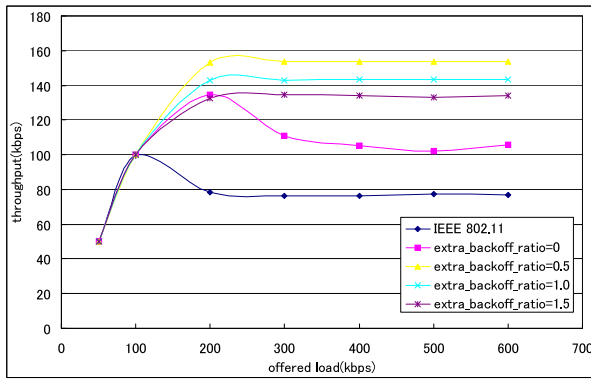


図 6: Throughput comparison of various *extra_backoff_ratio*, with *pacing_threshold* value set at 0.0 in one-way chain topology.

シミュレーションで用いたトポロジは、図 5 に示すように、10 個の端末を 200[m] 間隔で一列に配置された Chain トポロジとし、1 ホップ先までの端末は、Transmission_Range 内に配置され、2 ホップ先の無線端末は、Interference_Range 内に配置されている。

CBR(Constant Bit Rate) のトラフィックジェネレーターを設置することで、トラフィックを生成する。生成される CBR トラフィックの packet size は 512[byte] とし、トラフィックジェネレーターの送信レートの総和を Offered Load と与える。この CBR トラフィックジェネレーターを用いて、2 種類のシナリオを用いて性能評価を行った。シナリオ 1 では、Chain トポロジの片端に、CBR トラフィックジェネレーターを配置し片方向トラフィックを発生させる。シナリオ 2 では、Chain トポロジの両端に CBR トラフィックジェネレーターを配置し、双方向トラフィックを発生させる。

一回のシミュレーション時間は 300 秒とし、30 秒から 270 秒までの 240 秒間の性能を計測するものとし、100 回試行の平均値を評価に用いた。

5.2 性能評価

提案するフレーム結合型ペーシング方式の性能評価を行うため、提案方式のパラメータ *extra_backoff_ratio* および *pacing_threshold* を設定した際の Offered Load に対する End-To-End のスループットを計測した。ここで、 t 秒間の間に CBR データを受信したビット数の総和を U_i で与えると、End-To-End のスループット Th_{end} は、

$$Th_{end} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{t} \quad (4)$$

となる。

5.2.1 片方向トラフィックにおける性能評価

シナリオ 1 における *extra_backoff_ratio* のスループットへの影響を分析するため、 *pacing_threshold* を 0.0

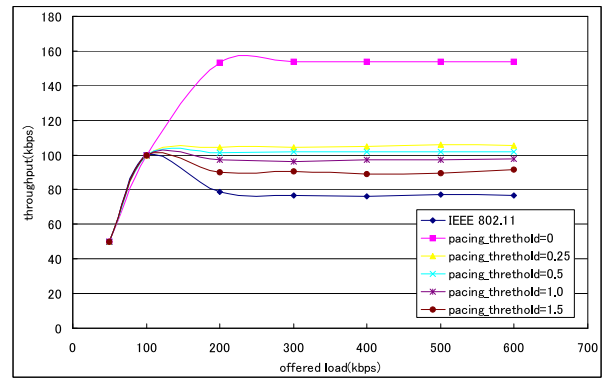


図 7: Throughput comparison of various *pacing_threshold*, with *extra_backoff_ratio* value set at 0.5 in one-way chain topology.

と設定し、*extra_backoff_ratio* の値を変化させた際の Offered Load に対する End-To-End のスループットを図 6 に示す。Offered Load が低い時には、入力トラフィックが低いため、Interference が殆ど発生しないため、全ての方式のスループットがほぼ同じになっている。Offered Load が高くなるにつれて、Interference が頻繁に発生するようになり、IEEE 802.11 のスループットが低下している。*extra_backoff_ratio* の値が 0.0, 1.5, 1.0, 0.5 のペーシング方式を比較すると、スループットが順番に向上している。Extra Backoff の機能が無効になる *extra_backoff_ratio* の値が 0.0 の時には、ペーシング方式は、スループットがほとんど改善していない。これは、Extra Backoff が適用されないことによって、過度のトラフィックが流入するためであると考えられる。また、*extra_backoff_ratio* の値が 0.5 の時には、最も高い性能改善効果が得られ、IEEE 802.11 と比較し、スループットが 98% 改善している。これらの結果より、フレーム結合方式を効果的に機能させるためには、調整された Extra Backoff が必要であることが確認された。

図 6 に示すようにペーシング方式は、*extra_backoff_ratio* の値が 0.5 の時、最も効果的に機能していた。そこで、*extra_backoff_ratio* の値を 0.5 に設定した時に *pacing_threshold* の値を変化させた際のスループットへの影響を分析する。図 7 に *pacing_threshold* の値を変化させた時の End-To-End のスループットを示す。ペーシング方式は、IEEE 802.11 よりも高いスループットを実現していることが分かる。特に、フレーム結合を常に適用する *pacing_threshold* の値が 0.0 の時、スループットが大幅に改善しており、積極的なフレーム結合を行うことによって、スループットが効果的に改善することを示している。

これらの結果より、Interference の影響が比較的高い場合には、フレームの結合を可能な限り実施することが望ましいことが確認された。また、Extra Backoff の機能が無効になるように *extra_backoff_ratio* の値を 0.0 にすると、ペーシング方式は、大幅にスループットが低下することから、安定したスループットを実現す

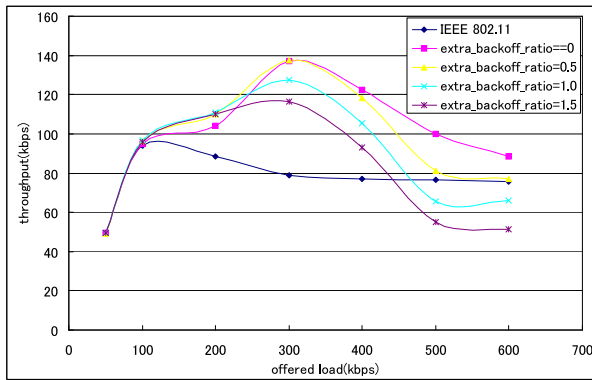


図 8: Throughput comparison of various *extra_backoff_ratio*, with *pacing_threshold* value set at 0.0 in two-way chain topology.

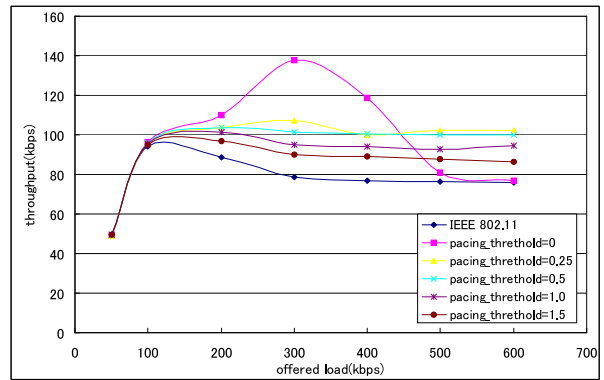


図 10: Throughput comparison of various *pacing_threshold*, with *extra_backoff_ratio* value set at 0.5 in two-way chain topology.

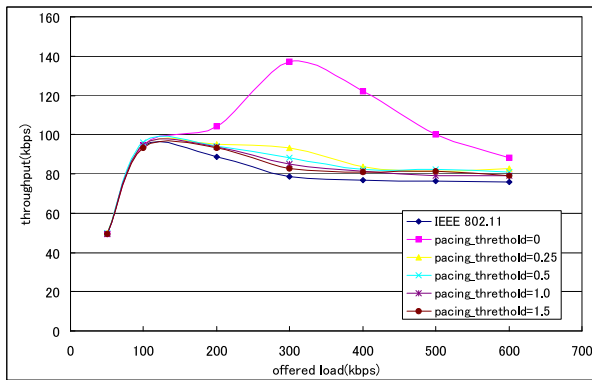


図 9: Throughput comparison of various *pacing_threshold*, with *extra_backoff_ratio* value set at 0.0 in two-way chain topology.

るためには、Extra Backoff を適切に用いることが必須であることも確認された。

5.2.2 双方向トラフィックにおける性能評価

シナリオ 1 と比較し頻繁に Interference が発生するシナリオ 2 における *extra_backoff_ratio* のスループットへの影響の分析を行った。まず、 *pacing_threshold* を 0.0 と設定し、*extra_backoff_ratio* の値を変化させた際の Offered Load に対する End-To-End のスループットを計測した。図 8 に示すように、Offered Load が低い時には、図 6 と同様、Interference がほとんど発生しないため、全ての方式でほぼ同じスループットとなっている。また、Offered Load が 200kbps の時にも、図 6 と同様に、*extra_backoff_ratio* の値が 0.0 のペーシング方式はスループットの改善率が低くなっているが、*extra_backoff_ratio* の値が 0.0 以外のペーシング方式は、高いスループットを実現している。しかしながら、Offered Load が高い場合には *extra_backoff_ratio* の値がゼロのペーシング方式のスループットが向上しており、図 6 とは異なった傾向を示している。具体的には、Offered Load が 300kbps の時には、*extra_backoff_ratio* の値が 0.0 のペーシング方式が最も高いスループットを示しており、また、Offered Load が高くなると、*ex-*

tra_backoff_ratio の値が大きくなるにつれてスループットが低下するという傾向を示している。これらの傾向は、Interference が頻繁に発生するようになるにつれて、フレームの結合が頻繁に行なわれるとともに Extra Backoff が適用されることから、Extra Backoff が過度に適用された結果、スループットが低下したと考えられる。また、同様の理由によって、*extra_backoff_ratio* の値が 1.5 のペーシング方式では、*extra_backoff_ratio* の値が大きいことにより長い Extra Backoff が適用されるため、IEEE 802.11 よりも低いスループットになっていると考えられる。

これらの結果より、Interference の影響が比較的に強い場合には、ペーシングの効果を引き出すため、*extra_backoff_ratio* の値を小さい値に設定することが必要である。一方、Interference の影響が非常に強い場合には、過度の Extra Backoff を防ぐため、*extra_backoff_ratio* の値をゼロに設定し、Extra Backoff の効果を無効にすることが必要であることが確認された。

また、図 8 において、Interference の影響の強さによって、高いスループットを実現する *extra_backoff_ratio* が異なっていることが分かる。具体的には、Offered Load が 300kbps の時には、*extra_backoff_ratio* の値が 0.0 と 0.5 のペーシング方式が、高いスループットを実現しているが、Offered Load が高い 600kbps になると、*extra_backoff_ratio* の値が 0.5 のペーシング方式の改善率が急激に低下している。 *pacing_threshold* の効果を分析するため、*extra_backoff_ratio* の値が 0.0 と 0.5 に固定し、 *pacing_threshold* を変動させたペーシング方式の Offered Load に対するスループットを計測した。

extra_backoff_ratio の値が 0.0 のペーシング方式の Offered Load に対するスループットの性能比較を図 9 に示している。 *pacing_threshold* の値が 0.0 に設定されたペーシング方式では、高いスループットを実現しているが、他のペーシング方式では、安定して機能しているものの IEEE 802.11 より僅かなスループットの改善に留まっている。

また、図 10 は、*extra_backoff_ratio* の値が 0.5 のペーシング方式の Offered Load に対するスループットの

性能比較を示している。 *pacings_threshold* の値が 0.0 のペーシング方式に注目すると、Offered Load が 400kbps に到達するまで、最も高いスループットを示しているが、Offered Load が 500kbps を越えると急激にスループットが低下している。さらに Offered Load が高くなり 600kbps になると、IEEE 802.11 と同程度までスループットが低下している。これは、フレーム結合が頻繁に行われるにつれて、頻繁に Extra Backoff が行われるため、 *extra_backoff_ratio* の値が大きい場合に、過度に送信が抑制されるためスループットが低下したと考えられる。一方、 *pacings_threshold* の値が 0.25 など、小さい値に抑えた場合には、ペーシング方式は、大幅にパフォーマンスが低下することなく、安定したスループットを維持できている。もし、Interference の状況に関係なく、多少不安定であるが、高いパフォーマンスを望む場合には、 *pacings_threshold* の値を 0.0 とし、 *extra_backoff_ratio* の値を小さい値に設定すれば良い。

以上、まとめると、 *pacings_threshold* は、効果的なスループットの改善を左右する支配的なパラメータとなっていることが確認された。また、フレーム結合の効果を保証するため、適切な Backoff の調整は必須であることも確認された。また、ペーシング方式の機能を最大限に生かし、高いパフォーマンスを維持するためには、下記のようなチューニングすることが重要である。

1. 可能な限りフレーム結合を継続して行う。
2. Interference の影響が比較的強い場合には、パフォーマンスの低下を軽減するため、短い Extra Backoff を行う。
3. Interference の影響が非常に強い場合には、Extra Backoff による過度に送信遅延が発生してしまうことから、Extra Backoff を用いずに、IEEE 802.11 と同じ動作させる。

6 まとめ

本稿では、無線アドホックネットワークにおいてマルチホップ通信時に発生する Interference 問題を軽減することを目的し、上位プロトコルに依存しないフレーム結合型ペーシング方式を提案した。本提案方式は、フレーム結合方式と Extra Backoff 方式から構成されている。ネットワークシミュレータ ns2 を用いた性能評価を通して、パラメータを適切に調整することで、スループットが向上できることを確認し、本提案方式の有効性を示した。

今後は、提案方式のパラメータがパフォーマンスに与える影響の詳細な検討、および予測不可能型 Interference への対応を検討し、さらなるパフォーマンスの向上を行う予定である。

参考文献

- [1] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, MACAW: A Media Protocol for Wireless LAN's, *Proc. the ACM SIGCOMM'94*, London, UK, September 1994.
- [2] P. Karn, MACA – a New Channel Access Method for Packet Radio, *Proc. the 9th ARRL Comp. Networking Conf.*, Ontario, Canada, September 1990.
- [3] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, *IEEE Std. 802.11*, August 1999
- [4] Y. Wang and J. J. Garcia-Luna-Aceves, Collision Avoidance in Multihop Ad Hoc Networks, *Proc. of the IEEE/ACM MASCOT'02*, Texas, U.S.A., October 2002.
- [5] S. Xu and T. Saadawi, Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?, *IEEE Commun. Mag.*,
- [6] *The Network Simulator Version 2 (ns-2)*, [Online]. Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [7] C. E. Perkins, E. M. Royer, and S. Das, Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing, *RFC 3561*, July 2003. [Online]. Available: <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc3561.txt>
- [8] Sherif M. Elrakabawy, Alexander Klemm, and Christoph Lindemann, "TCP with Adaptive Pacing for Multihop Wireless Networks," in *MobiHoc '05*, pp. 25–27, May 2005.
- [9] Zhenghua Fu, Haiyun Luo, Petros Zerfos, Songwu Lu, Lixia Zhang, Mario Gerla, "The Impact of Multihop Wireless Channel on TCP Performance," in *IEEE Transactions on Mobile Computing 2005*, vol.4, no.2, pp.209–221, MARCH-APRIL 2005.
- [10] IEEE802.11n Draft1.0, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput", documentation, IEEE802.11, 2006.
- [11] Wei Liu, Xiang Chen, Yuguang Fang, and John M. Shea, "Courtesy Piggybacking: Supporting Differentiated Services in Multihop Mobile Ad Hoc Networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, VOL. 3, NO. 4, pp. 380–393, OCTOBER-DECEMBER 2005.