

無線メッシュネットワークにおける スループットの改善のためのパケット伝送手法

中原 史博^{†1,a)} 眞鍋 雄貴^{†1,b)} 北須賀 輝明^{†1,c)} 有次 正義^{†1,d)}

概要: 本研究は無線メッシュネットワーク上の TCP フローを対象に、ホップ数が多い場合や複数フローが存在する環境でスループットを向上させることを目的とする。ホップ数の増加や複数フローの存在によりパケット衝突が発生すると、再送による遅延が生まれるため、スループットが低下する。そこで、提案手法として、パケットを受信したノードに次の伝送権を持たせる高速伝送手法と TCP フローの送信元ノードでパケット送信間隔を適切に調整する手法の 2 つを組み合わせた手法を提案する。シミュレーションにより、提案手法が単一フローのスループットを 5.8 % ~ 17.5 % 向上させ、制約はあるものの、3 つまでの TCP フローのスループットを向上させることを示した。

キーワード: 無線メッシュネットワーク, データリンク層, TCP プロトコル, 無線 LAN

A Packet Transmission Method to Improve Throughput on Wireless Mesh Networks

FUMIHIRO NAKAHARA^{†1,a)} YUKI MANABE^{†1,b)} TERUAKI KITASUKA^{†1,c)} MASAYOSHI ARITSUGI^{†1,d)}

Abstract: In wireless mesh networks, two-way communication of the TCP protocol decreases throughput with increase of the number of hops and existence of other flows. The purpose of this study is to improve throughput when there are many hops and other flows on wireless mesh networks. We propose a method consisting of fast forwarding at all nodes and pacing the transmission interval at source. Simulation results show that the proposed method increases throughput between 5.8 % to 17.5 % for a single flow.

Keywords: Wireless mesh network, Data link layer, TCP protocol, Wireless LAN

1. はじめに

近年、無線 LAN を利用することで、様々な場所でネットワークに接続できるようになった。広範囲で接続可能にしようとする、アクセスポイントを多数設置しなければならない。しかし、すべてのアクセスポイントを有線でインターネットに接続しようするとコストや設

置箇所の問題が発生する。それに対して、図 1 に示す無線メッシュネットワーク [1] は、アクセスポイント間を無線接続し、一部のアクセスポイントのみを有線でインターネットに接続する。

本稿では、トランスポート層においてパケットを送ることをパケット送信と呼び、データリンク層においてパケットを送ることをパケット伝送と呼ぶ。また、アクセスポイントや移動端末をノードと呼ぶ。無線メッシュネットワークにおいて、アクセスポイントに接続した移動端末がインターネットに向ってパケットを送信する場合、アクセスポイントは移動端末からのパケットを受信すると、近くの有線接続されたアクセスポイントにそのパケットを伝送する。有線接続されたアクセスポイントが直接伝送できる範

^{†1} 熊本大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

a) nakahara@dbms.cs.kumamoto-u.ac.jp

b) y-manabe@cs.kumamoto-u.ac.jp

c) kitasuka@cs.kumamoto-u.ac.jp

d) aritsugi@cs.kumamoto-u.ac.jp

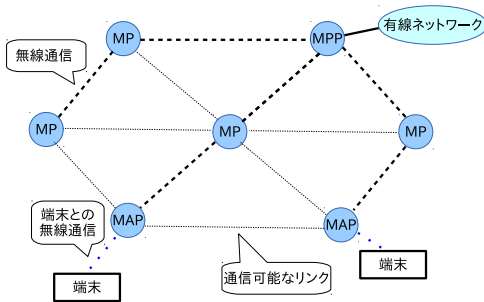


図1 無線メッシュネットワーク

圏にないときは、他のアクセスポイントを経由する経路に沿って、マルチホップでそのパケットを伝送する。これにより、有線ネットワークに接続するアクセスポイントが1台で良く、低コストで広範囲にネットワークを構築できる。また、あるアクセスポイント間のリンクの品質が低下しても、他のアクセスポイントを中継ノードとして用いることでネットワークを容易に再構築できる利点も持つ。

しかし、無線通信のパケット伝送は、有線接続と異なり伝送ノードの伝送範囲内にあるノードに届くため、複数のノードが同時に伝送すると、互いの伝送が干渉しパケット衝突が起きる。同じフロー内のパケットが干渉を及ぼし合うことをフロー内干渉と呼び、違うフロー間のパケットが干渉を及ぼし合うことをフロー間干渉と呼ぶ。本稿では、主にフロー内干渉を減らすことを考える。

パケット衝突が起きた場合、伝送側のノードはパケットを再送する。パケットを伝送するには、キャリアセンスとバックオフにより伝送権を得る必要があり、再送の度にキャリアセンスとバックオフしなければならない。ホップ数が多い場合や複数フローが存在する環境ではパケット衝突が起こりやすく、キャリアセンスとバックオフによる遅延が発生するため、スループットが低下する傾向にある。

また、パケット衝突は片方向通信のUDPプロトコルより双方向通信のTCPプロトコルで起こりやすい。UDPは、送信元ノードから宛先ノードに向けて片方向にデータパケットを伝送する。一方、TCPでは、宛先は送信元からのパケットを受信できたことを知らせるTCP肯定応答を送信元に送信する。データリンク層でやり取りされるACKフレームとは違い、TCP肯定応答は、信頼性のある通信路を実現するために、TCP接続の宛先から送信元にセグメントを受信したことを知らせる。1つのフローにデータパケットとTCP肯定応答が逆方向に流れるため、パケット衝突が高頻度で発生する。

スループットの向上には、パケットの中継にかかる時間を短縮することや、パケットの衝突と再送を減らすことが課題として挙げられる。本研究は、無線メッシュネットワーク上のTCPフローを対象に、ホップ数が多い場合や複数フローが存在する環境においてもスループットを向上させる手法を提案する。本手法は、パケットを受信した

ノードに次の伝送権を持たせる高速伝送手法と、パケット送信間隔を適切に調整する送信間隔調整手法から構成され、これらを用いてデータリンク層におけるパケット伝送時刻を調整することによりスループットを向上させる。

高速伝送手法は、パケットを受信したノードが、伝送ノードにACKフレームを返した後、ランダムバックオフすることなく、すみやかにパケットの伝送を開始させる手法である。ACKフレームの伝送から次のパケットの伝送開始までの間隔はSIFS(Short Interframe Space)時間とする。

送信間隔調整手法は、TCPの送信元ノードにて連続するパケット伝送に間隔を空ける手法で、主に同一方向のフロー内干渉を減らすことで、再送を減らす。送信間隔は、TCPが計測するRTT(Round Trip Time)とウィンドウサイズを用いて設定し、宛先ノードにTCP肯定応答を受信する度に更新する。

以下、関連研究について2章で紹介し、3章でスループットを向上させる手法を提案する。4章で提案手法の性能をシミュレーションにより評価し、5章にまとめを示す。

2. 関連研究

本章は、無線ネットワークにおけるパケット衝突低減に関する研究やパケットの優先的な伝送に関する研究について述べる。

2.1 パケット衝突削減に関する研究

パケット衝突に対して、古川[2]は、UDPを対象に、送信元ノードにバッファに蓄えたパケットを、間隔を空けて周期的に送信することで周波数リユース間隔を制御し、フロー内干渉量を制御する周期的間欠送信法(Intermittent Periodic Transmit)を提案している。丸田ら[3]は周期的間欠送信法をTCPに応用した双方向多重型周期的間欠送信とTCP-ACK Aggregationを提案している。双方向多重型周期的間欠送信はTCP肯定応答に空データを付加することで双方向のパケットを同じ周期で伝送できるようにし、TCP肯定応答Aggregationは宛先ノードからのTCP肯定応答を複数個蓄え集約し伝送することで、TCP肯定応答の伝送量を減らす。

また、Rangwalaら[4]は、無線メッシュネットワーク上のTCPフローを対象に近傍の通信状況から伝送レートを制御する無線制御プロトコル(Wireless Control Protocol, WCP)と、トポロジーの形状から近傍フローの伝送量を推定し各フローに伝送レートを公平に配分する容量推定付き無線制御プロトコル(Wireless Control Protocol with Capacity Estimation, WCPCap)を提案している。WCPとWCPCapはパケット衝突を減らすだけでなく、各フローのスループットを同等にすることが特徴である。

2.2 パケットの優先的な伝送に関する研究

パケットを優先的に伝送する手法として、山口ら [5] は、UDP において伝送する権利を得たノードが 2 つ以上のパケットを蓄積している場合に ACK フレームの受信後 SIFS 時間待ってから次のパケットを送送するフレームバースト配送手法を提案している。キャリアセンスしないで伝送を開始することにより、1 つのノードがパケット伝送の権利を保持し続けていることになる。

本稿の著者ら [6] は過去の研究で各ノードのデータリンク層で ACK フレームの受信からパケット伝送までに待ち時間を入れる手法を提案した。待ち時間を入れることによりフロー内干渉を抑制し、単一フローで約 10 % のパケット伝送回数を減らすことができた。しかし、提案手法は待ち時間によりスループットが大きく低下する。また、ACK フレーム受信からパケット伝送までの待ち時間を変化させた場合をシミュレーションし、その結果から最適な値を計算している。そのため、トポロジーの形状やフローの数が増えた場合には再度シミュレーションしなければならないという課題がある。

その後、著者ら [7] は本研究の手法の元となる、送信元ノードで送信間隔を調整し、中継ノードで高速にパケットを送送する手法を提案し、単一ストリームや複数フローにおける提案手法の動作を考察した。

本稿では、著者ら [7] が提案した手法を改良した上でネットワークシミュレータ ns-2 に実装し、シミュレーションにより性能を評価する。

3. スループット向上のための提案手法

3.1 目的

本章では、無線メッシュネットワークにおけるスループットを向上させるための手法を提案する。

提案手法はパケットを受信したノードに次の伝送権を持たせる高速伝送手法と、パケット送信間隔を適切に調整する送信間隔調整手法から構成される。図 2(b) のように送信間隔調整手法で送信元ノードの連続するパケット送信に間隔を空ける間、高速伝送手法によりパケットを遠くのノードへ伝送させ、フロー内干渉を防ぐことが本手法の狙いである。図 2(a) に従来手法でパケット衝突が起きる場合を示す。以下、それぞれの手法について説明する。

3.2 高速伝送手法

図 3 に高速伝送手法の動作を示す。まず、パケットを受信したノードは、従来通りにパケット受信から SIFS 時間後に ACK フレームを送信する。高速伝送手法は、受信ノードに伝送権を与えることで、ACK フレーム伝送後から SIFS 時間後にデータリンク層に蓄えられているパケットを送信できるようにする。これに対して、従来は ACK フレーム伝送後にデータリンク層にパケットが蓄えられて

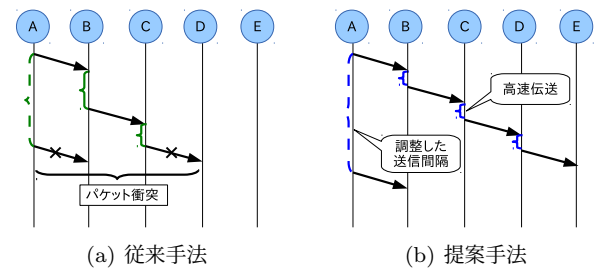


図 2 従来手法と提案手法の違い

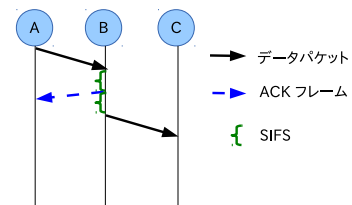


図 3 高速伝送手法の動作

いる場合、ランダムバックオフによって伝送権を得る。

高速伝送手法によるパケット伝送後は従来の動作に戻る。パケット伝送に失敗すると、近傍のノードはキャリアセンスからランダムバックオフ時間の後に伝送可能ならパケットを送信する。伝送に成功した場合、新たにパケットを受信したノード (経路上の次のノード) が高速伝送手法により伝送権を得て、パケットを送信する。

高速伝送手法の利点として、キャリアセンスとバックオフにかかる時間を省くことが挙げられる。従来手法ではパケット伝送の度に DIFS (DCF Interframe Space) 時間 + ランダムバックオフ時間かかるが、高速伝送手法では、ACK フレームの伝送後から SIFS でパケットを送信するため、パケット伝送にかかる時間を減らすことができる。SIFS 時間はキャリアセンスにかかる DIFS より短いため、高速伝送手法が適用されたノードの近傍ノードは、キャリアセンス中に、伝送を感知し伝送を控える。したがって、パケットを受信したノードが伝送権を得て、高速な伝送を可能にする。

3.3 送信間隔調整手法

高速伝送手法はキャリアセンスを省くため、伝送範囲内のノードがパケットを送信していてもパケットを送信する。したがって、他のノードが伝送中であればパケット衝突が生じる。これは、ホップ数が多い場合や複数フローが存在する場合など、多くのノードがパケットを送信する環境で頻発する。

そこで送信間隔調整手法では図 4 のように送信元ノードから連続してパケットを送信する際、通信状況を考慮した送信間隔 Δ を入れる。直前のパケット伝送から Δ - DIFS 待った後にキャリアセンスし、他のノードがパケットを送信していなければパケットを送信する。なお、送信まで

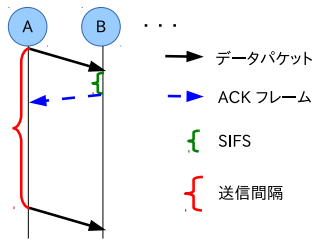


図 4 送信間隔調整手法の動作

に間を空けているため、ランダムバックオフ時間は省く。キャリアセンスした後に他の伝送を感知した場合や、伝送に失敗した場合は、従来通りキャリアセンスを始める。待ち時間の間に、他のパケットを送信元ノードや宛先ノードに到達させることで、パケット衝突を抑える。

送信間隔 Δ は、TCP プロトコルが計測した RTT(Round Trip Time) とウィンドウサイズ W を用いて計算する。なお、 W はバイト数でなくセグメント数とする。送信元のウィンドウサイズ W は、フロー内に伝送できるパケットの数を表し、式 (1) により宛先ノードが受容可能なセグメント数を示す告知窓 (awnd : advertised window) と TCP 輻輳制御による輻輳窓 (cwnd : congestion window) の小さい方の窓幅である。

$$W = \min(\text{cwnd}, \text{awnd}) \quad (1)$$

また、送信間隔の急激な変化を抑えるため、式 (2) で示す RTT の加重平均を用いる。

$$\text{sRTT} = \frac{\text{RTT} + (7 \times \text{sRTT})}{8} \quad (2)$$

式 (2) の加重平均は、TCP の ACK タイムアウトの時間の計算に用いられているものである。RTT が一時的に大きく増減しても sRTT に大きな影響を及ぼさない特徴がある。これらを用いてパケット伝送から次のパケット伝送までの間隔 Δ を式 (3) により決定する。

$$\Delta = \frac{\text{sRTT}}{W} \quad (3)$$

伝送を始める前のキャリアセンスに DIFS 時間かかるため、送信元ノードがキャリアセンスするまでの待ち時間 Δ' は式 (4) とする。

$$\Delta' = \Delta - \text{DIFS} \quad (4)$$

これにより送信元ノードでは連続するパケット伝送に Δ 時間の間隔が空くことになる。

送信間隔 Δ は RTT の値が大きくなれば長くなり、 W の値が大きくなれば短くなる。送信間隔は TCP 肯定応答が送信元ノードに到達する度に更新されるため、途中で他の通信が開始された場合、RTT が増加して送信間隔が長くなる。

再送失敗によりデータリンク層でパケットを破棄した後

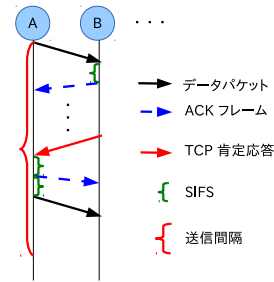


図 5 高速伝送と送信間隔調整を組み合わせた提案手法の動作

に次のパケットを伝送するときは、送信間隔空けずに通常のバックオフ時間待って伝送する。これは、リンクの品質が悪い場合のパケット破棄を想定した設計である。

3.4 高速伝送と送信間隔調整の組み合わせ手法

高速伝送手法と送信間隔調整手法の組み合わせ方について説明する。高速伝送手法は経路上の各ノードに適用し、送信間隔調整手法は TCP 接続の送信元ノードに適用するので、送信元ノードでは 2 つの手法が適用されることになる。連続するパケット送信において、送信間隔調整手法は Δ 時間待って次のパケットを伝送する。これに対して、高速伝送手法は ACK フレームの伝送直後に次のパケットを伝送する。組み合わせる際には、高速伝送手法を優先し、TCP 肯定応答を受信すれば次のパケットを伝送することにする。

本手法では、2 つの手法を組み合わせると、連続するパケットは図 5 のように送信間隔待っている間に TCP 肯定応答が返ってくれば即伝送し、送信間隔 Δ までに TCP 肯定応答が返ってこない場合は送信間隔 Δ 待った後に伝送する。

3.5 複数のフローが重なる場合や交差する場合

複数のフローが重なる場合や交差する場合の振舞いを述べる。まず、あるノードが複数のフローの中継ノードとなる場合、高速伝送手法が適用されデータリンク層に蓄えられているデータパケットや TCP 肯定応答を次のノードに向けて高速に伝送する。複数のフローが 1 つの宛先ノードへ向けてパケット送信する場合も同様に、高速伝送手法が適用される。宛先ノードにデータパケットが到着するとデータリンク層に蓄えられている TCP 肯定応答が高速に伝送される。

次に、1 つのノードが中継ノードと送信元ノードを兼ねる場合はデータパケットや TCP 肯定応答を受信すれば、高速伝送手法によりパケットを優先的に伝送することができる。その際、受信するパケットや伝送するパケットは、どのフローに属するかは関係なく動作する。

最後に、1 つの送信元ノードから複数のフローを送信する場合、TCP で計測される RTT とウィンドウサイズは

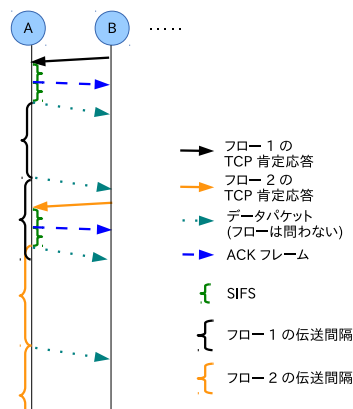


図 6 1 つの送信元ノードから 2 つのフローを送信する場合の動作

フロー毎に存在し、送信間隔は複数存在することになる。しかし、次のパケットまでの送信間隔は、図 6 のように最後に返ってきた TCP 肯定応答が属するフローに対する送信間隔になる。そのため、現在適用されている送信間隔と次に送信するパケットは異なる場合がある。図 6 は送信元から各フローの 1 ホップ先のノードが同じ場合の例を示しているが、1 ホップ先のノードが異なる場合も同様である。

4. 評価

提案手法によりスループットが向上するか計算機シミュレーションにより評価する。始めに、ひとつの TCP フローについてホップ数が増える場合をシミュレーションする。次に、2 つの TCP フローが重なる場合やフローが干渉し合う場合をシミュレーションし、最後に、5 つまでのフローについてスループットが向上するか評価する。

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションには ns-2 を使用し、高速伝送手法と送信間隔調整手法を実装した。表 1 に示されるシミュレーション環境で、従来手法 (Conventional)、高速伝送手法のみ適用 (Forwarding)、高速伝送と送信間隔調整を組み合わせた提案手法 (Pacing + Forwarding) の 3 種類をシミュレーションする。

評価指標として、スループットに加えすべてのノードのデータリンク層で伝送されるパケットの数も計測する。パケット伝送数は、パケット衝突回数を評価するための指標で、伝送数を削減できればパケット衝突回数を削減することが示される。フローが複数存在する場合は各フローのパケット伝送数とスループットに加え、すべてのフローでこれらを合計した値も示す。

すべてシミュレーションにおいて、近傍ノード間距離を固定した。無線通信において、近傍ノード間距離が長くなれば、リンクの品質低下によりパケットが到達しにくくなる。

表 1 シミュレーション環境

無線規格	IEEE 802.11
伝搬モデル	仲上・ライスフェージング
経路制御	静的
CW_{min}	31
CW_{max}	1023
スロットタイム	9 μ s
SIFS	16 μ s
DIFS	34 μ s
awnd	100 セグメント
TCP のセグメントサイズ	1 K バイト
輻輳制御	TCP New Reno
各フローの通信データサイズ	5 M バイト

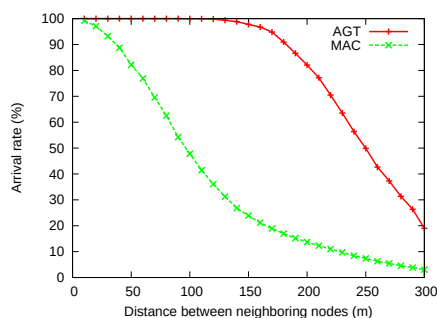


図 7 近傍間距離とパケット到達率の関係

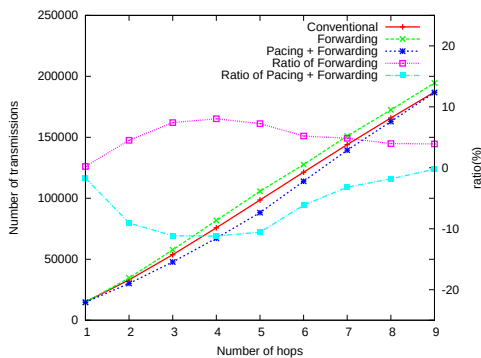
1 ホップの経路で、UDP プロトコルを用いて 500 バイトのデータグラムを約 5000 回送信した場合の、ノード間距離とパケット到達率の関係を図 7 に示す。図 7 の赤線は、最大 7 回の再送を含めたパケット到達率である。一方、緑の線は、1 回のパケット伝送におけるパケット到達率である。例えば、ノード間距離が 100 m の場合、1 回のパケット伝送が宛先ノードに到達する確率は約 50 % であるが、再送することによりすべてのパケットは宛先ノードに到達する。

近傍ノード間距離が短いと 1 回の伝送の到達率は高いが、遠距離の通信をするためには、ホップ数を多くしなければならない。そこで、ホップ数が多い場合の送信元と宛先の距離を考慮し、近傍ノード間距離は 1 回のパケット到達率が、約 73 % で、再送を含めた到達率が 100 % となる 60 m を選択した。

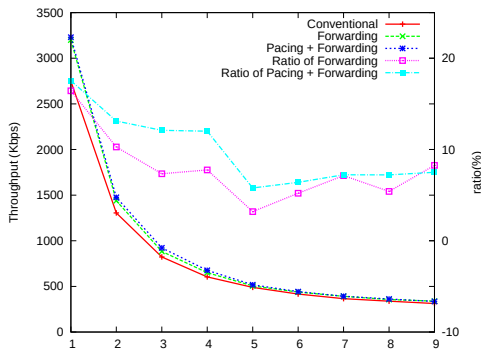
4.2 単一フローでホップ数を増やした場合

まず、ホップ数が多い場合の提案手法の性能を評価する。ノードを 60 m 間隔で直線上に配置し、ホップ数を変化させることで、送信元ノードと宛先ノードまでの通信距離を延ばす。送信元ノードから宛先ノードまでの両端ノード間距離は 60 m ~ 540 m とする。

送信元ノードから宛先ノードへ 5 M バイトのデータ通信をした場合の計測結果と、従来手法に対する提案手法の増減率を図 8 に示す。図 8 よりホップ数が増加する程、パ



(a) パケット伝送数



(b) スループット

図 8 ホップ数の増加に関するシミュレーション結果

ケット伝送回数が増え、スループットが低下することが分かる。

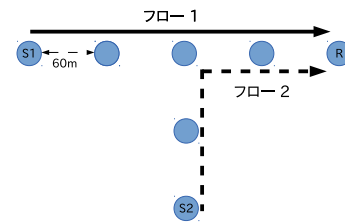
高速伝送手法のみ用いた場合は、従来手法よりパケット伝送数が増加し、最大で従来手法より 8 % 増加している。スループットは、すべてのホップ数で改善し、ホップ数が少ない方が改善率が高い。高速伝送と送信間隔調整の両方を用いた提案手法は、従来手法よりパケット伝送数を 0.2 ~ 11.2 % 削減できている。スループットは、従来手法に比べ 5.8 % ~ 17.5 % 向上し、高速伝送手法のみを用いた場合と同程度の値となった。

4.3 2つのフローが重なる場合

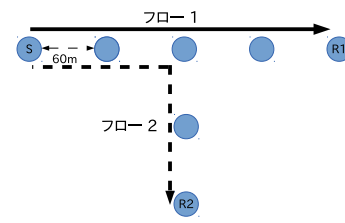
次にフローが 2 つで各フローが重なる場合を評価する。図 9 にシミュレーションに用いた 4 つのパターンを示す。

図 9(a) では送信元ノードが S1 と S2 である 2 つのフローがあり、これらが途中で合流し同じノード R に向けてパケットを送信する。図 9(b) では同じ送信元ノード S から 2 つのフローを流し、途中でフローが枝分かれする。また、1 つのフロー内にもう 1 つのフローの送信元ノードと宛先ノードがある場合として、図 9(c) のように送信元ノードが同じ場合と、宛先ノードが共通である図 9(d) のようなパターンもシミュレーションする。

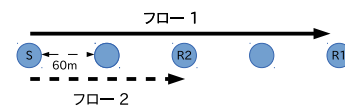
それぞれのトポロジにおいて、図 9 のフロー 1 を開始した 10 秒後にフロー 2 を開始する。通信するデータサイズは 5 M バイトで、5 M バイトの送信が完了するまで 100



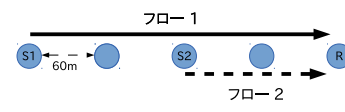
(a) パターン 1



(b) パターン 2



(c) パターン 3



(d) パターン 4

図 9 2つのフローが重なる場合のパターン

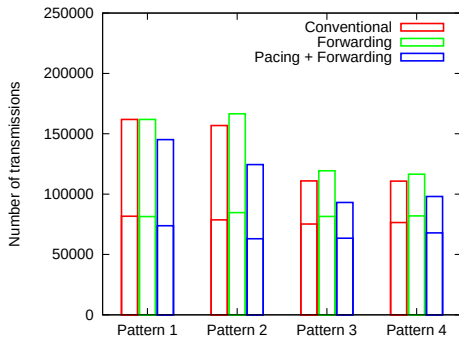
秒以上かかる。そのため、2 つのフローは始めと最後を除いて、ほぼ重なり合いながら通信する。

シミュレーションで得られた計測結果を図 10 に示す。図 10 は左からパターン 1 の従来手法、高速伝送手法のみ、提案手法を示しており、棒グラフの下から、フロー 1、フロー 2 の順に積み上げている。

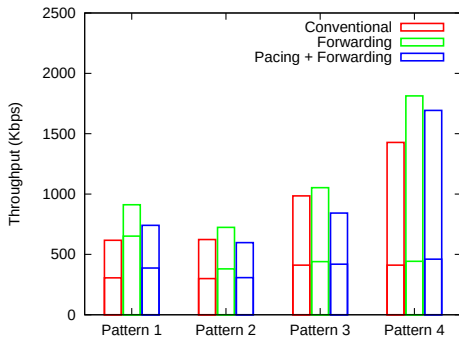
高速伝送手法を用いると従来手法より伝送数が増え、送信間隔調整手法を組み合わせることで従来手法より伝送数を削減することができた。スループットに関しては、高速伝送手法を適用するとすべてのパターンで向上した。高速伝送と送信間隔調整を組み合わせた提案手法では、送信元ノードが共通であるパターン 2 とパターン 3 のスループットが最も低くなった。

4.4 複数のフローが存在する場合

フローが複数存在し干渉を与え合う場合についてシミュレーションする。図 11 のようにノードを 60 m 間隔に計

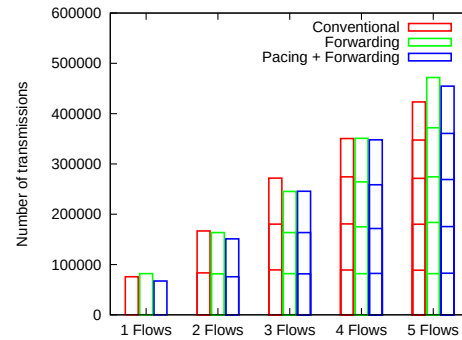


(a) パケット伝送数

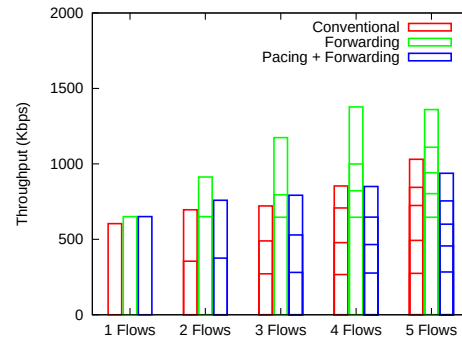


(b) スループット

図 10 2つのフローが重なる場合のシミュレーション結果



(a) パケット伝送数



(b) スループット

図 12 複数フローが干渉し合う場合のシミュレーション結果

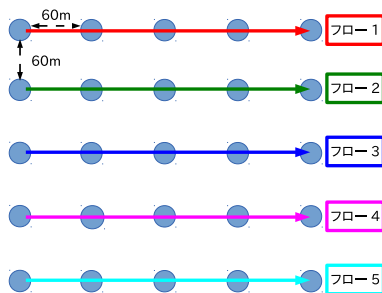


図 11 複数のフローが存在する場合のフローの様子

25 個配置し、5 M バイトの通信をフロー 1 から 20 秒毎に開始する。

計測結果を図 12 に示す。左からフローが 1 つの場合の従来手法を示し、フローが 5 つ存在する場合の提案手法を一番右に示している。また、グラフの下からフロー 1、フロー 2 の順に各フローの計測結果を積み上げて示している。

まず、単一フローと複数フローの結果の違いについて述べる。このシミュレーションは、4 ホップのフローが複数存在する。従来手法を用いた 4 ホップの単一フローのパケット伝送数は 75,000 でスループットは 600 Kbps であった。一方、フローが 2 つある場合のパケット伝送数は平均 83,000 で平均スループットは 350 Kbps 程度となり、単一フローに比べパケット衝突とスループット低下が起きていることが分かる。更に、図 12 のようにフローが 5 つの場合は、パケット伝送数の平均は 85,000、平均スループット

は 200 Kbps 程度であった。このように、フローが多くなると干渉が起これやすくなるのが分かる。

提案手法の性能について述べる。高速伝送手法のみではフローの数によらず、全体のスループットを向上させることができた。提案手法における、フロー数が 2 か 3 の場合、スループットの向上とパケット伝送数の削減を実現できた。フロー数が 4 の場合、パケット伝送の合計値は削減することができたが、スループットは従来手法と同程度の値となり、5 つのフローが存在する状況では、パケット伝送は増えてスループットも低下するという結果になった。

フロー別で見た場合、高速伝送手法のみを用いた場合は、フロー 1 のスループットは他のフローに比べ高くなっている。一方で、フロー 1 の次に開始されるフロー 2 のスループットは大きく低下している。これはフローの数に関わらず見られ、高速伝送手法は全体のスループットは向上させるが、フロー毎に不公平が生じることが示された。それに対して、提案手法は、各フローのスループットがある程度公平なものとなっている。

4.5 考察

4.5.1 ホップ数の増加に関する考察

単一フローにおいて、1 ホップの場合、送信元ノードから宛先ノードまでのパケットと宛先から送信元に向けた TCP 肯定応答しかパケット伝送がないため、衝突が起これにくい。一方、9 ホップのようにホップ数が多くなると

パケット衝突が頻繁に起きる。1 ホップや 9 ホップの場合において、高速伝送手法を適用しても、高速伝送手法がパケット衝突に及ぼす影響は少ない。そのため、パケット伝送数の増加は少しに抑えられ、通信時間を短縮しスループットを増加させる。

ホップ数が 4, 5 の場合は高速伝送手法により、従来よりパケット衝突が起こるためパケット伝送数が増えた。したがって、再送による遅延が生じるので、他の場合に比べると向上の度合いは減る。しかし、5 % 以上のスループット向上が見られたことからホップ数の増加に対しても有効であると考えられる。

一方、送信間隔調整手法はパケット衝突を抑える効果を持つ。高速伝送と送信間隔を組み合わせた提案手法は、パケット衝突による再送を減らすため、ほとんどのホップ数で高速伝送手法のみよりもスループットを向上させる。また、高速伝送手法により、パケット衝突が増える環境では、送信元ノードの送信間隔を空けることで多くのパケット衝突を削減する。したがって、シミュレーションにおけるホップ数が 4, 5 ホップの場合に多くのパケット伝送を削減できた。

4.5.2 複数フローに関する考察

2 つのフローが重なる場合において、高速伝送と送信間隔調整の組み合わせ手法は送信元ノードが共通であるパターンのスループットを低下させた。

n 個のフローが 1 つの送信元ノードから送信される場合、1 つのフローに属するデータパケットを連続して伝送する訳ではない。ここで、各フローに属するデータパケットを順番に送信すると仮定する。データパケットを送信した後、同じフローに属するデータパケットをもう一度送信するには、TCP 肯定応答が返ってくるか、送信間隔の Δ 時間待つかどちらかの条件を n 回満たすまで待たなければならない。送信間隔調整手法は、従来手法に比べ連続するパケットの伝送が遅れてしまうため、大幅な遅延が生じスループットが低下したと考えられる。

更に、同じ送信元ノードから複数フローのデータパケットを送信する場合の送信間隔の更新についても考慮する必要がある。本手法では、TCP 肯定応答が送信元に返ってくる度に送信間隔を更新した。しかし、返ってきた TCP 肯定応答と、新しく更新された送信間隔の間伝送を控えているデータパケットは同じフローに属するとは限らないため、計算された送信間隔が有効に働くとは限らない。今後は更新された送信間隔をフロー毎に保持し、次に伝送するパケットがどのフローに属するかで待つ時間を変えるなどフロー毎に考慮していく必要がある。

複数のフローが干渉し合う場合において、高速伝送手法を用いた場合は全体スループットを向上させることが示された。高速伝送と送信間隔調整を組み合わせた提案手法を用いると、5 つ以上のフローが干渉し合う状況では送信間

隔が延びるためスループットを低下させる。

5. おわりに

本研究では無線メッシュネットワーク上の TCP フローを対象にホップ数が多い場合や複数フローが存在する環境においてもスループットを向上させることを目的とし、高速伝送手法と送信間隔調整手法の 2 つから構成される手法を提案した。

高速伝送手法は、パケットを受信したノードが優先的にパケットを伝送する手法である。送信間隔調整手法は送信元ノードから宛先ノードに向けてパケットを送信する際に、送信間隔を適切に空ける手法である。送信間隔 Δ は RTT とウィンドウサイズを用いて算出し、TCP 肯定応答の受信の度に更新することで通信状況に柔軟に対応する。

シミュレーションによる評価では、単一フローにおいて、提案手法はスループットを向上させ、パケット伝送回数の削減もできることが示された。複数フローでは、同じノードから 2 つのパケットを送信する場合と 5 つ以上のフローが干渉し合う場合、提案手法を用いると送信元ノードの動作によりスループットが低下した。

今後の課題として、提案手法の性能を上手く発揮できるような経路制御の研究や、スループットが低下した複数フローにおける送信間隔の調整についての考慮が挙げられる。

参考文献

- [1] Guido R. Hiertz, et al., "IEEE 802.11s: The WLAN Mesh Standard", IEEE Wireless Communications, vol.17, no.1, pp.104–111, 2010.
- [2] 古川浩, 「無線マルチホップネットワークにおけるパケット送信間隔制御法の提案」, 電子情報通信学会技術研究報告書, vol.103, no.458, pp.97–102, 2003.
- [3] 丸田一輝, 東坂悠司, 比嘉征規, 古川浩, 「TCP トラフィックを想定した経路予約型周期的間欠送信」, 電子情報通信学会技術研究報告書, vol.106, no.478, pp.111–116, 2007.
- [4] Sumit Rangwala, Apoorva Jindal, Ki-Young Jang, Konstantinos Psounis, and Ramesh Govindan, "Understanding Congestion Control in Multi-hop Wireless Mesh Networks", Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking, pp.291–302, 2008.
- [5] 山口圭太, 吉田聡太, 間瀬憲一, 「OLSR MANET における MPR 端末の優先再送方式とフレームバースト配送方式」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.105, no.16, pp.13–18, 2005.
- [6] 中原史博, 北須賀輝明, 有次正義, 「伝送周期の調整による無線マルチホップネットワーク上での TCP の輻輳の緩和手法」, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, pp.530–537, 2013.
- [7] 中原史博, 眞鍋雄貴, 北須賀輝明, 有次正義, 「無線マルチホップネットワークにおけるパケット衝突削減のための伝送間隔の調整手法」, 若手の会セミナー 2013 講演論文集, pp.25–30, 2013.