

マルチチャンネル無線メッシュ網における 予備リンクを利用した高性能通信の実現手法

金岡 弘道¹ 吉廣 卓哉²

概要: 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網の研究が活発に行われている。無線メッシュ網は、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急激であり、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、無線メッシュ網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（チャンネル）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。

Switching Forwarding Links for Multi-channel Wireless Mesh Networks

HIROMICHI KANAOKA¹ TAKUYA YOSHIHIRO²

Abstract: 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網の研究が活発に行われている。無線メッシュ網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。無線メッシュ網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

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.

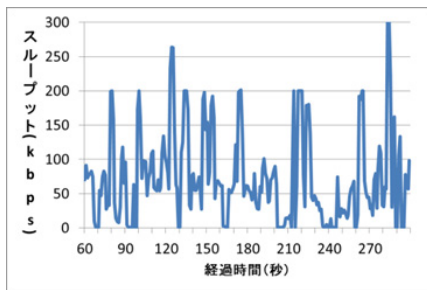


図 1 無線メッシュ網によるスループットの時間経過による変動

れている [1][2][3]. 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. しかし、リンクメトリックが適用された状態であっても、無線メッシュ網における通信はスループットの変動が非常に大きく、ユーザの目から見ると、通信は不安定であると言わざるを得ない. 一例として、IEEE 802.11 による単一チャンネルの無線メッシュネットワークをシミュレータにより構成して動的メトリックを動作させ、UDP 通信による一定速度のフローを発生させた場合のスループットの変動を図 1 に示す. 送信されるデータ量は一定であるにも関わらず、スループットは秒単位で大きく変動しており、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、その干渉の場所や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網において、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、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網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 OLSR[4] 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. 2 章では関連研究について述べ、3 章で提案手法を説明する. 4 章でシミュレーション実験の方法と結果を述べ、最後に 5 章でまとめとする.

2. 関連研究

2.1 動的メトリック

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.

最も代表的な動的メトリックは ETX (Expected Transmit Count)[1] である. ETX は IEEE 802.11 を用いて動作する各リンクに対して、パケットが隣接ノードに到達するための平均送信回数を表す. つまり、ETX の最小値は 1 であり、干渉等により第 2 層でデータフレームが損失しフレームの再送が発生すると、より高い値をとる.

既存の動的メトリックとして、ETX 以外にも多数の方式が提案されている. ETT[2] は、データの伝送速度を考慮して、データフレームが隣接ノードに到達するための平均送信時間を計算する. この他にも WCETT[2] や MIC[3] 等、多数の動的メトリック方式が提案されている.

2.2 動的メトリック ETX

ETX は代表的な動的メトリックの一つであり、現時点で最も多く実装されている手法である. 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_f 、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.

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

各端末は、隣接端末間で p_f 、 p_r を求めるために一定時間 τ 毎に隣接ノードに対して 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.

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

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 p_f と p_r が保持され、全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ない欠点がある。

2.3 マルチチャンネル無線メッシュ網

ネットワークの伝送効率を向上することを目的として、複数チャンネルを用いた無線メッシュ網に関する研究は非常に盛んに行われている。無線マルチホップネットワークにおいてはリンク間の干渉が大きな問題となるが、複数チャンネルをうまく配置することによって、干渉の影響を大幅に削減できる。

よって、マルチチャンネル無線メッシュ網を対象とした研究の多くはインタフェースのチャンネル割当を主たる研究対象としている。このチャンネル割当アルゴリズムは静的なものと同動的なものに分類できる。静的アルゴリズムは、ネットワークを動作させる前に、予め最適なチャンネル割当を計算する [6][7][8]。具体的には、ネットワークの構造をグラフによりモデル化し、リンク間の干渉ができるだけ少なくなるようにインタフェースのチャンネル割当を行う最適化問題を解く。しかし静的なチャンネル割当を行う場合には事前の計算とチャンネル設定が必要であり、手間がかかる欠点がある。また、これらの手法の中にはネットワークのトラフィックパターンに最適化したチャンネル割当を行える手法も存在するが、トラフィックパターンの変動に柔軟に対応することができない。

一方、動的なチャンネル割当を行うアプローチ [9][10][11]では、インタフェースのチャンネルを頻繁に変更することになり、そのための種々のオーバーヘッドが必要となる。また、インタフェースを流れるフローが存在する状態でのチャンネル変更は通信の安定性を低下させることにもなる。

これに対して本研究では、事前のチャンネル割当の計算や設定も、動的なチャンネル変更も必要としないマルチチャンネル無線メッシュ網を目指す。具体的には、現在入手可能なIEEE 802.11に準拠したインタフェースを複数備え、全てのインタフェースが共通のチャンネル構成を持つような、安価かつ手軽に構成できるルータを構成する。このようなルータにおいて、干渉状況に応じて柔軟に経路制御を行うことによってリンク間の干渉を最小限に抑え、コストの高いチャンネル割当のための計算を行うことなく、高いスループットと安定通信を両立する経路制御手法を提案する。

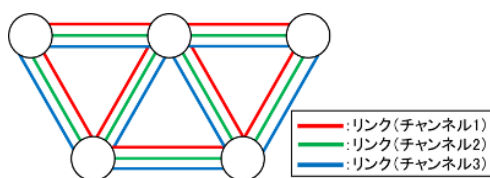


図2 マルチチャンネル化 (トポロジ全体)



図3 マルチチャンネル化 (隣接端末間)

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

無線メッシュ網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網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、各NICに割り当てるチャンネル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、無線メッシュ網のトポロジは図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。各NICは常時起動しているため、隣接端末間には常に3重のリンクが保持されている。そのため、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、動的メトリックを適用することで、それぞれのチャンネルにおいてメトリックが計算される。メトリックの値は継続的に更新されるため、常に高い通信品質のリンクを経路として選択することが可能である。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

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。ここで、メトリックは近隣のリンク間の干渉を反映することに注意したい。特に、マルチホップ通信では、隠れ端末問題が発生するとパケットの到達率とスループットが大きく減退する。動的メトリックを動作させることで、通信に利用されているリンク同士が干渉の影響を受けるとメトリックが上がるため、最短路として干渉の影響ができるだけ少ないリンクが選択されると期待される。

前述の通り、動的メトリックは比較的緩やかなリンク品質の変動に対応する。動的メトリックでは追従できない急激なリンク変動に対応するために、この後に述べる転送リンクの切替を併用する。

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。図3に3チャンネルで構築した無線メッシュ網における隣接端末間のリンクの構造を示す。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ればよい。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、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が判別できない。そこで、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。転送リンクを予備リンクに切替えてから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

本研究の評価実験にはネットワークシミュレータ Qualnet を用いた。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-Niigata[5] 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。

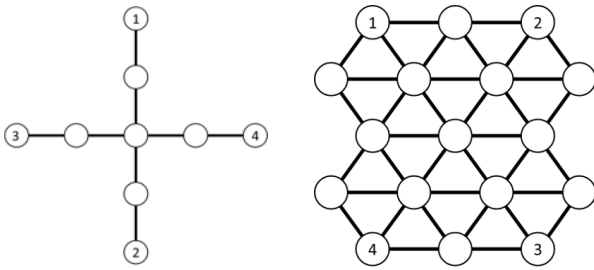


図 4 トポロジ 1 図 5 トポロジ 2

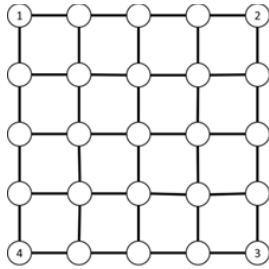


図 6 トポロジ 3

4.2 実験シナリオ

シミュレーション実験を通じて提案手法による通信性能を評価した。本研究では2種類のシミュレーション実験を行った。第一の実験は、トポロジの差異によるスループット及び通信安定性能の変動を評価した。第二の実験は、送信トラフィック量の変化に対するスループット性能の変動を評価し、これを通じてネットワークの許容スループットを評価した。

両者の共通設定として、端末に接続する NIC 数は1から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。

第一の実験には、以下の 3 種類のトポロジを用いた。それぞれに対して実験シナリオを述べる。

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トポロジ

トポロジ 1 の十字型のトポロジは、パケット転送の挙動を調べるために干渉の影響を制限した比較的単純なトポロジである。端末の配置は図 4 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

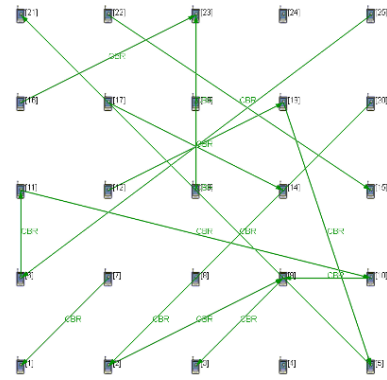


図 7 トポロジ 3 にてフローをランダムに発生させたシナリオの一例数を変動させ、性能への影響を調べた。既存手法とも比較を行う。ここで言う既存手法とは、マルチチャンネルネットワーク上で動的メトリック ETX のみを動作させ、提案するリンク切替手法を用いない方式のことである。評価指標として、スループット、及びその変動係数を用いた。スループットの変動係数は、1 秒毎にネットワークの総スループットを求め、その標準偏差を平均値で割った値である。変動係数が低いほど、スループットが安定していることを示す。

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 (図 5) は、最短路の他にも迂回路が利用可能なトポロジであり、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。但し、ホップ数の上では最短路は一つに決まるため、ある程度大きな品質悪化がなければ迂回路は利用されない。端末の配置は図 5 の通りであり、一辺 300m の正三角形によってトポロジを構築した。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を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。

トポロジ 3 の正方形で構築されたグリッド状トポロジ (図 6) 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が特徴である。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。そのような複雑な通信経路の変動下での通信性能を測定する。このトポロジ

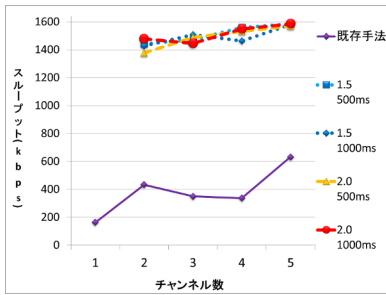


図 8 総スループットの比較 (トポロジ 1)

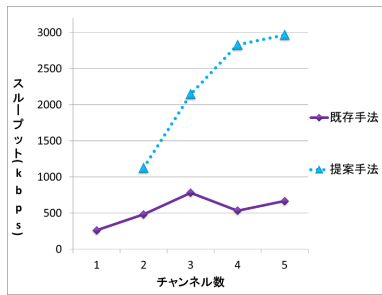


図 10 総スループットの比較 (トポロジ 2)

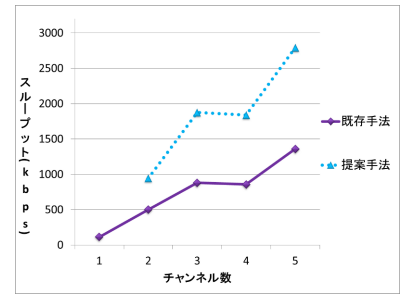


図 12 総スループットの比較 (トポロジ 3)

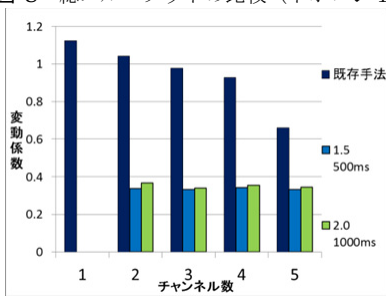


図 9 安定度の比較 (トポロジ 1)

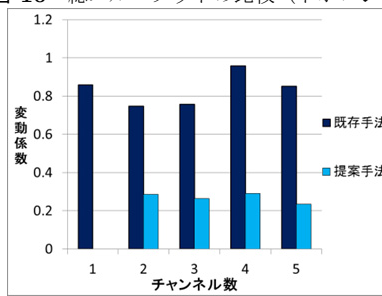


図 11 安定度の比較 (トポロジ 2)

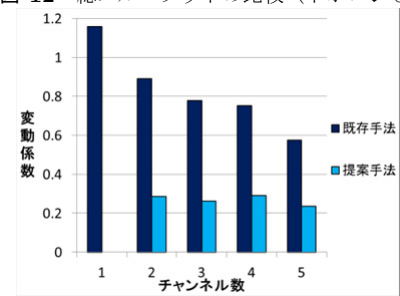


図 13 安定度の比較 (トポロジ 3)

では一辺 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。また、トポロジ 2 と同じく提案手法は、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。他のトポロジと同様に、使用するチャンネル数を 1 から 5 まで変化させ、スループットとその変動係数により比較評価をおこなった。

第 2 の実験の実施方法を述べる。第 2 の実験の目的は、送信トラフィック量に応じて、提案手法の性能がどのように変化するかを明らかにすることである。また、この実験を通じてネットワークの許容スループットを測定する。本研究では、許容スループットとは、通信負荷を上昇させた際にスループットの上昇が停止した値のことを言う。

本実験では、トポロジ 3 を用いて発生させるフローの本数と送信するフローの総量を変化させ、それぞれのスループットを計測した。それぞれのフローは宛先と送信元をランダムに設定した。そのため、送信フローは図 7 のようにフロー同士の衝突が至る所で発生する。それぞれのフローは、実験開始 1 分後から 4 分間通信を行う。フローは UDP を用いた CBR(Constant Bit Rate) を 8 本・16 本・25 本とし、それぞれで実験を行った。送信するフローの総量は、1.6Mbps から 11.2Mbps までを 1.6Mbps 刻みで変化させた。各フローの送信レートは同じ値を用いた。すなわち、フローの本数が 16 本でフローの総量が 1.6Mbps であった場合、16 本すべてが 100kbps で通信を行う。実験は各パラメータ設定に対して 10 回の反復を行い、その平均値を用いて評価した。また、再送回数の閾値と、予備リンクの継続使用時間に関しては第一の実験と同じ値、即ちそれぞ

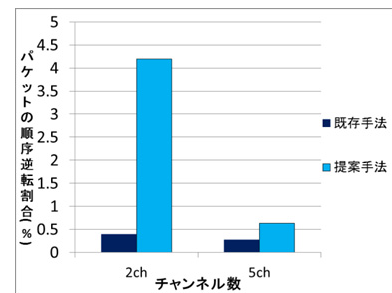


図 14 トポロジ 3 におけるパケットの到達順序逆転割合の比較。れ 1.5 と 500 ミリ秒を用いた。

4.3 実験結果 (トポロジによる影響)

第一の実験の結果から述べる。図 8 と図 9 にトポロジ 1 の実験結果を示す。図 8 からは、端末あたりの NIC 数にかかわらず、提案手法が従来手法より 3 倍程度の総スループットが高いことがわかる。図 9 は、提案手法が安定性においても大きく性能を向上していることがわかる。また、提案手法のパラメータが異なっても総スループット、安定性ともに大きく値が変わることはなく、パラメータの違いは性能に影響しないことがわかる。

図 10~13 は、それぞれトポロジ 2 と 3 の総スループットと安定性の結果である。全体的にトポロジ 1 と同様の傾向が見られ、提案手法が従来手法の性能を大きく改善していることがわかる。これらの結果では、総スループットについては、チャンネル数が上がるに従って性能が向上している。これは、トポロジや経路が複雑になることによって干渉が複雑化しているが、チャンネル数が増えることによって干渉をより減少できたことを示していると考えられる。トポロジ 3 のように等ホップ数の経路が十分に存在する場合には、ETX のみの場合 (既存手法) でもチャンネル数の

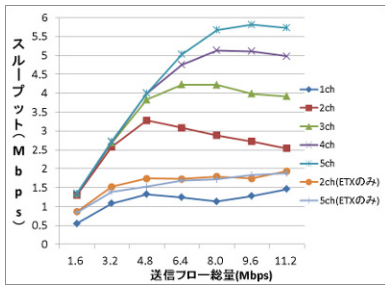


図 15 スループットの比較 (フロー 8 本)

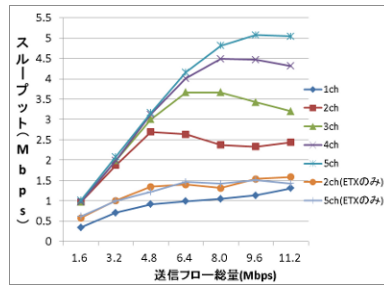


図 17 スループットの比較 (フロー 16 本)

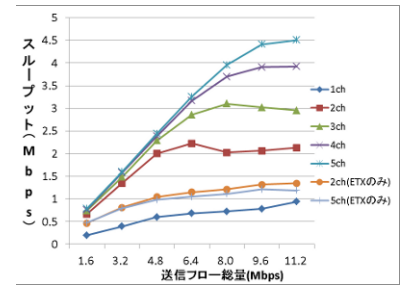


図 19 スループットの比較 (フロー 25 本)

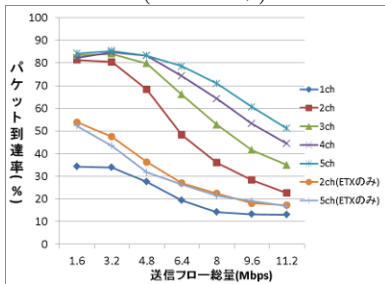


図 16 パケット到達率の比較 (フロー 8 本)

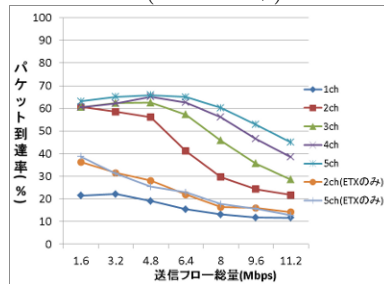


図 18 パケット到達率の比較 (フロー 16 本)

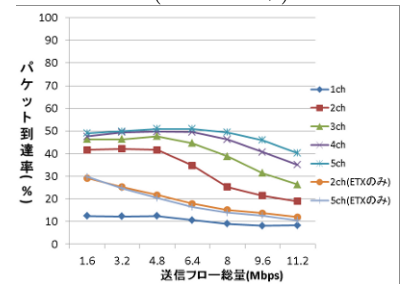


図 20 パケット到達率の比較 (フロー 25 本)

増加とともにスループットが向上している (図 12) が、提案手法では、そうでない場合にも、チャンネル数の増加に伴う通信資源を有効利用し、総スループットを向上できる能力があることを示している。

なお、本実験においては、各隣接ノードペアに対して、5チャンネルの通信資源のうち1チャンネルのみを利用して、複数チャンネルを同時に利用しないことに無駄を感じるかもしれない。しかし、全てのチャンネルを全て使って通信をした場合の総スループットは1チャンネルの値のチャンネル数倍の値であり、提案手法はこれを大きく上回っていることがわかる。これは、全てのリンクを使用する場合には、主に隠れ端末による干渉により大幅に通信性能が劣化するからであり、提案手法はこの影響を大きく低減することに成功している証拠である。

ところで、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 14 は、トポロジ 3 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、やはり既存手法を上回っており、この改善は今後の課題の一つである。

本評価によって、トポロジの差異にかかわらず、提案手法が従来手法の性能を大きく改善することが確かめられた。

4.4 実験結果 (送信負荷量とフロー数による影響)

次に、第 2 の実験の結果について述べる。本実験では、ネットワーク上の送信負荷量及びフロー本数に対する提案手法の性能の変化を評価した。

図 15～20 は、フロー本数を変動させた場合の、送信負荷量に対する総スループットとパケット到達率の推移を示している。ここでも提案手法は既存手法の性能を大きく改善している。また、提案手法では、フロー本数にかかわらず、送信負荷量が増えるにつれて、ネットワークの総スループットが向上し、やがて飽和することがわかる。このとき、パケット到達率は送信負荷量が小さいときでも 100%に近い値にはならず、送信負荷量が増えると減少していくことがわかる。

フロー本数に着目すると、これが変化してもグラフの形状には大きな差異はないが、飽和時のスループットはフロー本数が増えるに従って少しずつ減少している。この傾向と呼応して、パケット到達率もフロー本数の増加に従って減少している。これは、フロー本数が増加することによって干渉の発生箇所が増加するためである。

本実験の各フロー本数とチャンネル数に対して得られた総スループット値の最大値を許容スループットとして、図 21 にまとめた。既存手法ではチャンネル数を増加させても許容スループットが増加しないのに対し、提案手法では使用できるチャンネル数に応じた許容スループットの向上が見られる。また、フロー本数の増加に伴った許容スループットの減少も見取れる。

本実験により、提案手法が既存手法の性能を大きく向上し、ネットワーク全体では数メガバイトのスループット

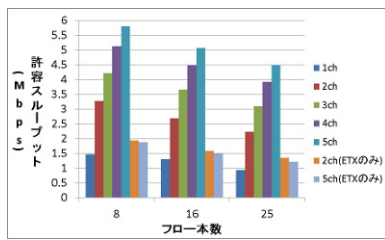


図 21 フロー本数ごとのフロー許容量の比較

性能が実現できることが示された。ここで、本実験のリンク帯域は 6Mbps に固定してことに注意してほしい。IEEE 802.11a や g では理論値ではあるが最大 54Mbps の速度があり、IEEE 802.11n ではアンテナを 4 本用いることで最大 600Mbps の速度である。提案手法は安価な機器を組み合わせて構成できるネットワークであり、シミュレーション実験によりこれだけの速度が出せることから、実用化の可能性が期待される。

4.5 実用に向けての考察

本研究では、各ノードが複数のネットワークインタフェースを持ち、全てのノードのチャンネル構成が共通である状況を想定している。このようなノードは現状では比較的安価に構成でき、手軽に高品質の無線マルチホップネットワークを構成できる方法として期待できる。

しかし、提案手法を実環境に適用する場合、シミュレーションにおいて考慮されていない様々な問題が発生する。この節では、外的なノイズの影響とノード内干渉の 2 点について考察を行う。

まず、外的なノイズの影響について述べる。実環境においては、無線メッシュ網が他の無線機器が発するノイズによって干渉を受ける場合がある。外的なノイズによる干渉は、複数のチャンネルで同時に発生する場合もあり、リンク品質に悪影響を与える要因となり得る。

しかし、本研究では動的メトリック ETX を適用しているため、干渉の影響を反映した経路選択が可能である。そのため、外的なノイズによる干渉が発生した場合であっても、干渉の影響がメトリックに反映され、別の経路が選択される。

次に、ノード内干渉について述べる。複数のインタフェースを同一ノードに接続する場合には、お互いのアンテナ同士が近距離にあれば、たとえ設定したチャンネルの周波数が異なっても干渉の原因となるため、提案手法の実装時には考慮する必要がある。

本問題に対する対応策はいくつか考えられる。一つは、ノードに接続された複数のアンテナを、物理的に離れた位置に設置することが考えられる。無線メッシュネットワークの設置・運用方法に依存するが、場合によってはケーブル等によってアンテナの位置を互いに数十センチ、あるいはそれ以上離すことが可能であろうと考えられる。また、

設定する周波数を離すことも対策になり得る。ノード内干渉はお互いの設定周波数を離すことで減少すると考えられるため、2.4GHz 帯と 5GHz 帯の両方を使い、できるだけ周波数が離れたチャンネルを設定することにより、ノード内干渉の影響を減少できると考えられる。

いずれにせよ、実機実験等により周波数や距離による干渉の大きさを考慮することが肝要であり、今後の課題としたい。

一方、本研究で明らかにしたことの本质は、リンクメトリックを用いた経路制御ではリンク品質の推移に経路が十分に追従できないということである。リンクメトリックの計算には過去一定時間の通信の監視結果（の平均値など）が用いられるのが一般的であり、そのためどうしても最新のリンク品質を反映できず、メトリック値は少し過去のリンク品質を示している。この遅れを短くすることは難しい。なぜなら、メトリック計算に用いる時間幅を短くすることは、メトリックの精度が落ちるか、または精度を上げるための負荷をかける必要があるからである。さらに、メトリック値は数秒に一回送信されるリンク情報メッセージにより広告されるため、メトリック値がネットワーク上に周知される遅延はさらに大きい。必然的に、そのメトリックから計算された経路も、最新のリンク品質を反映したものとはならない。

本研究では、緩やかに変化する動的メトリックにおいて生じる対応の遅れに対して、各ルータがリンク上の輻輳の兆候を素早く察知して転送リンクを切り替えることで、ネットワーク全体の通信性能を大幅に向上できることを示した。つまり、ネットワークの状態変化に対して、緩やかに対応するリンクメトリックと素早く対応する転送リンクの切替の組合せが、非常に効果的に働くことを示している。

このことから、これと同等の原理であれば、ネットワーク性能の向上が可能であることが推察される。例えば、IEEE 802.11n 等の最近の無線 LAN 規格では、1 チャンネルに対して複数の直交なサブキャリアが利用可能である。各サブキャリアをそれぞれリンクと見なして品質を監視し、全サブキャリアのうち最も品質の良いものの品質をリンクメトリックとしてネットワークに広告して、最短経路を計算する。同時に、各サブキャリアにおいてフレームの再送を監視し、これに基づいて提案手法と同様にフレームを転送するサブキャリアの切替を行う。この方法は現在のパソコンの通信アーキテクチャを考えると実装には少し手間がかかるが、原理は提案手法と同等であり、単一のインタフェースを用いて効率的なマルチホップ通信を実現する方法として有力である。さらにこの方法では、各サブキャリアに対して送信キューを持つわけではないため、パケット到着順の変動が発生しにくい特徴もある。

今後はこれらの実現方法について検討を行い、実用化に向けて研究を進めていきたい。

5. おわりに

本研究は、無線メッシュ網をマルチチャ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、動的メトリックを動作させたマルチチャネル無線メッシュ網にて、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。シミュレーション実験を通じて、提案手法は従来手法に対して数倍以上の大幅な性能の向上を実現することを確認できた。

本研究で示したことの本質は、従来の動的メトリックはマルチチャネル無線メッシュネットワークの性能をあまり最適化できていないということである。これは、リンク品質を数値化するための監視時間、及びメトリックをネットワークに伝播するための遅延により、経路計算時のメトリック値は実際のリンク品質に対して大きな遅延を含んでいるためである。本研究では、この遅延に対して、ノード内でIEEE 802.11のフレーム再送回数を観測して瞬発的にリンクを切り替えることで、対策可能であることを示した。つまり、リンク品質の大きな変動に対しては動的メトリックにより対応し、動的メトリックでは対応しきれない急激な品質変動に対しては提案手法（局所的なリンク切替）により対応することで、効果的な役割分担が可能であるということを示した。

今後は本方式の実用化に向けて、ノード内干渉への対策やサブキャリアを用いた1インタフェース構成についての検討を進めていきたい。

参考文献

- [1] D. De. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris: A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Sensor Networks, In MOBICOM(2003) .
- [2] Draves, R., Padhye, J. and Zill, B., Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, Proceedings of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MOBICOM2004), pp.114—128 (2004).
- [3] Yang, Y., Wang, J. and Kravets, R., Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks, In Technical Report UIUCDCS-R-2005-2526, Department of Computer Science, University of Illinois (2005).
- [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> (参照 2012,06,29)
- [6] A. Raniwala, and T. Chiueh, "Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-based Multi-channel Wireless Mesh Network," in Infocom2005, 2005.
- [7] M. Alicherry, R. Bhatia, and L. Li, "Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-Radio Wireless Mesh Networks," in MobiMom, 2005.
- [8] M. Kodialam and T. Nandagopal, "Characterizing the Capacity Region in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks," in MobiCom, 2005.
- [9] J. So and N. Vaidya, "Multi-channel mac for Ad Hoc Networks," Handling Multi-channel Hidden Terminals Using a Single Transceiver," in MobiHoc, 2004.
- [10] P. Bahl, R. Chandra, and J. Dunagan, "Ssch: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-hoc Wireless Networks," in Mobicom, 2004.
- [11] W.H. Tam and Y.C. Tseng, "Joint Multi-channel Link Layer and Multipath Routing Design for Wireless Mesh Networks," in Infocom, 2007.