

LM-004

## モバイルアドホックネットワークにおける Interference を考慮した フレーム結合型ペーシング方式の提案

### A Proposal of Pacing Scheme with Frame Aggregation over MANET

中村 直毅<sup>†</sup>  
Naoki Nakamura

渡部 修平<sup>‡</sup>  
Shuhei Watanabe

北形 元<sup>‡</sup>  
Gen Kitagata

白鳥 則郎<sup>‡</sup>  
Norio Shiratori

#### 1. はじめに

現在無線 LAN 環境において広く利用されている IEEE 802.11 [1] は、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 交換による仮想キャリアセンス機構が導入されている。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、パフォーマンスが大幅に低下することが報告されている [2] [3]。そのため、Interference の影響を受けにくい拡張型 IEEE 802.11 の実現が強く望まれている。

本研究では、MAC 層におけるフレームの送信数を削減することによって Interference の影響を軽減する、フレーム結合型ペーシング方式を提案する。提案方式は、フレームの結合とバックオフタイムの延長から成り、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。これにより、Interference に起因するコリジョンを軽減し、IEEE 802.11 のパフォーマンスが大幅に向上する。本論文では、ns2 を用いた計算機シミュレーションを通じ、提案方式の有効性を評価した。その結果、Chain トポロジにおいて、CBR トラフィックのコリジョンが 30%程度減少 (図 6) し、スループットが 33%程度向上 (図 4) することを検証した。

#### 2. 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 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 内の端末は、RTS/CTS 交換によるチャンネル予約ができないため、RTS/CTS 交換機能だけでは Interference を回避できない。この問題を、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

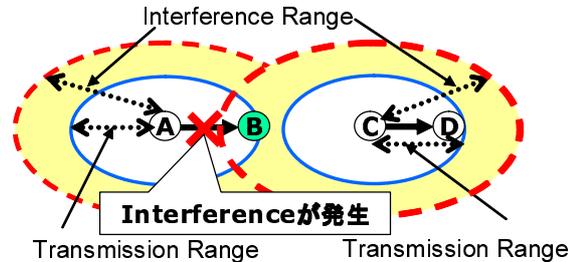


図 1: Interference の発生の例

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。

この Interference を解決する既存方式として、TCP の輻輳制御アルゴリズムや ACK 応答を利用し、フレームの送信レートを制限することで、マルチホップされるフレームの干渉を避け、スループットの低下を軽減する方式が提案されている [2] [3]。しかしながら、TCP に特化した方式であるため、TCP 以外のプロトコルへの適用は困難である。

また、Interference を軽減するには、フレームの送信数を削減することが有効である。例えば、IEEE 802.11n[7] において検討されているフレーム結合では、チャンネルを有効に活用するために、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、一般にフレーム長が長くなるほど、Interference の影響を受ける可能性が高くなるため、単にフレームを結合するだけでは、十分な効果が得られない場合がある。

#### 3. フレーム結合型ペーシング方式の提案

##### 3.1 Interference 問題の分析

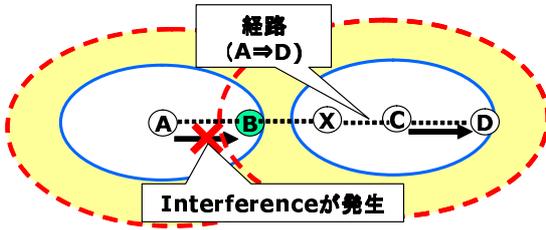
Interference 問題は、発生する状況によって予測可能型・予測不可能型の 2 種類に分類できる。

予測可能型 Interference とは、図 2(a) に示すように、端末 (A) が送出したフレームと、マルチホップ通信の経路上の中継端末 (B) が送出したフレームが衝突することにより生じる Interference である。また、予測不可能型 Interference とは、図 2(b) に示すように、端末 (A) が送出したフレームと、マルチホップ通信の経路外の端末 (B) が送出したフレームが衝突することにより生じる Interference である。

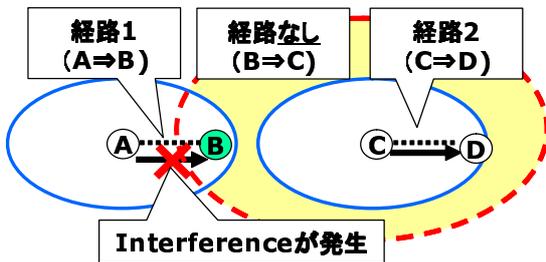
ここで、予測可能型 Interference においては、Interference の発生を送信端末 (A) がある程度予測することが可能なため、フレームの送信量や送信タイミングを調

<sup>†</sup> 東北大学 医学系研究科, School of Medicine, Tohoku University  
<sup>‡</sup> 東北大学 電気通信研究所/情報科学研究科, Research Institute of Electrical Communication/Graduate School of Information Science, Tohoku University

整することで、経路上の中継端末 (B) が送信するフレームとの Interference の発生を軽減することは可能であると考えられる。



(a) 予測可能型 Interference



(b) 予測不可能型 Interference

図 2: Interference の分類

### 3.2 フレーム結合型ペーシング方式の提案

本研究では、ネットワークに送出されるフレーム数を MAC 層において効果的に調節することで、予想可能型 Interference の発生を抑制し、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ペーシング方式を提案する。

本ペーシング方式は、Frame Aggregation アルゴリズムと、Ex-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。また、Ex-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 の発生を軽減する。なお、これらの仕組みは、ペーシングを行い Interference の発生を抑制ものであり、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 が発生しう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。

### 3.3 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。具体的には、1 つのフ

レームを送信する際の平均再送回数  $avg\_retry_{new}$  を式 (1) により算出する。

$$avg\_retry_{new} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} avg\_retry + \frac{\beta}{\alpha + \beta} retry \quad (1)$$

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 ACK を受け取るまでの再送カウンタの値である。なお、 $\alpha$ 、 $\beta$  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 にて定められている規定最大再送回数 ( $RetryLimit$ ) を超えた際に更新する。

### 3.4 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端末は、フレームを分解し、自端末宛のフレームは上位層へ送り、他の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、どの程度の Interference が発生した時に本 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 が発生したと見なす場合は、 $retry\_count = RetryLimit$  となる。

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。

### 3.5 Ex-Backoff アルゴリズム

上述の Frame Aggregation アルゴリズムにより、フレーム結合を行うことで経路中のフレーム数を減らすことができ、Interference の発生を抑制することができる。しかし、過度なフレーム結合が行われた場合、フレーム長の増大に伴い、Interference によるフレームの損失確率が高くなるため、パフォーマンスが低下する可能性がある。

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する  $Ex\_BackoffTime$  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

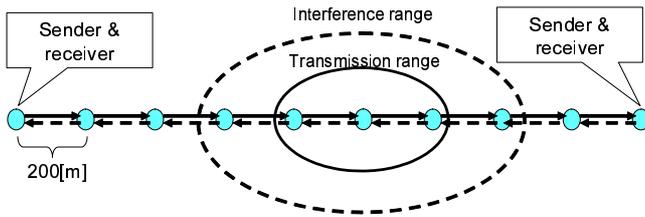


図 3: シミュレーションで用いた Chain トポロジ

整し、予測可能型 Interference の発生を減少させることができる。

$$\begin{aligned} \text{backofftime} = & \text{rand\_backoff} + \text{random}(0, \\ & \text{ex\_backoff\_ratio} * \text{tx\_time}(\text{pbk\_pkt})) \end{aligned} \quad (3)$$

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(pbk\_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、*ex\_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、 $(0, \text{ex\_backoff} * \text{tx\_time}(\text{pbk\_pkt}))$  の範囲からランダムな値を選択し、*rand\_backoff* に付加する。

## 4. 評価

提案方式の有効性を確認するために、ネットワークシミュレーター *ns-2*[4] を用いて、シミュレーションを行った。まず、提案方式を *ns-2* 上に実装し、CBR および TCP の 2 種類のトラフィックを送信し、IEEE 802.11 と提案方式のスループットおよびフレームエラー率を計測し、提案方式の性能を評価する。

### 4.1 シミュレーション環境

無線リンクの帯域を  $1[\text{Mbps}]$ 、Transmission\_Range を  $250[\text{m}]$ 、Interference\_Range を  $550[\text{m}]$  slot time を  $10[\mu\text{sec}]$ 、SIFS を  $10[\mu\text{sec}]$ 、DIFS を  $20[\mu\text{sec}]$  とした。RTS\_threshold は 0 とし、全てのユニキャストフレームの送信時に RTS/CTS を使用し、チャンネルエラーは無いものとした。また、ルーティングプロトコルとして、AODV(Ad hoc Ondemand Distance Vector) [5] を用いた。

シミュレーションで用いたトポロジは、図 3 に示すような、10 個のノードを  $200[\text{m}]$  間隔で一列に配置した Chain トポロジとし、1 ホップ先までのノードは Transmission\_Range 内に配置し、2 ホップ先のノードは、Interference\_Range 内に配置されている。

また、両端のノードにそれぞれトラフィックジェネレータを配置し、トラフィックを生成する。本シミュレーションでは、トラフィックジェネレータとして、CBR(Constant Bit Rate) と TCP の 2 種類を用いた。

CBR では、パケットサイズを  $512 \sim 1024[\text{byte}]$  の範囲でランダムに選択し、指定した送信レートに基づいてトラフィックを生成させる。また、TCP のアルゴリズムは、NewReno [6] を用いた。

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 秒間を計測対象とした。また、結果が十分収束する試行回数として 200 回試行し、その平均値を評価に用いた。

### 4.2 評価

スループットに関して、トラフィックジェネレータが配置されたノードにおいて MAC 層から物理層に対して送出された単位時間当たりのフレームのビット数を Offered Load とし、Offered Load に対する End-To-End のスループットを計測した。また、フレームエラー率については、配置された全ノードにおいて、MAC 層から物理層に対して送出された単位時間当たりのフレームのビット数を Network Load とし、Network Load に対するコリジョンとして扱われたフレームの単位時間当たりのビット数を計測した。

提案方式のパラメータに関して、事前のシミュレーションを通し、チューニングを行った。その結果、フレーム結合の上限数は *fa\_pkt\_count* を 3 とし、移動平均の重みは  $\alpha$  を 3、 $\beta$  を 4 とした。また、CBR トラフィックを用いた場合には、 *pacing\_threshold* を 0.5 とし、 *ex\_backoff* を 1.5 とした。一方、TCP トラフィックを用いた場合には、 *pacing\_threshold* を 0 とし、 *ex\_backoff* を 3.0 とした。

図 4 と図 5 に、CBR および TCP を用いた場合の Offered Load に対するスループットを示す。この結果より、Offered Load が高い場合、IEEE 802.11 と比較して、提案方式のスループットが向上していることが分かる。これは、IEEE 802.11 では Offered Load が高くなると経路中のフレーム数が増加し、Interference の影響が強くなることから、フレームの損失率が増加し、スループットが抑制されるためである。一方、提案方式では、Frame Aggregation アルゴリズムと Ex-backoff アルゴリズムにより、フレーム数が効果的に調節され、経路中のフレームの送信回数が減少し、なお且つ送信タイミングが調整されることによって、Interference の発生が抑制され、IEEE 802.11 と比べスループットが向上している。

次に、図 6 と図 7 に CBR および TCP を用いた場合の Network Load に対するフレームエラー率を示す。この結果より、ネットワーク負荷が高くなるほど、IEEE 802.11 と比べ提案方式のフレームエラー率が減少している事が分かる。即ち、フレーム結合によりフレーム長が長くなると、一般にコリジョン確率は上昇するが、提案方式を用いた場合、Ex-Backoff アルゴリズムの効果により、コリジョンの発生を効果的に抑制していることを示している。

以上より、提案方式は IEEE 802.11 と比べ、CBR/TCP トラフィックのコリジョンを減少し、スループットを向上させることを確認した。

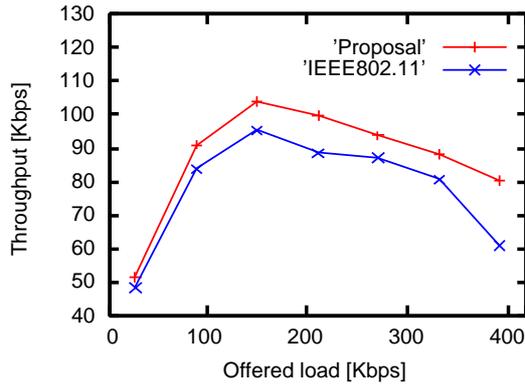


図 4: スループットの比較 (CBR)

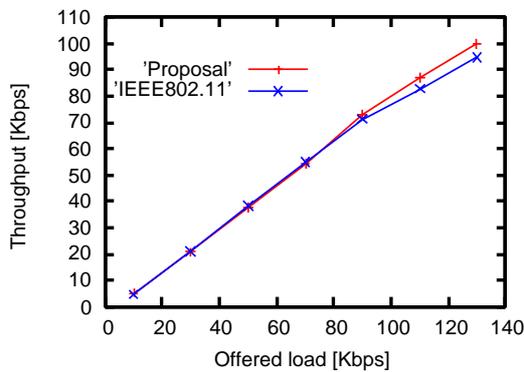


図 5: スループットの比較 (TCP)

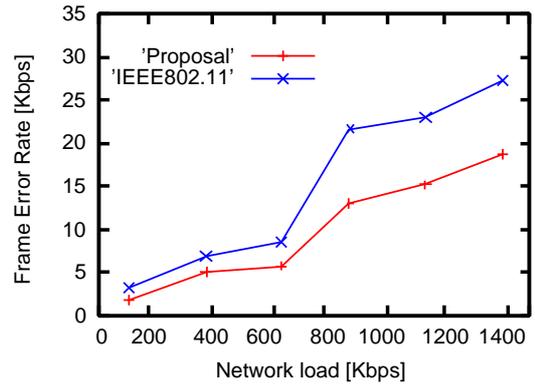


図 6: MAC 層におけるフレームエラー率の比較 (CBR)

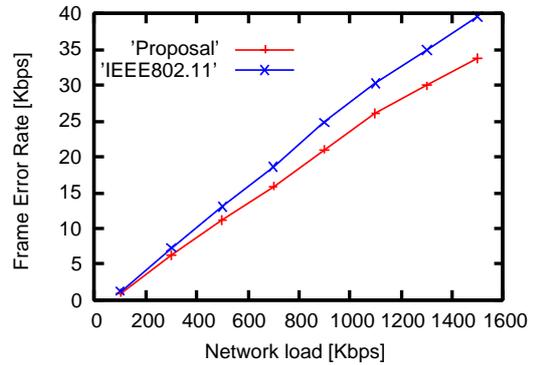


図 7: MAC 層におけるフレームエラー率の比較 (TCP)

## 5. 結論

本論文では、モバイルアドホックネットワーク上における Interference の発生を大幅に軽減し、パフォーマンスを向上させる方式として、フレーム結合型ペーシング方式を提案した。提案方式は、Frame Aggregation アルゴリズムと Ex-Backoff アルゴリズムから構成される。さらに、計算機シミュレーションを通じ、既存の IEEE 802.11 に比べ、コリジョンを減少し、スループットを大幅に向上できることを示した。

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。

## 6. 謝辞

本研究の一部は科研費 (19200005) と SCOPE プロジェクト (071502003) の助成を受けたものである。

## 参考文献

[1] IEEE standard for wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) speci-

fication, IEEE Std. 802.11, August 1999.

- [2] Sherif M. Elrakabawy, Alexander Klemm, and Christoph Lindemann, "TCP with Adaptive Pacing for Multihop Wireless Networks," in *MobiHoc '05*, pp. 25–27, May 2005.
- [3] 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.
- [4] The network simulator version 2 (ns-2). Available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [5] 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>
- [6] "The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm," RFC 2582 April 1999.
- [7] IEEE802.11n Draft1.0, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput", documentation, IEEE802.11, 2006.