

無線メッシュネットワークにおける通信安定化のための 転送リンク切替手法

金岡弘道^{†1} 吉廣卓哉^{†2}

近年、無線端末同士をメッシュ状に接続し、マルチホップ通信を行う無線メッシュネットワークの研究が活発に行われている。無線メッシュネットワークは、通信媒体として電波を使用するため、無線リンクの通信品質の変動が著しく、リンクが切断する場合もあり得る。そのため、通信品質をリンクメトリックとして数値化し、メトリックの合計値が最小となるよう経路制御を行うことで通信品質の変動に対応する動的メトリックが提案されている。しかし、無線リンクの通信品質の変動は非常に大きいため、比較的ゆるやかな変動への対応を意図したリンクメトリックのみでは十分に追従することができない。そこで本研究では、急激なリンクの通信品質の変動に対応するために、無線メッシュネットワークをマルチチャンネル化し、リンクの輻輳時に瞬時に転送リンクを切り替える手法を提案する。これにより、動的メトリックでは対応できない急激な通信品質の変化に対しても、安定した通信を継続することが可能になり、通信のスループットと安定性が大幅に向上した。提案手法の性能をシミュレーション実験によって評価した。

Dynamic Switching of Forwarding Links for Stable Communication in Wireless Mesh Networks

Hiromichi KANAOKA^{†1} Takuya YOSHIHIRO^{†2}

Recently, many studies appear on WMNs(Wireless Mesh Networks), in which multi-hop communications are performed among stationary nodes via wireless links. In WMNs, due to using wireless medium, communication quality of links significantly changes as time passes. To overcome this fluctuation, several dynamic link metrics have been proposed that represent the quality of links as link metrics so that the shortest paths avoid low-quality links. However, because link metrics are designed to follow relatively slow metric changes, it is not sufficient for real network to supply stable communications. In this study, we propose a method that builds a WMN in multichannel environment and switches the forwarding links dynamically in case of congestion to improve throughput and stability of communications. We evaluate the proposed method through simulation experiments.

1. はじめに

ノート PC やスマートフォン等の無線 LAN インタフェースを搭載した携帯端末が広く普及し、公衆環境での通信インフラとしての利用も広がっている。無線 LAN の規格として IEEE802.11 が最も普及しており、802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n 等が規格化され、理論上の通信速度は最大 600Mbps に達する。

現在の無線 LAN の利用形態は、最後の 1 ホップのみを無線通信で実現するものがほとんどである。これに対して、無線端末同士をメッシュ状に接続することでマルチホップ通信を行う無線メッシュネットワークの研究が活発に行われている。無線メッシュネットワークはインターネットの到達エリアを広げるインフラストラクチャとしての利用が期待されている。無線メッシュネットワークは通信媒体として電波を使用するため、共有する空間に同時に電波が発せられた場合、干渉によって通信の品質が損なわれる場合があり、干渉がひどい場合にはリンク切断もあり得る。そのため、通信品質をリンクメトリックとして数値化し、これを基に最短経路を計算することで、低品質なリンクを動的

に避ける手法が提案されている。リンク状態型経路制御プロトコルにおいて、リンクメトリックは比較的ゆるやかなリンク品質の変動に対応することができ、スループットの向上や通信品質の安定化を実現できる。¹⁾²⁾³⁾

しかし、リンクメトリックが適用された状態であっても、無線メッシュネットワークにおける通信では、時間経過に対するスループットの変動が非常に大きく、ユーザから見た通信は非常に不安定である。一例として、一般的な無線 LAN 機器を用いてメッシュネットワークを構築し、UDP 通信による一定速度のフローを発生させた場合の時間経過に対するスループットの変動を図 1 に示す。この図から、送信されるデータ量は一定であるにもかかわらず、スループットは秒単位で大きく変動しており、ユーザ通信のスル

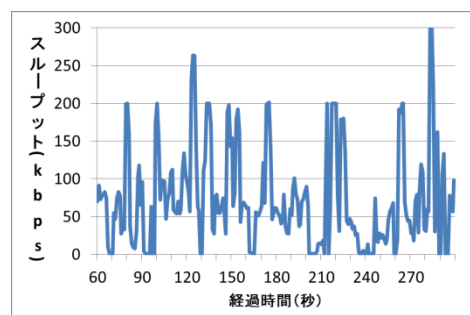


図 1 無線メッシュネットワークにおけるスループットの時間経過による変動

^{†1} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University.
^{†2} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University.

プットが不安定であることがわかる。これは、一定以上のトラフィックが流れるネットワークでは、各リンクは常に周辺リンクの電波と干渉し、その干渉の程度が時々刻々と変化することに起因する。この変化が速いため、リンクメトリックだけでは十分にその変動を吸収できていない。

一方、近年では、無線 LAN インタフェースの導入コストが低下したことにより、1つの端末に複数のインタフェースを接続することが容易になったため、マルチインタフェース化やマルチチャンネル化によって干渉を緩和させる技術が現実的になってきた。

そこで本研究では通信の安定化を目的として、複数インタフェースを用いて構築されたマルチチャンネル無線メッシュネットワークにおいて、輻輳時に瞬時に異なるチャンネルのリンクを用いてパケットを転送する動的な転送リンク切替手法を提案した。また、市販のネットワークシミュレータを用いた評価実験を行った。IEEE802.11を用いて構築された無線メッシュネットワーク上でプロアクティブ型経路制御プロトコルの一つである OLSR⁴⁾とリンクメトリック変動手法 ETX を動作させ、UDP トラフィックを流した場合の通信性能を評価した。

本論文の構成を以下に示す。まず2章で本研究の基礎となる技術について述べ、3章で提案手法である転送リンクの切替について説明する。4章で実験結果を示し、最後に5章でまとめとする。

2. 動的メトリック手法 ETX

標準的なプロアクティブ型経路制御プロトコルでは中継する端末数が最小となる経路が通信の安定性に関係なく選択される。そのため不安定なリンクが最短経路として選ばれ、通信の安定性が低下する場合がある。そこで、各々のリンクの品質をリンクメトリックとして数値化し、リンクの通信品質に応じて値を変動させることで最も通信品質の良い経路を選択する動的メトリック変動手法が提案されている。

代表的な動的メトリック変動手法の1つである ETX は、あるリンクで一つのパケットを送信する場合、再送も含めた平均パケット送信回数をメトリックとする手法である。2つの端末 A,B 間において定期的に隣接端末に送信される Probe パケットを送信したときの A から B へのパケットの到達率を p_b , B から A へのパケットの到達率を p_r とすると、数式 (1) によって A,B 間のリンクメトリックが計算できる。

$$ETX = \frac{1}{p_b \times p_r} \quad (1)$$

各端末は、隣接端末間で p_b , p_r を求めるために一定時間 τ 毎に Probe パケットを送信する。各端末は、過去 w 秒間に隣接端末のそれぞれからいくつ Probe パケットを受信し

たかを保持しておく。ある時刻 t におけるパケットの到達率 P_f は数式 (2) によって求めることができる。ただし Count (t_1, t_2) は時刻 t_1 から t_2 までの間に受信したパケット数を表す。

$$p_f = \frac{\text{count}(t-w, t)}{w/t} \quad (2)$$

このようにして求められた p_f の値を Probe パケットに付加して定期的に周囲の端末に知らせることで、全ての隣接ノード間で常に最新の p_b と p_r が保持される。

以上の手順をすべての端末が行うことにより、すべてのリンクのメトリックが求められる。

ETX の値は単位時間あたりの Probe パケット平均受信数の逆数となるため、値が大きいほどリンクが不安定であることを表す。よって、ETX を適用した経路制御プロトコルは宛先までの ETX の合計値が最小となる経路を探索することによって最も安定した経路を選択することが可能となる。しかし、ETX は過去一定時間の統計値をもとに計算を行うため緩やかに変動する。そのため、例えば Probe パケットの送信間隔に対して短い時間で通信品質が大きく変動した場合、通信品質の変動に追従することができず、通信品質が安定しないことが問題として挙げられる。

3. 通信安定化のための動的な転送リンクの切替手法

3.1 提案手法の概要

無線メッシュネットワークにおいて端末間で発生する干渉は、空間を共有する複数の端末が同じチャンネルを使用している場合に起こる問題である。そこで1つの端末が使用するチャンネル数を増加させ、動的リンクメトリックを動作させることで干渉を分散させる。そのうえで、動的リンクメトリックで吸収できない急激な変動に対応するために、輻輳時に即時的な転送リンクの切替を行う。

本研究では無線メッシュネットワークをマルチチャンネル化し、動的な転送リンクの切替を組み合わせることによって通信の安定性を向上させる手法を提案する。

3.2 マルチチャンネル化

マルチチャンネル化は端末に接続するインタフェースの数を増加させ、それぞれに独立したチャンネルを設定することで実現する。全ての端末に同数の NIC (ネットワークインタフェースカード) を接続し、割り当てるチャンネル構成を全端末で共通にする。こうすると、経路制御プロトコル上では、ネットワークトポロジ内のリンクが NIC の数だけ多重化されたようなネットワークとして扱われる。例えば、3チャンネルでネットワークを構築した場合、無線メッシュネットワークのトポロジは図2のような構造となり、端末に接続されたそれぞれの NIC が隣接端末の対応する NIC とリンクを張ることになる。そのため、端末間には3

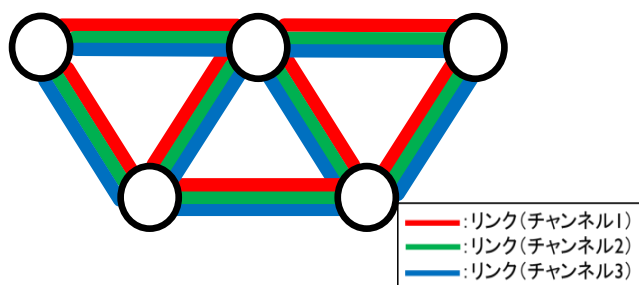


図 2 無線メッシュネットワークのマルチチャンネル化
重にリンクが張られ、経路探索の際には3本のうちから最適なリンクを選択することが可能となる。

さらに、動的メトリック変動手法 ETX を適用することで、各々のリンクでメトリックの値が計算される。そのため、高い通信品質のリンクが経路として選択される。その結果、各々の端末で各隣接端末に対して、干渉が小さいチャンネルが選択されることによって通信性能が向上し、通信の安定性を向上させることが可能となる。

マルチチャンネル化及び動的メトリックの適用は、既存技術によって実現可能であり、本研究の新規性は、3.3 節に述べる転送リンクの切替を行うことで、さらなる通信性能の向上を図るところにあることを断っておく。

3.3 転送リンクの切替

ある端末において、ある宛先へのパケットが転送されるリンク、即ち経路表が指すリンクを**優先リンク**と呼ぶ。提案手法は、優先リンクのそれぞれに対応する代替リンクを**予備リンク**としてあらかじめ選択しておき、優先リンク上に輻輳を検知したときに、パケット転送を即時に予備リンクに切り替えることで実現する。提案手法が既存の経路制御プロトコルに加えた変更点は以下の3点である。

- (A) 各端末にて、隣接端末のそれぞれに対する予備リンクを保持する予備リンク対応表を追加
- (B) 優先リンクの状態を監視し、輻輳を検知した場合に予備リンクに切り替える処理を追加
- (C) 一定の条件を満たした場合に切り替えたリンクを優先リンクに戻す機能を追加

まず変更点 (A) について述べる。本研究では、OLSR のようなリンク状態型経路制御プロトコルを想定する。経路表により、各宛先 IP アドレスに対して優先リンクが一つ決まる。優先リンクは隣接端末へのリンクであるが、最短経路計算により決まるものであるから、同一の隣接端末に対する優先リンクは同一となる。すなわち、転送リンクの切替を行うための予備リンク対応表には、各隣接端末に対する予備リンクが格納されていけばよい。こうすることで、

優先リンク上で輻輳を検知した際には、予備リンク対応表を検索することで即座に予備リンクを決定できる。予備リンクとして、各隣接端末への複数のリンクのうち、用いている動的メトリックの値が優先リンクの次に小さいリンクを用いることとした。

次に変更点 (B) について述べる。IEEE802.11 では受信端末から Ack を受信することで送信端末が送信した MAC フレームが受信端末に到達したことを確認している。MAC フレームが干渉などによって消失し Ack が受信できない場合、MAC フレームの再送処理が行われる。そのため、干渉の発生頻度が上昇してリンクが輻輳した場合、MAC フレームが消失する確率が上昇し、再送回数が増加する。

そのため、本研究では MAC フレームの再送回数を指標として優先リンクの輻輳を検知する。しかし、直前に送信されたフレームの再送回数のみを用いると、干渉が直前のフレームを送信する瞬間のみで発生した偶発的なものか、ある程度継続して発生している輻輳なのかを判別できない。そこで提案手法では、比較的短い過去一定時間に送信された MAC フレームの再送回数を保持しておき、その平均値である平均再送回数が設定された一定値を超えた場合に、輻輳を検知することとした。

最後に変更点 (C) について述べる。優先リンクの輻輳を検知すると、暫くは予備リンクを用いてパケットを送信することになる。一般的には NIC それぞれに対して送信キューを持つため、ある優先リンクで輻輳が発生すると、その後のパケットは予備リンクの送信キューに格納される。その後、設定された一定時間は予備リンクを用いたパケット転送を継続し、その後優先リンクに戻す。この間に輻輳が解消していなければ、再び優先リンク上で輻輳が検出され、一定時間の予備リンクによるパケット転送が開始される。この仕組みにより、輻輳時に即時に空きリンクを用いて通信を安定化することが可能になる。

提案手法を用いて受信したパケットが次ホップ端末に転送される際の動作を以下にまとめる。端末はまず、受信したパケットを受信キューから取り出し、経路表を用いて宛先に対応する優先リンクを検索する。次に、そのインタフェースの転送リンクが優先リンクであれば、各インタフェースで保持されている優先リンクのフレーム平均再送回数を参照し、転送リンク切替のための閾値を上回る場合には転送リンクを予備リンクに切り替える。転送リンクが予備リンクであれば、一定時間経過していれば、転送リンクを優先リンクに戻す。こうして転送リンクが定まるので、パケットはその転送リンクの送信キューに格納される。

4. シミュレーション評価

4.1 実装と設定

本研究の評価実験は市販のネットワークシミュレータにより行った。シミュレータ上に実装されている経路制御プロトコルモジュール OLSRv2-Niigata⁵⁾を改造して ETX を実装し、経路制御に用いた。ETX における Probe パケットとして HELLO パケットを用いた。そのため、Probe パケットの送信間隔 τ は Hello パケットのデフォルト送信間隔である 2 秒となる。また、20 秒間で到達した HELLO パケットの個数を求めるため、Probe パケットの集計期間である w は 20 秒となる。

4.2 実験のシナリオ

シミュレーション実験を通じて提案手法による通信の安定化性能を評価した。端末に接続する NIC 数は 1~5 個を試し、MAC 層プロトコルとして IEEE802.11 を用いた。通信速度は 6Mbps とし、使用周波数は 5.18GHz・5.20GHz・5.22GHz・5.24GHz・5.26GHz の 5 帯域を用いた。経路制御プロトコルとしては、4.1 節で述べたように OLSRv2 を用いた。実験は各パラメータ設定に対して 5 回の反復を行い、評価には平均値を用いた。また、送信電力を 20dbm としたため、おおよそ 300 メートル程度の距離までならばパケットが隣接端末に到達できる。

評価実験として、以下の 3 種類のトポロジを用いた 3 つのシナリオを実施した。

- (1) 十字型のトポロジ
- (2) 正三角形で構成されたメッシュ状トポロジ
- (3) 正方形で構成されたグリッド状のトポロジ

トポロジ (1) の十字型のトポロジで行う実験方法を述べる。端末の配置は図 3 の通りとし、端末 1-2 と 2-1 間に 400kbps の UDP による CBR(Constant Bit Rate)通信を実験開始後 1 分から 4 分間発生させ、さらに端末 3-4 と 4-3 間に同じく 400kbps の CBR 通信を実験開始後 2 分から 3 分間発生させた。このシナリオではフローの送信に関わる最低限の端末のみを配置することで、限られた干渉の中で提案手法の安定性を評価する。実験は、平均再送回数の閾値とリンク切替状態継続時間、端末あたりの NIC 数を変動させ、性能への影響を調べた。既存手法とも比較を行う。ここで言う既存手法とは、マルチチャンネルネットワーク上で動的メトリックのみを動作させ、提案手法を用いない方式のことである。評価指標として、スループット、及びその変動係数を用いた。スループットの変動係数は、1 秒毎にネットワークの総スループットを求め、その標準偏差を平均値で割った値である。変動係数が低いほど、スループットが安定していると言える。

次に、トポロジ (2) の正三角形で構築されたメッシュ状のトポロジで行うシナリオについて述べる。端末の配置は図 4 の通りであり、一辺 300m の正三角形によってトポ

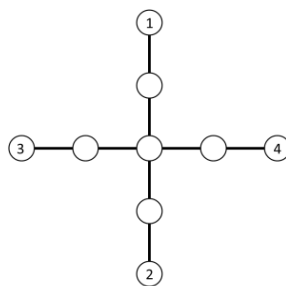


図 3 トポロジ (1)

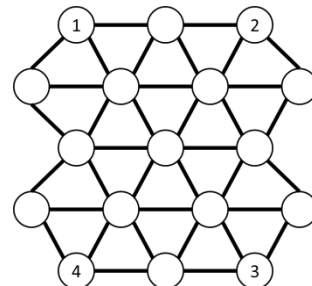


図 4 トポロジ (2)

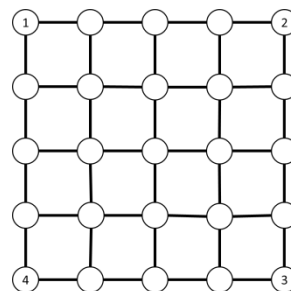


図 5 トポロジ (3)

ロジを構築した。トポロジ (2) は、トポロジ (1) よりも複雑な干渉が起きる場合の挙動を観測するために用いる。端末 1-3 と 3-1, 2-4, 4-2 間にそれぞれ 800kbps の CBR 通信を実験開始 1 分から 4 分間発生させた。このトポロジの特徴は、端末 1 と 3、端末 2 と 4 の間で最短経路が 1 本に定まることである。そのため、通信品質が悪化してもメトリック上昇によって経路が切り替わることが少なく、CBR 通信が交差する端末周辺に存在する多数の端末が干渉の影響を受ける。そのため、干渉の緩和による通信の安定化が容易に確認することが可能である。実験は使用するチャンネル数を 1 から 5 まで変化させて行い、スループットとその変動係数を用いて既存手法と提案手法の比較評価を行った。なお、提案手法を適用する場合、転送リンク切替のための閾値が 1.5、リンク切替状態維持時間が 500 ミリ秒の組み合わせを用いた。これは、トポロジ (1) のシナリオで最も良好なパフォーマンスを得られた設定である。

最後にトポロジ (3) の正方形で構築されたグリッド状トポロジについて述べる。このトポロジは図 5 のように、一辺 300m の正方形でグリッド状に端末を配置し、端末 1-3 と 3-1, 2-4, 4-2 間にそれぞれ 800kbps の CBR 通信を実験開始 1 分から 4 分間発生させた。このトポロジの特徴は、対角線を結ぶ頂点同士で通信を行う場合、等コストの経路が複数存在することである。つまり、リンクの品質が低下し、そのリンクを通る経路のメトリックが上昇すると、すぐ別の経路に切り替わるため、通信経路がネットワーク全体で大きく振動する。このシナリオでは、頻繁に経路が切り替わる環境を用いて提案手法の安定性を評価する。本シナリオでは、トポロジ(2)と同一の指標を用いて、提案手法と既存手法の性能を比較する。また、トポロジ (2) と同じく提

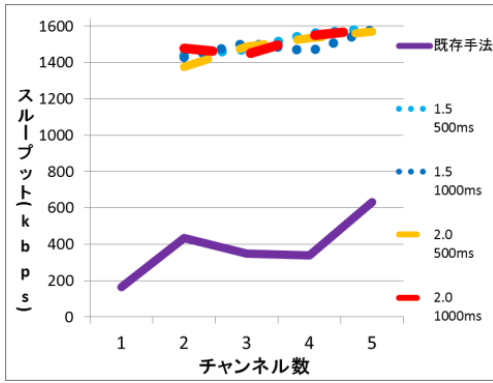


図 6 トポロジ (1) における
 総スループットの比較

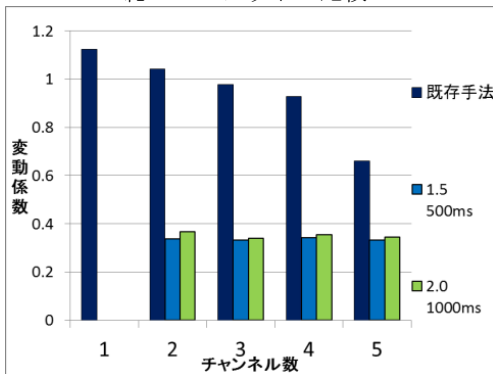


図 7 トポロジ (1) における
 安定度の比較

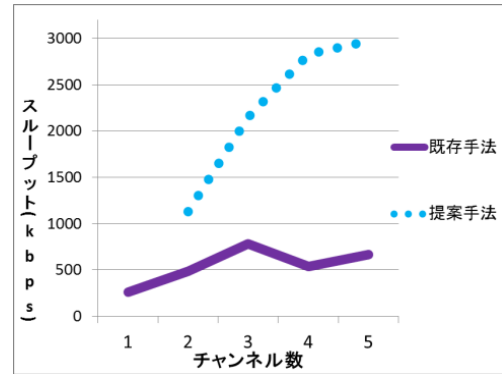


図 8 トポロジ (2) における
 総スループットの比較

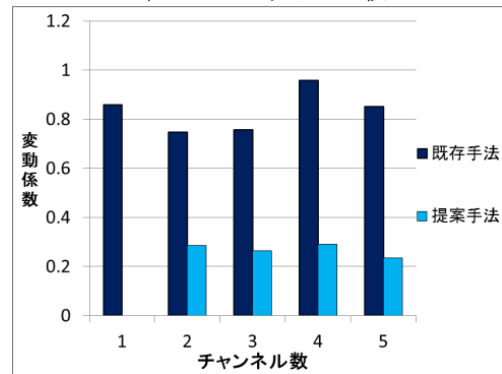


図 9 トポロジ (2) における
 安定度の比較

案手法は、転送リンク切替のための閾値を 1.5、リンク切替状態維持時間を 500 ミリ秒に設定した。

以上 3 種類のトポロジを用いて評価実験を行い、提案手法による通信の安定性を評価する。

4.3 実験の結果と考察

まず、トポロジ (1) のシナリオの実験結果を述べる。まず、に既存手法と提案手法の総スループットを示す。提案手法は、輻輳検出に用いる平均再送回数の閾値として 1.5、2.0 の 2 値、リンク切替状態の継続時間として 500、1000 ミリ秒の 2 値に変化させた。また、端末あたりの NIC 数 (チャンネル数) は、1~5 の間で変化させた。図 6 の結果から、チャンネル数によらず、2 倍以上のスループットの向上が観測され、提案手法の有効性が示された。また、パラメータの値による性能の相違は見られなかった。

図 7 は、スループットの変動係数を示している。比較は、既存手法と、パラメータを変えた提案手法 2 つ (平均再送回数の閾値とリンク切替状態の継続時間をそれぞれ 1.5 と 500ms、及び 2.0 と 1000 ミリ秒にしたもの) で行った。変動係数においても提案手法は大幅に既存手法を上回り、ユーザの通信が大幅に安定化していることがわかる。チャンネル数が多くなるほど性能差が縮まっているが、これは、チャンネル数が増えるほど既存手法の安定性が向上していることによる。ここでも、パラメータによる提案手法の性

能の差異は見られなかった。

次に、トポロジ(2)を用いたシナリオの結果を示す。図 8 に総スループットを示す。提案手法のパラメータとして、平均再送回数の閾値を 1.5、切替状態の継続時間を 500 ミリ秒に設定した。ここでも提案手法が大幅なスループットの向上を実現している。しかし、トポロジ(1)の結果と異なり、チャンネル数によって提案手法にも大幅な性能差が見られる。この原因として、トポロジが異なることにより干渉が大幅に増加したこと、及び、送信レートがかなり大きいことによりネットワークが飽和した影響があると考えられる。提案手法は、チャンネル数が増加した場合に、その空き帯域を有効活用してスループットを向上できていることがわかる。

図 9 は変動係数の比較である。チャンネル数によらず、提案手法は大幅に通信を安定化できていることがわかる。

さらに、トポロジ(3)を用いたシナリオの結果を示す。提案手法のパラメータはトポロジ(2)を用いたシナリオと同一である。図 10 に総スループットを示す。ここでも提案手法は、既存手法を大きく上回っている。提案手法の性能はチャンネル数の増加に伴って向上しており、概ねトポロジ(2)の場合と類似した曲線を描いている。本シナリオでは、既存手法のスループットもチャンネル数の増加に伴って向上しているが、これは、トポロジ(3)が宛先までの同一ホッ

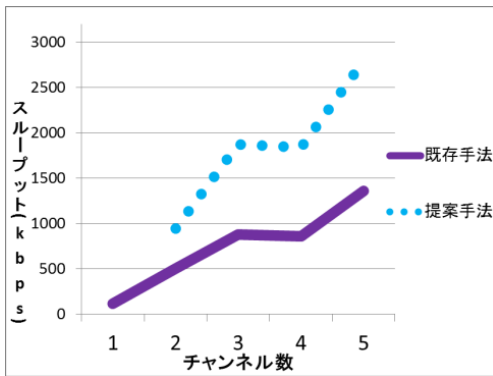


図 10 トポロジ (3) における
 総スループットの比較

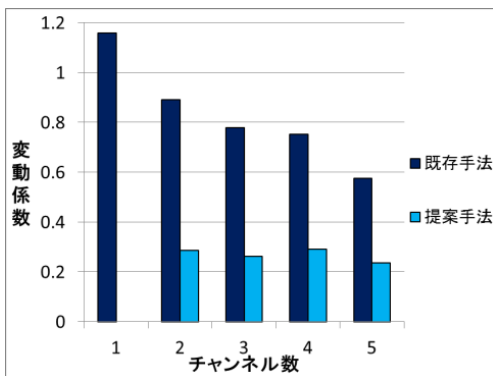


図 11 トポロジ (3) における
 安定度の比較

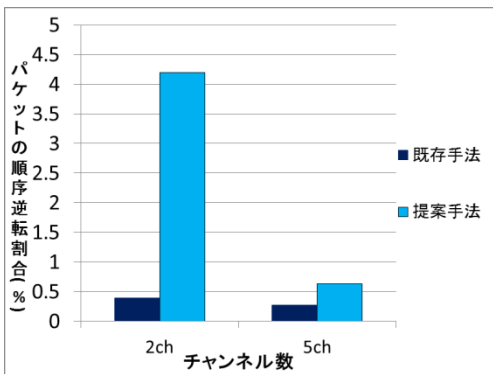


図 12 トポロジ (3) におけるパケット
 の到達順序逆転割合の比較

ブ数の経路を多数含むため、経路が頻繁に振動することで既存手法でも複数経路にパケットを分散できた結果であると考えられる。

図 11 に変動係数の比較結果を示す。ここでも、既存手法に対して提案手法の性能が大幅に高い結果が得られ、提案手法による通信安定性の向上が認められた。チャンネル数が多くなるにつれて性能差が縮まっているが、これは、前述のとおり、トポロジ(3)ではチャンネル数の増加に伴って既存手法の性能が向上したことが原因である。

最後に、提案手法では、優先リンクと予備リンクを切り替

える際に、送信パケットの到着順序が入れ替わる可能性があることを指摘しておく。パケット到着順序が入れ替わることにより、TCP 通信の性能に影響を及ぼす可能性がある。図 12 は、トポロジ(3)を用いたシナリオにおけるパケット到着順が逆転したパケットの割合を示す。既存手法でも経路が振動することによる到着順の逆転は見られるが、提案手法における逆転の割合はそれを大幅に上回ることがわかる。チャンネル数を多くすると逆転パケットの割合は小さくなるものの、やはり既存手法を大きく上回っており、この改善は今後の課題の一つである。

5. おわりに

本研究は、無線メッシュネットワークをマルチチャンネル化したうえで転送リンクの切替を行うことで通信を安定化する手法を提案し、シミュレーション実験にて提案手法の評価実験を行った。

提案手法は、マルチチャンネル無線メッシュネットワークにて、パケットの転送先端末に対し、通常用いる転送リンクと予備の転送リンクを用意しておき、通常用いる転送リンクの通信品質が低下した場合に、転送リンクを予備のリンクに切り替えるものである。

3 種類のトポロジによるシミュレーション実験を通じて提案手法の比較評価を行った結果、スループットの変動係数はすべてのシナリオにおいて提案手法を適用した場合に大きく改善し、提案手法は大きな安定化性能を発揮することが確認できた。また、チャンネル数が 1 つの場合と比べて、チャンネル数が増加すると、増加したチャンネル数を超える割合でスループットが向上し、スループットの面でも大きな通信性能の向上が確認された。

今後の課題として、提案手法を適用することでパケットの到達順序逆転が増加することへの対策が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は独立行政法人科学技術振興機構 研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム(A-S T E P) フィージビリティスタディ【FS】ステージ 探索タイプの支援を受けた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) R. Draves, J. Padhye and B. Zill: Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, In MOBICOM (2004).
- 2) B. Awerbuch, D. Holmer and H. Rubens: The Medium Time Metric: High Throughput Route Selection in Multi-rate Ad Hoc Wireless Networks, Technical Report, Johns Hopkins University (2004).
- 3) D. De. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris: A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Sensor Networks, In MOBICOM(2003) .
- 4) T. Clausen and P. Jacquet: Optimized Link State Routing Protocol, IETF RFC3626, (2003).
- 5) OLSRv2-Niigata,
<http://www2.net.ie.niigata-u.ac.jp/nOLSRv2/olsrv2/Welcome.html>