

多チャンネル無線メッシュ網における リンク間干渉を最小化する経路制御法

西前太揮^{†1} 青木謙尚^{†2} 吉廣卓哉^{†3}

近年,有線ネットワークに比べ低コストで広範囲のネットワーク接続性を提供できる無線メッシュ網が注目されている. IEEE802.11 に用いる無線メッシュ網においては,隠れ端末問題による電波の衝突が発生することで通信性能が大幅に低下する問題がある.複数の周波数チャンネルを用いることで隠れ端末問題による電波干渉を低減する研究も数多くあるが, IEEE802.11 が 2.4GHz 帯において利用できる独立したチャンネル数は 3 であり, 3 チャンネル程度の少ないチャンネル数で十分に電波の衝突を低減できる仕組みは実現されていない. 本研究では, 多チャンネル無線メッシュ網において, 電波が衝突するチャンネルの利用を避けながら迂回を許す経路制御により, 従来よりも電波の衝突を低減する経路制御手法を実現する. 本手法では, 電波衝突の可能性のあるリンクを経路として利用することを制限すること, 及び, CSMA/CA に基づいた電波衝突モデルを導入した最適化問題を用いることによって, 衝突の低減を実現する.

A Routing Scheme That Minimizes Collision in Multi-channel Wireless Mesh Networks

Taiki Nishimae^{†1} Kensho Aoki^{†2} Takuya Yoshihiro^{†3}

1. はじめに

無線メッシュ網は, 固定基地局間で無線通信により通信を行うことによって構成されたネットワークであり, 広い範囲に安価でネットワーク技術を提供できる技術として注目されている. 無線メッシュ網では, 限られた周波数領域の中でネットワーク内のすべての基地局間通信を実現する必要があるため, 通信性能を向上するためには, 基地局間の干渉をいかに減少させるかが大きな課題となっている.

近年, MAC プロトコルとして TDMA(Time Division Multiple Access)を用いて無線メッシュ網を構成する研究が盛んに行われている. TDMA では, 単一周波数を時分割し, パケット 1 つ分程度に細分化してスロットを構成する. 各ノードやリンクに対して, データフレームを送信できるスロットを割り当てることで, フレームが衝突しない効率的な通信を実現する. 無線メッシュ網では, 同じスロットでも距離が離れたリンクではフレーム衝突が生じない. これを利用した通信モデルとして, STDMA(Spatial TDMA)と呼ばれるモデルが用いられる[1]. STDMA を前提としたスケジューリング(ノードやリンクへのスロット割り当て)法が数多く提案されている[2]. しかし, STDMA ではすべての基地局間で正確な時刻同期が必要であり, ネットワーク外の通信による電波干渉には対応できないという問題が

ある.

一方, データリンク層プロトコルに現時点で広く普及している IEEE802.11 を用いた無線メッシュ網の研究も進められている[3]. IEEE802.11 は, MAC 層モデルとして CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)を用いるため, トラフィックパターンや周囲の電波状況に応じて柔軟に対応できるだけでなく, 安価なデバイスが広く普及しているため, 安価で手軽に利用できる利点がある. IEEE802.11 を用いて手軽に信頼性のある無線メッシュ網が実現できれば, 一般ユーザも利用できる安価, 手軽で信頼性のある無線メッシュ網が実現でき, 幅広い分野への応用が期待できる. しかし, IEEE802.11 を用いた無線メッシュ網では, 隠れ端末や晒し端末問題のため, スループット性能が著しく低下する問題がある. リンクメトリックを用いて可能な限り品質の良いリンクを用いることによる性能向上も試みられているが, その効果は限定的である[4][5].

これに対して, 複数の周波数チャンネルを用いることで隠れ端末の影響を低減することも研究されている. IEEE802.11 の 2.4GHz 帯では, 独立したチャンネルは 3 つしか確保できないため, 少ない周波数チャンネルを効率的に利用することが求められる. これを実現する一つの方法として, 各ノードが単一のネットワークインタフェースを持ち, 周波数を切り替えながら隣接ノードとのフレーム送受信を行うマルチチャンネル MAC プロトコルの研究がある[6]. しかし, 隠れ端末の影響が少なからず残るうえに,

^{†1}, ^{†2} 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University
^{†3} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

貴重な周波数資源の利用効率が良くない問題がある。一方、複数のインタフェースを用いることで複数チャンネルを利用する研究もある[7][8][9][10]。竹田らは、キュー長の情報をノード間で交換することで、動的なチャンネル選択により隠れ端末の影響を低減する手法を提案したが、隠れ端末の影響を十分に低減するには至っていない[7]。文献[8][9]では、前述のリンクメトリックによる通信性能の向上の可能性に関する結果であるが、隠れ端末問題のため効果は限定的であるという結論を得ている。

異なるアプローチとして、各ノードやリンクに、静的にチャンネルを割り当てることで、電波の衝突を解消する方法も数多く提案されている。IEEE802.11 に注目した例として、Marina らは conflict graph 上の枝彩色問題を応用することで、電波の衝突を最小化するようなインタフェースへのチャンネル割り当てアルゴリズムを提案している[10]。しかし、これらの研究では、同時にフレームを送信できないリンクペアを衝突の原因とする衝突モデルに基づいて最適化問題を定式化しているため、(この衝突モデルは STDMA[2]と同じである)、少ないチャンネル数では電波の衝突を十分に低減することが難しい。

本研究では、多チャンネル無線メッシュ網において、電波が衝突するチャンネルの利用を避けながら迂回を許す経路制御により、チャンネル数が少なくても衝突を最小化する経路制御方式を提案する。具体的には、(i)対象とするネットワークのトポロジにおいて、ネットワークの接続性を保つ制約の下で、経路制御に利用できるリンクやチャンネルを「間引く」ことにより、衝突の可能性を低減する。衝突の可能性のあるリンクを間引いたトポロジ上で最短路を計算することで、衝突が少ない経路制御を実現する。また、(ii)さらに衝突を減少させるために、CSMA/CA に適した衝突モデルを導入する。従来の方式では、前述のように、同時に通信できないリンクペアを可能な限り減らす最適化を行うが、CSMA/CA では隣接ノード間の衝突を避けることができ、隠れ端末による衝突を減少することが重要である。提案手法では、この観点に基づいた衝突モデルに基づいた最適化を行うことにより、少ないチャンネル数でも、従来手法と比較して衝突を減少させる経路制御を実現する。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では提案手法を理解するために重要となる隠れ端末問題について述べる。3 章では提案手法を詳細に説明する。4 章では評価結果を示し、5 章でまとめる。

2. 無線メッシュ網における問題点

2.1 CSMA/CA

無線通信では伝送媒体として空気を共有する。そのため、互いに電波が届く範囲にある端末が同時に複数電波を送信すると、電波の衝突により正常に通信できない。これを

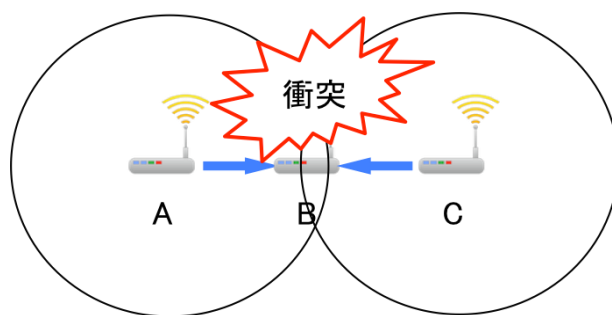


図 1：隠れ端末問題

防ぐための、無線通信における代表的な MAC 層モデルとして、IEEE802.11 にも利用されている CSMA/CA が挙げられる。CSMA/CA では、電波を送信する前に無線チャンネルの利用状況を確認する（キャリアセンス）。もし、チャンネルが利用中であれば MAC フレームを送信することなく待機し、チャンネルが未使用であった場合（アイドル状態）はランダムな時間待機した後に MAC フレームを送信する。この仕組みにより、隣接ノード間での送信フレームが衝突することを防ぎ、効率的に通信が行える。

2.2 隠れ端末問題

CSMA/CA で構成される無線メッシュ網では、前述の通り、チャンネル使用状況を検知することにより隣接のノード間のフレームの衝突を防ぐことができる。しかし、2 ホップ離れたノード間では互いの電波を検知することができず、フレームの衝突を防ぐことができない。また、互いの電波を検知できないため、高確率で衝突が発生し、通信性能を著しく低下させる。この問題は隠れ端末問題と呼ばれ、効率的な無線メッシュ網を実現するためには解決しなければならない問題である。

隠れ端末問題を、図 1 を用いて説明する。端末 A,B,C があり、図中の円はそれぞれの端末の通信可能範囲である。端末 A の通信可能範囲外にある端末 C を想定すると、端末 C から端末 B へ通信が行われている時には、端末 A は端末 C の通信状況を検知できない。このため、端末 A は端末 B に対して電波を送信してしまう。このとき、端末 B の周辺では電波の衝突が発生し、端末 B は受信した電波をデジタル信号へ正確に変換することができない。

隠れ端末問題が発生するとフレームの再送処理が行われるが、再送の度にバックオフ時間が指数的に増加する（指数バックオフ）。バックオフ時間が増加すると、端末の送信機会が減少するため、単位時間あたりに送信されるフレーム数が減少する。隠れ端末の関係にあるノードは高い確率で電波の衝突を発生させるため、隠れ端末問題はネットワーク全体のスループットを大幅に悪化させる原因であり、これを回避することは CSMA/CA の通信の効率化において非常に重要である。

3. リンク間干渉を最小化する経路制御法

3.1 想定する多チャンネル無線メッシュ網

提案手法は多チャンネル無線メッシュ網の上で動作することを想定している。このネットワークでは、複数の独立したチャンネルが利用でき、どの隣接ノード間でも、これら全てのチャンネルを用いて通信が可能である。特に、本研究では、ノードは同時に全てのチャンネルでデータを送受信できることを想定する。このようなネットワークは、例えば、ノードに複数のIEEE802.11インタフェースを備えることで実現できる。この前提は、複数のインタフェースを備える多チャンネルメッシュ網の中でも、文献[5][8]と同じネットワークモデルである。

本ネットワークの各インタフェースでは無指向性アンテナが用いられることを想定する。従って隠れ端末の関係にある2つのノードが同じチャンネルを用いてデータを送信すると、受信ノードにおいて衝突する可能性がある。提案手法は、このような多チャンネル無線メッシュ網において、データの衝突を削減する経路制御を実現する。

3.2 提案手法の概要

本研究では、多チャンネル無線メッシュ網において、電波が衝突するチャンネルの利用を避けながら迂回を許す経路制御により、従来よりも電波の衝突を削減する経路制御手法を提案する。より具体的には、多チャンネルネットワークのトポロジを表すグラフを考え、ここから、グラフの接続性を維持しながら、電波衝突するようなリンクペア数が最小化されるように、リンクを「間引く」。逆に言うと、経路として利用できるリンクを選抜する。例えば、図6のグラフは多チャンネル無線メッシュ網のトポロジを表すグラフであり、リンクがチャンネル毎に用意されている。このグラフにおいてリンクを選抜した結果が図8となる。リンク選抜により、電波衝突の可能性をできるだけ排除したネットワークトポロジを得ることができ、この上で最短路問題を解くことにより、任意の2ノード間の通信経路を計算できる。本研究では、このようなリンク選抜問題を最適化問題として定式化し、これを解くことで、衝突を抑えた経路制御を実現する。

なお、上記の仕組みを実際のネットワークに適用する方法は2通り考えられる。一つは、文献[10]のような静的なチャンネル割当てと同様に、上記の最適化計算の結果を用いてネットワークの設計・構築を行う方法である。もう一つは、リンク状態型経路制御プロトコルに組み込む方法である。この種の経路制御プロトコルは、ネットワークのトポロジを把握してから、その上で最短路計算を行うことで通信経路を計算するが、最短路計算の前に上記のリンク選抜を行うことで、衝突を低減した通信経路を計算できる。

3.3 CSMA/CA を考慮した電波衝突モデル

本研究では、ネットワークトポロジを表すグラフ上で、電波衝突の関係にあるリンクペアを定義し、そのようなリンクペア数が最小になるようにリンク選抜を行う。既存研究で用いられる電波衝突モデルは複数あるが、トポロジを表すグラフに基づいたモデルとしては、ほとんどの場合にグラフモデルが用いられ、conflict graphにより表現される[11]。このモデルでは、同時に通信を行うことができないリンクペアを、競合するリンクペアと定義し、この関係を、リンクを頂点とし、競合するリンク同士を枝で結んだ無向グラフとして表現する。しかし、CSMA/CAを前提とする場合には、ネットワーク上の隣接ノードの間では電波衝突を回避できるため、隠れ端末の関係にあるリンクペアのみを考慮すれば良い。そこで本研究では、CSMA/CAを考慮した電波衝突モデルを新たに提案し、これに基づいて最適化問題を定式化する。

諸定義より始める。本研究では、無線メッシュ網を有向グラフ $G = (V, E, C)$ と表す。ここで、 V はノード集合、 E はリンク集合、 C はチャンネル集合である。ノード $u \in V$ からノード $v \in V$ までのチャンネル $c \in C$ 上のリンクを $e = (u, v, c)$ と定義する。

次に、隠れ端末の関係を定義する。ネットワーク G 上で、2本のリンク $e_1 = (u_1, v_1, c_1)$ と $e_2 = (u_2, v_2, c_2)$ に対して、 e_1 と e_2 が次の3つの条件を全て満たすとき、 e_1 が e_2 を妨害すると呼び、 $e_1 \rightarrow e_2$ と書く。

1. $c_1 = c_2$ である。
2. u_1 と u_2 が隣接していない。すなわち、 $(u_1, u_2, c_1) \notin E$ である。
3. u_1 と v_2 が隣接する。すなわち、 $(u_1, v_2, c_1) \in E$ である。

本研究の最適化問題では、リンク選抜後のグラフにおいて、妨害関係にあるリンクペアの数を最小化する。このために、そのようなリンクペアの数を妨害度として定義する。リンク $e = (u, v, c)$ のリンク集合 E における妨害度 $f_E(e)$ を、 e が妨害する E 内のリンクの数と定義する。すなわち、 $f_E(e) = |\{e' | e' \in E, e \rightarrow e'\}|$ である。なお、 $|S|$ は集合 S の要素数を表す。

例を用いて妨害度を説明する。図2に e_2 が e_1 を妨害する例を示す。このような位置関係にあるとき、 u_2 は u_1 から見て、隠れ端末の関係にある。このとき、定義においては、 e_1 は e_2 に対して上記3つの条件をすべて満たすので e_2 を妨害することになる。図3に、妨害度の例を示す。 e_1 は e_2, e_3, e_4 に対して上記3つの条件をすべて満たすのでこれら3本のリンクを妨害するといえる。よって e_1 の妨害度は3である。

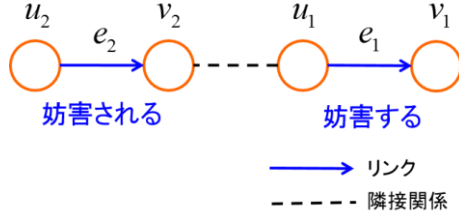


図 2：リンクの妨害関係

表 4：リンク選抜問題を解く貪欲アルゴリズム

Algorithm greedyExtraction

input: $G=(V,E)$

output: $G'=(V,E')$

```

1   $Q \leftarrow E$ 
2   $E' \leftarrow E$ 
3  while
4    calculateDisturbance( $G'$ )
5    if  $Q \neq \Phi$  then exit
6     $e \leftarrow Q$  から最も妨害度が大きいリンクを取り出す
7    if  $G' = (V, E' - e)$  が強連結
8      then  $E' \leftarrow E' - e$ 
9    end if
10   end while

```

3.4 最適化問題の定式化

妨害度を最小化するリンク選抜問題を、最適化問題として定式化する。問題の入力として、元のネットワークトポロジであるグラフ G を与え、リンク選抜後のグラフ G' が出力となる。出力 G' は連結でなければならないが、 G' は有向グラフであるので、対応する概念として、 G' が強連結である制約を課す。グラフ $G = (V, E, C)$ が強連結であるとは、任意の 2 ノード $u, v \in V$ に対して、 u から v まで E 上のリンクのみを用いて到達できることである。この制約の下で、妨害度を最小化するグラフを出力する問題を考える。形式的には、以下のように表現される。

リンク選抜問題

- 入力 有向グラフ $G = (V, E, C)$
- 出力 G の部分グラフ $G' = (V, E' (\subset E), C)$
- 制約 部分グラフ G' が強連結であること
- 最適化条件 E' に含まれるリンクの妨害度の和 $\sum_{e \in E'} f_{E'}(e)$ を最小化

3.5 貪欲アルゴリズム

本節では、リンク選抜問題を解くアルゴリズムを与える。現在のところ、上記のリンク選抜問題の計算複雑度は明らかになっていないが、著者らは NP 困難であると予想して

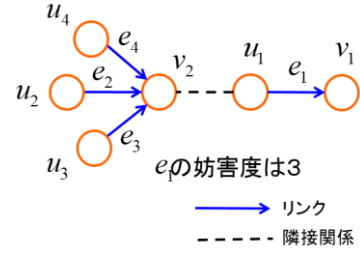


図 3：妨害度の一例

表 5：妨害度を計算するアルゴリズム

Procedure calculateDisturbance

input: $G'=(V,E')$

output: 各リンク $e \in E'$ の妨害度

```

1  foreach  $e1(=(u1,v1,c1))$ 
2    foreach  $e2(=(u2,v2,c2))$ 
3      if  $c1=c2$  and
         $(u1,u2,c1) \notin E'$  and
         $(u1,v2,c1) \in E'$ 
4        then  $e1$  の妨害度を 1 加算
5      end if
6    end foreach
7  end foreach

```

いる。このため、本研究では、近似解を与えるアルゴリズムを提案する。

アルゴリズムは貪欲法に基づいて設計した。提案手法は電波の衝突を可能な限り削減するため、妨害度の大きなリンクから順番に間引く。これは、前述の通り、無線通信において隠れ端末による電波の衝突が通信性能を大幅に劣化させる要因となるためであり、妨害度が大きい、つまり、影響力があるリンクから順に間引く貪欲な戦略には妥当性があると考えられる。この操作を繰り返すことでグラフ全体の妨害度を低下させ、出力されるグラフはできる限り電波の衝突を発生させないものとなる。

提案アルゴリズムは、入力グラフの中で最も妨害度が高いリンクを一本選び、強連結性が保たれる限りにおいてリンクを除去する操作を繰り返し、除去できるリンクが無くなった時点で終了する。

アルゴリズムの疑似コードを表 4 に示す。提案アルゴリズム greedyExtraction は、まず優先度つきキュー Q に全てのリンクを入れ、妨害度の大きい順にひとつずつ取り出す操作を繰り返す。取り出されたリンクのそれぞれに対して、グラフから取り除いても強連結であるかを確認した上でグラフから取り除いている。リンク集合 E' は取り除かれていないリンク集合を表し、最終的にはこの集合が出力となるグラフを定める。1, 2 行目で初期化を行い、4 行目で全リンクに対する妨害度を計算したうえで、6 行目で妨害度が

最も大きいリンク e を Q から取り出す．7行目で強連結性を確認し， e を取り除いても強連結性が保たれるならば8行目で e を除去する．全てのリンクを検査し， Q が空集合になると終了する．

妨害度を計算するプロシージャ `calculateDisturbance` の疑似コードを表5に示す．`calculateDisturbance` は1, 2行目で全てのリンクの組 (e_1, e_2) に対してループさせた上で，3行目で e_1 が e_2 を妨害するかどうかを判定し，妨害する場合には4行目で妨害度を1ずつ加算する．

3.6 貪欲アルゴリズムの計算量

計算量を見積もる．プロシージャ `calculateDisturbance` は全てのリンクの組に対して処理を行なっているが， u_1 と v_2 は隣接している必要があるので，実質的に $O(|E|)$ である．アルゴリズム `greedyExtraction` 内では，ネットワーク上の各リンクが一度ずつ Q から取り出される．取り出されたリンクのそれぞれに対して，プロシージャ `calculateDisturbance` の呼び出しと，強連結性の判定が行われる．強連結性は $O(|V|)$ で確認できる．上記より，提案アルゴリズムの計算量は $O(|E|^2)$ となる．但し，`calculateDisturbance` は差分計算が可能であり，手続きをうまく修正することにより， $O(1)$ に計算量を削減することが可能である．この場合では，提案アルゴリズム全体の計算量は $O(|E||V|)$ となる．

4. 評価

4.1 評価方法

対象とする無線メッシュ網のトポロジを表すグラフを入力として提案アルゴリズムに与え，妨害度をどの程度低減できるかを評価する．提案アルゴリズムはプログラミング言語 C++を用いて実装した．与えたネットワークの例を図6に示す．このグラフが示すネットワークは，25個の端末が 5×5 の正形状に配置され，各端末が持つインタフェースの数は2である．評価にするにあたり，各端末が持っているインタフェース数を1から10まで増加させる．

4.2 評価指標

評価指標として，提案アルゴリズムにより出力されたグラフにおける，全リンクの妨害度の総和を用いる．妨害度の総和が低いほど，ネットワーク全体で電波の衝突が少なくなり，ネットワークの通信効率が向上する．

4.3 結果

提案手法が導くグラフのインタフェース数と妨害度の関係を図7に示す．インタフェース数を1から10へ増加させた結果，グラフにおける妨害度の総和が減少することを確認できた．これはインタフェース数を増やすことで，同じチャンネルのリンクが選ばれにくくなり，リンク1本あた

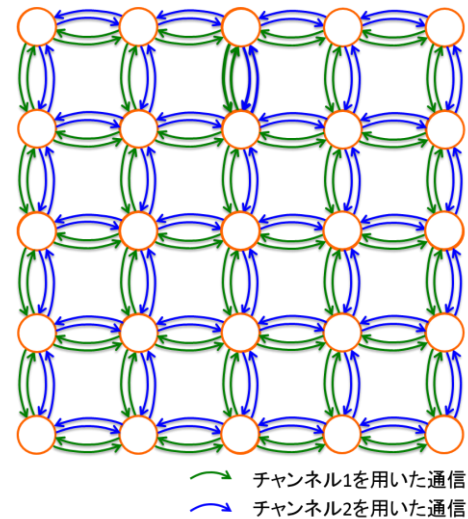


図6：2チャンネルの 5×5 グリッドネットワーク

りの妨害度が低下するからである．

提案アルゴリズムの出力グラフについて考察する．図8は，入力として図6に示すグラフを与えた場合の，提案アルゴリズムの出力である．3.4節で定式化したリンク選抜問題には，制約として出力する部分グラフが強連結であることを課しているが，図8のグラフではそれが達成されていることを確認できた．図6におけるグラフ全体の妨害度の総和は1288であり，図8におけるグラフ全体の妨害度の総和は23である．リンクを妨害度に従い貪欲に間引いた結果，グラフ全体の妨害度を低下させることは確認できた．しかし，図6の端末Aから端末Bへ通信を行う場合，本来であれば1ホップで到達することができるが，提案手法では最短でも11ホップする必要があり，経路長が大幅に増加する場合があることがわかった．この点については，改善することが望ましい．

また，図8ではグラフの中心部分のリンクが疎になっている．これは，グラフの中心部分に存在するノードは端にあるノードと比較すると隣接するノード数が多いため，中心部分に存在するリンクの妨害度が高くなる傾向にあり，貪欲に間引かれるリンクの候補になりやすいからである．

以上の結果により，提案アルゴリズムがグラフ全体の妨害度を低下させることを確認できた．グラフ全体の妨害度を低下させることは，リンク間干渉を抑制する効果があるため，無線メッシュ網のスループットを上昇させる効果が期待できる．

4.4 考察

評価の結果，提案手法により，妨害度を低減できることが明らかになった．一方で，貪欲アルゴリズムでは，妨害度をゼロにするためには，10チャンネル必要であった．無線メッシュ網において，隠れ端末問題は非常に大きな影響力を持つため，妨害度はゼロにすることが望ましい．貪欲法よりも優れた最適化アルゴリズムを設計・評価すること

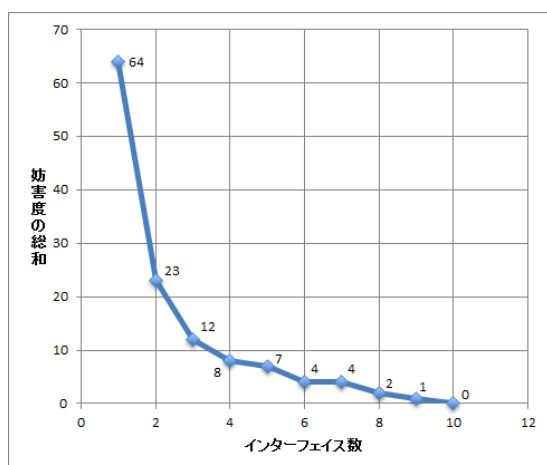


図 7：出力グラフにおける妨害度の総和

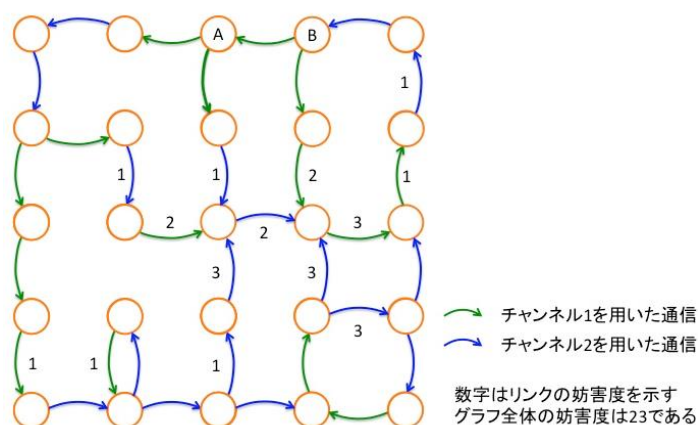


図 82 チャンネルのグリッドネットワークに対して
提案手法を適応した結果

で、妨害度をゼロにするために必要なチャンネル数を明らかにすることが、重要な今後の課題の一つである。

また、提案手法では、通信経路が最短路に比べて大幅に長くなる可能性があるという問題が明らかになった。通信経路が長くなることで、余分な通信資源を消費することになるため、ネットワーク全体の利用効率は低くなる。そこで、通信経路の増加に制約を設け、通信経路の増分を一定以内に抑える問題を定式化することも、今後の課題の一つである。また、一般的なネットワークにおいて、3～4程度のチャンネル数で妨害度をゼロにするためには、どの程度の経路長の冗長性が必要であるかについても、今後の研究対象として興味深い。

5. まとめ

本研究では、多チャンネル無線メッシュ網において、少ないチャンネル数でも電波の衝突を最小限に抑えることを目的として、電波が衝突するチャンネルの利用を避けながら迂回を許す経路制御法を提案した。また、電波衝突を最小化する問題を定式化し、これを近似的に解く貪欲アルゴリズムを提案した。評価の結果、提案手法では、衝突を著しく低減できたが、3～4程度のチャンネル数では、衝突をゼロにすることはできなかった。また、経路長が著しく増加する問題があることも明らかとなった。

今後の課題としては、経路長の増分に制約を設けるような問題の定式化を行い、これに対する解を与えるアルゴリズムを提案することで、提案手法が少ないチャンネル数でも通信性能を向上できることを示したい。また、提案手法をシミュレータ等で評価することにより、実際の通信性能がどの程度向上するかを評価することも重要である。

参考文献

- 1) R. Nelson and L. Kleinrock, "Spatial TDMA: A Collision Free Multi-hop Channel Access Protocol," Communications, IEEE Transactions, vol.33, No.9, pp.934-944, 1985.
- 2) A. D. Gore and A. Karandikar, "Link Scheduling Algorithms for Wireless Mesh Networks," IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol.13, No.2, 2011.
- 3) I. F. Akyildiz and X. Wang, "Wireless Mesh Networks," John Wiley & Sons, Ltd, Publication, 2009.
- 4) D. De. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Sensor Networks," In MOBICOM (2003).
- 5) Draves, R., Padhye, J. and Zill, B., "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM2004)," pp.114-128, 2004.
- 6) J. Mo, H.S So, and J. Walrand, "Comparison of Multichannel MAC Protocols," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.7 Issue.1, 2008.
- 7) 竹田 隼基, 吉廣 卓哉, "無線メッシュ網における協調的なチャンネル選択と送信タイミング制御による通信の高速化," 第 21 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2013), 2013.
- 8) H. Kanaoka and T. Yoshihiro, "Combining Local Channel Selection with Routing Metrics in Multi-channel Wireless Mesh Networks," The seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2014), 2014.
- 9) R.K. Sheshadri and D. Koutsonikolas, "Comparison of Routing Metrics in 802.11n Wireless Mesh Networks," The 32nd IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'13), 2013.
- 10) M.K. Marina, S.R. Das, A.P. Subramanian, "A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks," Computer Networks, Vol.54, pp.241-256, 2010.
- 11) K.Jain, J.Padhye, V.Padmanabhan, L.Qiu, "Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance," Wireless Networks, Volume 11, Issue 4, pp 471-487, 2005.