

スマートアンテナと全二重無線通信を相補的に用いる無線ネットワークアーキテクチャ

研究代表者 萬代雅希 上智大学 准教授

1 はじめに

近年、メッシュネットワークやセンサネットワーク等の無線マルチホップネットワークが実用レベルに達しつつある。これまでに無線マルチホップネットワークのエンド間スループットの向上を目指した研究は様々な角度から取り組まれている。そのうちの一つは、スマートアンテナの利用である。スマートアンテナは、アンテナの指向性を適応的にソフトウェア的に制御することで、特定の方向に高いアンテナ指向性を持たせることや、特定の方向以外からの干渉を除去することが可能になる。これまでに無線マルチホップネットワークにおいて、指向性アンテナを用いたメディアアクセス制御 (MAC) プロトコルが多数考案されている [1]-[10]。指向性 MAC プロトコルの利点は、多数の通信ペアが限られた空間で通信可能になる空間利用効率の向上である。

一方で、全二重無線通信が注目されている [11]-[12]。全二重無線通信とは同一周波数で送受信を同時に行う技術である。送受信を同時に行えることでスループットの向上が期待できる。しかし、マルチホップネットワークに全二重無線通信を単に適用するだけでは、スループットは向上しない。これは、無指向性アンテナを用いるために空間利用効率が制限されるためである。

本研究では、全二重無線通信のマルチホップネットワークのスループット性能を向上させるために、全二重無線通信とスマートアンテナを相補的に用いる無線ネットワークアーキテクチャを提案する。提案する指向性全二重無線通信は、マルチホップネットワークにおいて、全二重無線通信の性能が劣化する問題に対し、指向性アンテナの空間利用効率向上の利点を相補的に組み合わせることで、スループットの向上を図る。具体的には、まず、マルチホップ時のスループットの向上のために指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを提案する。特定の方向のみ大きなアンテナゲインをもつ指向性アンテナを用いることで、通信相手以外への干渉を減らすことができる。このノードアーキテクチャの特徴は単一トラフィックフローの場合、送信元ノードと宛先ノード間のホップ数が増加してもスループットの減少が小さい点である。しかし、複数のトラフィックフローがあるマルチホップネットワークでは、このノードアーキテクチャを用いた場合、隠れ端末問題が発生する可能性があり、スループット性能が劣化することが予想される。そこで、指向性全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。提案方式では、トラフィックフローが交わらないように迂回させて経路を構築することで隠れ端末問題を低減し、スループットの向上を図る。性能評価では提案方式をネットワークシミュレータ上に実装し、マルチホップネットワークにおいて、スループットが向上することを確認する。

本報告書の構成は以下の通りである。2 では関連研究として、全二重無線通信、全二重無線通信のための MAC プロトコル、スマートアンテナを用いた各種プロトコルを示す。3 では指向性全二重無線通信のシステムモデルを示す。4 では、提案する指向性全二重無線通信のための MAC プロトコルを示す。5 では、提案する指向性全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを示す。6 ではネットワークシミュレータ等により、提案プロトコルを評価し考察する。最後に7 でむすびとする。

2 関連研究

2-1 全二重無線通信

全二重無線通信は、単一チャンネルで送信と受信を同時に行う技術である。[11]では、2本の送信アンテナ (TX) と1本の受信アンテナ (RX) で全二重無線通信を実現している。これは、2本の送信アンテナから放射された同じ電波がちょうどキャンセルされるような位置に RX を配置することで全二重無線通信を実現するものである。しかし、この手法は WiFi のような広帯域信号をサポートできないという課題がある。[12]では、アナログ領域とデジタル領域の自己干渉のキャンセレーション技術を組み合わせることで、全二重無線通信を実現する手法である。この手法は、1本の受信アンテナと1本と送信アンテナとバランを用いる。

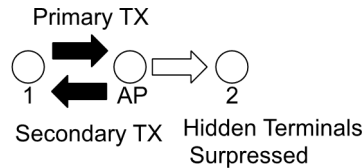


図1 全二重無線通信のためのMACプロトコルの動作例

アナログキャンセレーション部では、送信信号をバランを用いて分離し、反転させ、ゲインと位相を制御した後で、受信信号に足し合わせることで自己干渉をキャンセルする。アナログキャンセレーション部で40MHzの帯域幅で45dBの自己干渉の低減が可能である。さらに、デジタルキャンセレーション部を合わせて、システム全体で10MHzのOFDM信号で73dBの自己干渉を低減できることが示されている。

2-2 全二重無線通信のためのMACプロトコル

[12]では、全二重無線通信のためのMACプロトコルも示されている。このMACプロトコルは、アクセスポイント（AP）が存在するシングルホップネットワークにおいて、隠れ端末問題を低減するものである。図1にこのMACプロトコルの動作例を示す。ノード1が最初にAPにデータ送信を開始し、ノード2はノード1から隠れ端末の位置にあるものとする。ノード1からのデータを受信開始したAPはノード1宛てのデータをすぐさま送信する。このAPからのデータ送信はノード2に到達するため、ノード2からの送信が抑制されることで、隠れ端末問題は回避される。また、この他にも[13][14]等で全二重無線通信のためのMACプロトコルが報告されているが、いずれも無指向性通信を扱うものである。

2-3 スマートアンテナのための各種プロトコル

スマートアンテナは、アンテナの指向性を適応的にソフトウェア的に制御することで、特定の方向に高いアンテナ指向性を持たせることや、特定の方向以外からの干渉を除去することが可能になる。スマートアンテナは大きく分けて二つの種類に分類される。一つはスイッチドビームアンテナで、もう一つはアダプティブアレイアンテナである。スイッチドビームアンテナは、複数の指向性アンテナを並べて構成するアンテナで、所望の方向のための一つのアンテナ素子に給電することでアンテナ指向性を実現する。[5]では、すべてのデータを指向性アンテナで送受信するMACプロトコルが考案されている。

3 指向性全二重無線通信のシステムモデル

本研究ではまず全二重無線通信と指向性送信を相補的に用いるノードアーキテクチャを考案する。各ノードは、1本の受信用無指向性アンテナ（RX）と N_{ant} 本の送信用指向性アンテナ（TX1およびTX2）を持つ。 N_{ant} が2の時、各送信用指向性アンテナのビーム幅は π となる。したがって、送信アンテナTX1は0から π の角度への送信、送信アンテナTX2は π から 2π の角度への送信に使われる。また、TX1とTX2を同時に使うことはできない。したがって、各ノードは以下の二つのモードのいずれかで動作する。

- Mode 1: TX1で指向性送信しながら、RXで無指向性受信
- Mode 2: TX2で指向性送信しながら、RXで無指向性受信

4 指向性全二重無線通信のための提案MACプロトコル

本研究では、マルチホップネットワークにおけるエンド間スループット性能を向上するために指向性全二重無線通信のためのMACプロトコルを提案する。

4-1 提案MACプロトコル

提案MACプロトコルはRTS/CTSなしのCSMA/CAを基にして、以下の2点を修正したプロトコルである。

- (1) データ送信の条件を変更
- (2) 受信確認（ACK）フレームの削除

一つ目の修正点は指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためにデータ送信の条件を変更することである。CSMA/CAは半二重無線通信のためのプロトコルである。そのため、ノードはキャリアを検出したときにデータ送信を禁止されるため、全二重無線通信を行うことができない。そこで、指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのMACプロトコルは、受信しているデータの宛先MACアドレスが自分宛だった場合、送

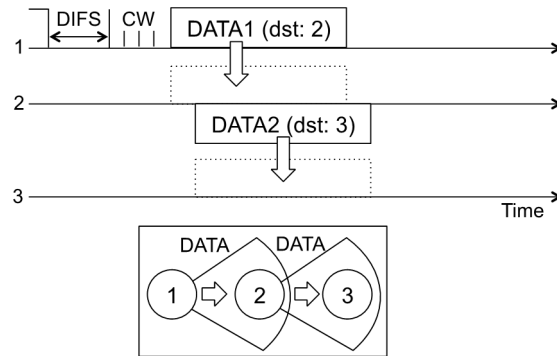


図2 提案する指向性全二重無線通信のための MAC プロトコルの動作例

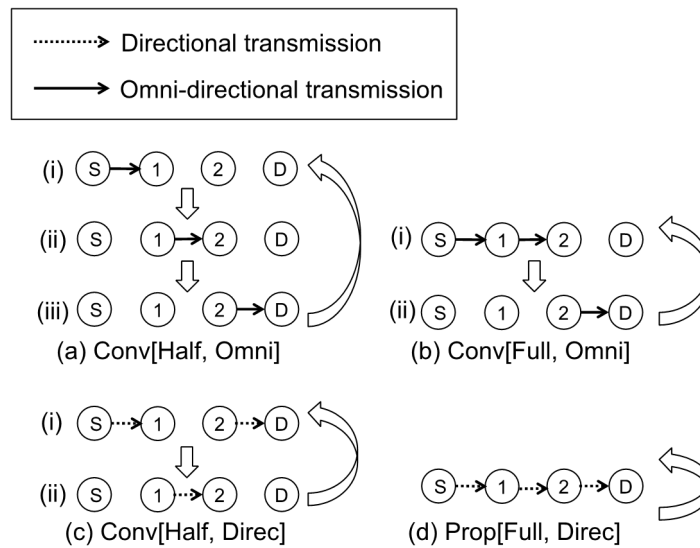


図3 各種 MAC プロトコルのマルチホップネットワークでの動作例

信を許可する。図2に指向性アンテナを用いた全二重無線通信のための MAC プロトコルの動作例を示す。図2は3ノードのライントポロジを仮定している。ノード1からノード3は電波が届かないとする。ノード1はDIFS時間とコンテンションウィンドウ時間待ち、ノード2にデータ送信を開始する。ノード2はフレームを受信し始めた時、受信しているデータの宛先MACアドレスがノード2自身である場合、ノード2はノード3にデータ送信をすることを許可する。

二つ目の修正点は、ACKフレームを取り除くことである。図2の場合、ノード2がデータを受信し終わった後にノード3がACKフレームを送った場合、ACKフレームはノード1からのデータとノード2で衝突が発生するため、ACKフレームを取り除く。

本研究では双方向通信が行われるマルチホップネットワークにおいて、フレームの衝突を減らすためにCSMA/CAと同様にコンテンションウィンドウを使用する。

4-2 提案 MAC プロトコルの性能改善効果の考察

提案 MAC プロトコルのマルチホップネットワークにおける性能改善効果について考察する。図3に各種 MAC プロトコルの3ホップのネットワークでの動作例を示す。この図では、隣接するノード間でのみ送信およびキャリアセンスが可能であると仮定する。例えば、ノードSとノード2は直接通信不可能であり、またノードSが放射した電波はノード2でのキャリアセンスで検出できない。ここでは、以下の四つの手法について考察する。

- (1) モデル Conv[Half, Omni]: 半二重無線通信+無指向性アンテナ (従来手法)
- (2) モデル Conv[Full, Omni]: 全二重無線通信+無指向性アンテナ (従来手法)
- (3) モデル Conv[Half, Direc]: 半二重無線通信+指向性アンテナ (従来手法)
- (4) モデル Prop[Full, Direc]: 全二重無線通信+指向性アンテナ (提案手法)

最初に、モデル Conv[Half, Omni]について考える。図 3a にモデル Conv[Half, Omni]の動作例を示す。このモデルでは、スループットを最大化するためには(i)→(ii)→(iii)を繰り返す必要がある。これは、隣接ノードへの干渉を考えると、このモデルの場合ネットワーク全体で1ノードしか送信ができないためである。例えば、(i)におけるノードS、(ii)におけるノード1、(iii)におけるノード2である。したがって、リンクの帯域をBとすると、このモデルの3ホップネットワークにおける最大のスループットはB/3に制限される。

次に、モデル Conv[Full, Omni]について考える。図 3b にモデル Conv[Full, Omni]の動作例を示す。このモデルでは、スループットを最大化するためには、(i)→(ii)を繰り返す必要がある。この場合、(i)のノード1において送信と受信を同時に行う全二重無線通信が適用される。しかし、(i)においてもノード2がノードDに送信すると、ノード1においてノードSからのデータ受信に干渉を与えるため、ノード2での全二重無線通信は禁止される。その結果、このモデルの最大スループットはB/2となる。

続いて、モデル Conv[Half, Direc]について考える。図 3c にモデル Conv[Half, Direc]の動作例を示す。このモデルでは、スループットを最大化するためには、(i)→(ii)を繰り返す必要がある。この場合、指向性送信により、(i)におけるノードSとノード2のような2ホップ離れたノードの同時送信が可能になる。しかし、ノード1は半二重無線通信により、送信と受信のどちらか一方でしか動作できないため、このモデルでの最大スループットはB/2となる。

最後に、モデル Prop[Full, Direc]について考える。図 3d にモデル Prop[Full, Direc]の動作例を示す。この提案モデルでは、ずっと(i)で動作が可能である。つまり、ノードSとノード1およびノード2が同時に送信できる。というも、例えば、ノード2の指向性送信した信号はノード1に届かないため、ノード1はその時にノード2に送信しながらノードSからの信号を受信することが可能になるためである。したがって、3ノードが同時にデータ送信できるため、この提案モデルでの最大スループットはBとなる。

上記のように、提案する指向性全二重無線通信のためのMACプロトコルはマルチホップネットワークにおいて、最大で2~3倍のスループットを達成できることが見込まれる。しかし、実際のネットワークでは、単一のトラフィックフローだけでなく、複数のトラフィックフローが存在することが予想され、その際には、隠れ端末問題の発生によりスループット改善効果が小さくなることが予想される。したがって、このような問題に対処する洗練されたルーティングプロトコルが必要になる。

5 指向性全二重無線通信のための提案ルーティングプロトコル

本論文ではマルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案する。提案方式はトラフィックフローが交わらないように、迂回させて経路を構築する手法である。提案方式では迂回して経路を構築し、隠れ端末問題を引き起こすトラフィックフローの交わりを回避することで、スループットの向上を図る。提案方式はオンデマンド型のルーティングプロトコルでAODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)に以下の三つの機能を付加したものである。

- 機能1：各ノードはフローカウンタを持つ。各ノードは、RREP(Route Reply)を受信したときフローカウンタを1増加させる。さらに、宛先ノードはRREPを送信する際にフローカウンタを1増加させる。
- 機能2：RREQ(Route Request)のヘッダにカウンタ値を書き込むカウンタフィールドを追加
- 機能3：宛先ノードはカウンタフィールドが0のRREQを待つ

フローカウンタとカウンタフィールドの初期値は0とする。提案ルーティングプロトコルの動作を以下に示す。

- (1) 送信元ノードは経路を見つけるためにRREQをネットワークへブロードキャスト
- (2) 各中継ノードは自身の持つカウンタの値をRREQのヘッダのカウンタフィールドの値に加算し、RREQを再送信
- (3) 宛先ノードはカウンタフィールドが0であるRREQを受信したら送信元ノードへユニキャストでRREPを返信する。宛先ノードはカウンタフィールドが0のRREQを受信するまでM個待つ。カウンタフィールドの値が0のRREQを受信しない場合、M番目に受信したRREQに対してRREPを送信
- (4) 宛先ノードからのRREPの送信または各中継ノードがRREPを受信したノードのカウンタの値を1増加
- (5) RREPが送信元ノードに到達したら、送信元ノードは宛先ノードにデータ送信を開始

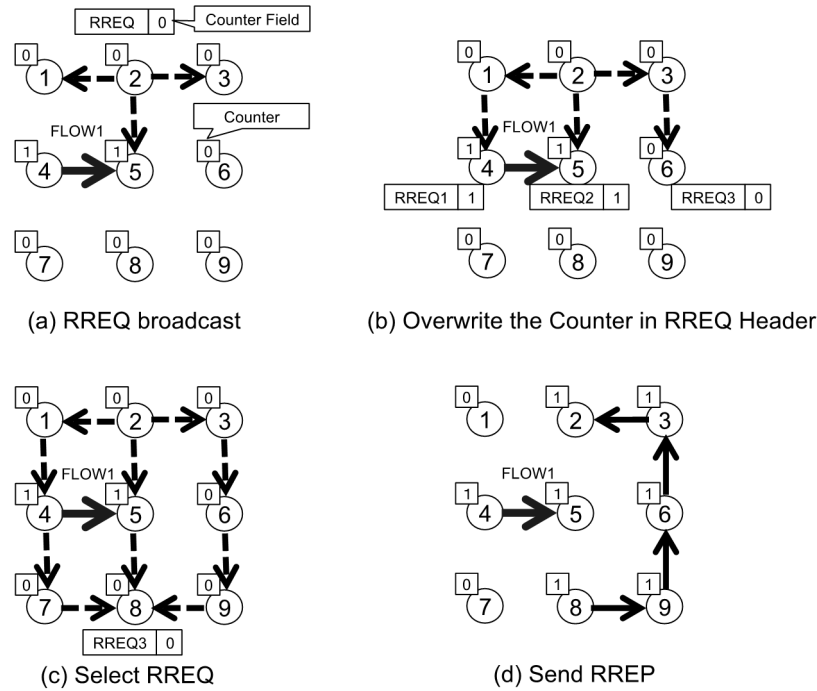


図4 提案するルーティングプロトコルの動作例

なお、通信に用いているエントリがルーティングテーブルから削除された場合に、カウンタの値を1減少させる。

提案方式の動作例を図4に示す。図4はノード4から5へのトラフィックフローがあることを仮定し、 $M=3$ の時の提案方式の動作例を示す。ノード2は8までの経路が必要になり、RREQをブロードキャストする(図4a)。各中継ノードは自身の持つカウンタの値をRREQのヘッダのカウンタフィールドの値と加算し、RREQを再ブロードキャストする(図4b)。ノード8に到着したそれぞれのRREQは以下ようになる。

- RREQ1(ノード2→1→4):カウンタフィールドは1 ($0+0+1$)
- RREQ2(ノード2→5):カウンタフィールドは1 ($0+1$)
- RREQ3(ノード2→3→6):カウンタフィールドは0 ($0+0+0$)

RREQ2, RREQ1, RREQ3の順でノード8に到着すると仮定する。ノード8はカウンタの値が1であるRREQ1, 2は破棄する。ノード8はカウンタのフィールドの値が0であるRREQ3の来た経路の逆(8→9→6→3→2)に沿って、RREPを送信する(図4c)。ノード8はRREPを送信する際に自身のカウンタの値を1上げる。RREPの受信ノードであるノード2, 3, 6, 9もまたカウンタの値を1増加させる(図4d)。ノード2がRREPを受信すると、ノード2と8の間でデータ送信を開始する。

提案方式を用いることで複数のトラフィックフローが交わらず、隠れ端末問題を低減できる。一方、提案方式を用いて迂回して経路を構築することにより、ホップ数の増加によるスループットの減少が懸念される。しかし、4で示したように本研究で提案する指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャは単一トラフィックフローの場合ホップ数が増加してもスループットの減少が小さいという特徴がある。これは指向性アンテナを用いることで通信相手以外との干渉が低減し、空間利用効率が上がり、全二重無線通信を行うことで時間効率が向上するためである。この特徴から指向性アンテナと全二重無線通信を相補的に用いるノードアーキテクチャを用いることで、ホップ数の増加によるスループットの減少の問題は改善される。

6 性能評価

6-1 提案 MAC プロトコルの性能

計算機シミュレーションを用いて提案 MAC プロトコルの性能評価を行う。評価にはネットワークシミュレータ ns-3.12.1 を用いる。

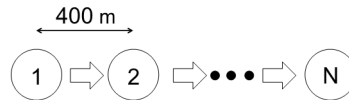


図5 シミュレーション評価で用いるNホップのライントポロジ

表1 シミュレーションパラメータ

Parameter	Value
Simulation time	100 sec
Packet size	1,500 byte
Channel rate	1 Mbps
Carrier frequency	2.4 GHz
Path loss exponent	2 (Free space)
Standard	IEEE 802.11b

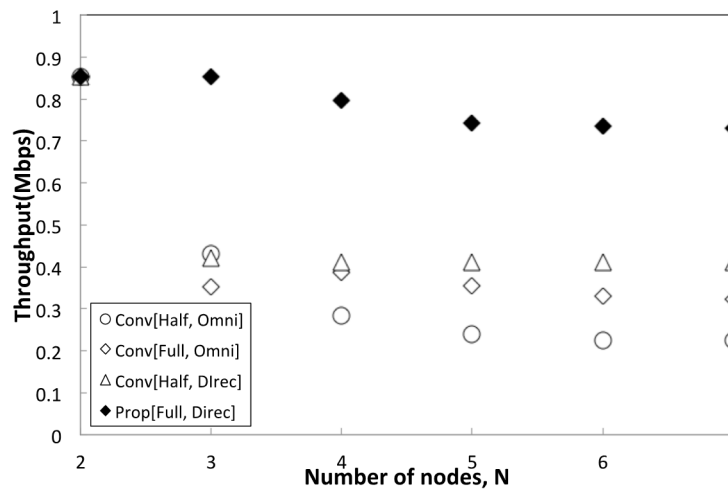


図6 ノード数Nに対するスループット

図5にシミュレーションに用いたネットワークトポロジを示す。直線上にNノードが並ぶライントポロジである。シミュレーションパラメータを表1に示す。それ以外に以下を仮定する。

- 各ノードは隣接するノードのみと通信およびキャリアセンス可能
- ノード1において1MbpsのCBRトラフィックを発生させ、宛先はノードN
- 各測定値は20回のシミュレーションの平均
- エンド間スループットを評価

ここでは、4.2で示した四つの手法を評価する。なお、モデルConv[Half, Omni]においては、MACプロトコルとしてCSMA/CA (RTS/CTSなし)を用いる。また、モデルConv[Half, Direc]においては、各ノードは無指向性アンテナを用いてキャリアセンスし、データとACは指向性で送信する。モデルConv[Full, Omni]は、基本的にはCSMA/CAを用いるが、ノードがキャリアを検出してもその宛先アドレスがそのノード自身だった場合は、データ送信を許可するものとする。またモデルProp[Full, Direc]においては、 $N_{ant}=12$ とする。

図6にNに対するエンド間スループットの結果を示す。図より、提案モデルProp[Full, Direc]がNの値に関わらず最も良いスループット性能を得られることがわかる。一方で、その他のモデルはNが大きくなるとスループット性能が劣化することがわかる。特に、N=7の時、提案モデルProp[Full, Direc]は従来モデルConv[Half, Direc]よりも81%高いスループット性能を得られることがわかった。これは、図3dに示すように、提案プロトコルでは、指向性全二重無線通信によりノード1からノードN-1のすべてのノードが同時に送信可能になるためであると考えられる。モデルConv[Half, Direc]は、図3cに示すように、半二重無線により各ノードが送受信を同時にできないため、Nが3から7の間の領域でProp[Full, Direc]の半分よりも低いスループット性能になる。また、Conv[Full, Omni]は、あるノードがデータ送信する場合、その近隣ノード

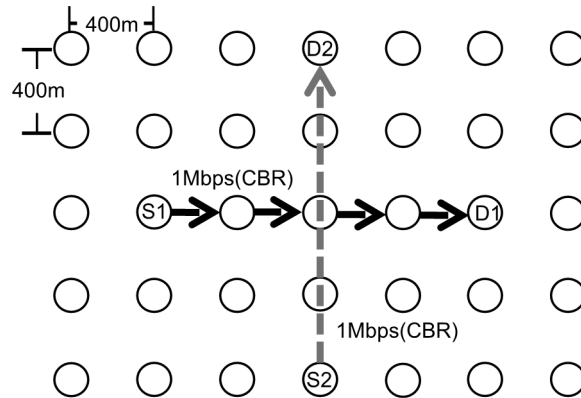


図7 シミュレーションで用いる 5×7 の格子状トポロジ

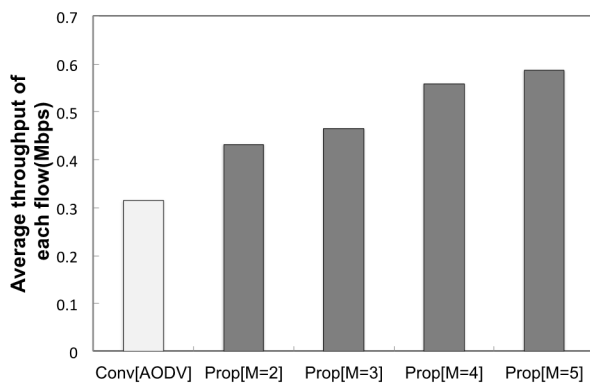


図8 各フローの平均スループット

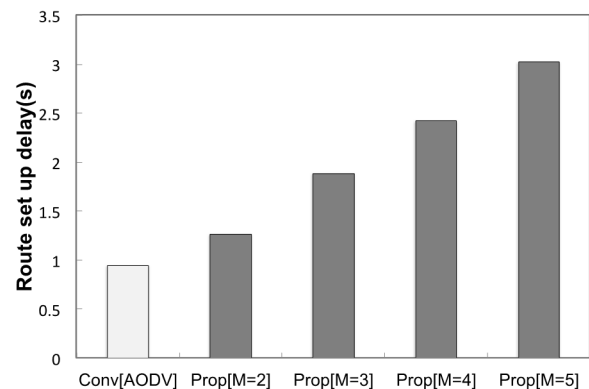


図9 経路構築遅延

ドのデータ送信は禁止されるため、やはり、Nが3から7の間の領域でProp[Full, Direc]の半分よりも低いスループット性能になる。Conv[Half, Omni]は、半二重無線により各ノードが送受信を同時にできない、かつあるノードがデータ送信する場合、その近隣ノードのデータ送信は禁止されるため、Nが5から7の間の領域でProp[Full, Direc]の1/3よりも低いスループット性能になる。

以上の結果より、提案MACプロトコルは、全二重無線通信と指向性アンテナのそれぞれの利点を相補的に活用することで、無線マルチホップネットワークのエンド間スループット性能を大幅に改善できることが分かった。

6-2 提案ルーティングプロトコルの性能

計算機シミュレーションを用いて提案ルーティングプロトコルの性能評価を行う。

図7はシミュレーションで用いる5×7の格子状トポロジを示す。各ノードは近隣ノードとは通信可能だが、対角にあるノードとは通信を行うことができない。また、ノードS1からノードD2へのトラフィックフローがあることを仮定する。ここではルーティングプロトコルを用いることによって、ノードS2がノードD2への経路をどのように作成するかを調べる。6.1での評価と同様にシミュレーションパラメータは表1に記載した通りである。また、以下のことを仮定する。

- 1Mbpsの固定ビットレート(CBR)でノードS1, S2からノードD1, D2へのパケットが発生
- 全ノードは指向性全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを使用
- 送信距離およびキャリアセンスの範囲は443m
- シミュレーションを20回行い、各トラフィックフローのエンド間の平均スループットを評価
- 指向性ビーム幅は30°
- 比較対象にはAODVを使用

提案方式は宛先ノードでRREQの受信を待つ最大数Mを2, 3, 4, 5に設定する。

図8にエンド間の平均スループットを示す。提案方式のスループットは全ての場合において、AODVのスループットを上回ることがわかる。これは、提案方式を用いることにより、トラフィックフローが交わらずに

経路が構築されたことで、隠れ端末問題が低減するからである。一方、AODVはトラフィックフローが交わるノードで隠れ端末問題が発生する。その結果、トラフィックフローが交わるノードでデータの衝突が発生し、スループットが劣化する。さらに、M=5の提案方式はAODVと比較して、86.4%のスループットが改善されることがわかる。これはMの値が増大するにつれて、カウンタフィールドの値が0のRREQを受信する確率が上がるためである。つまり、迂回して経路を構築する確率が上昇するということである。

図9に経路構築遅延を示す。経路構築遅延は送信元ノードがRREQを送信してからRREPを受信するまでの時間と定義する。M=5のとき、提案方式は他の評価モデルと比較して、最も経路構築遅延が大きいことがわかる。これは二つの理由がある。一つ目の理由は、RREQの受信を最大M個待つことによる遅延である、二つ目の理由は、RREPが迂回経路を通り転送される遅延である。一方で、AODVは最も経路選択遅延が小さい。これはAODVは宛先ノードはRREQを受信すると、すぐにRREPを送信するからである。

これらの結果から、提案方式の優れている点として、提案方式はマルチホップネットワークにおいて隠れ端末問題を軽減することができ、スループットを向上することができる。一方、提案方式は経路構築遅延が大きくなることが分かる。以上より、提案方式を用いる場合、これら二つのことを考慮し、Mの値を選択することが重要になる。

7 結論

本研究では、全二重無線通信のマルチホップネットワークのスループット性能を向上させるために、全二重無線通信とスマートアンテナを相補的に用いる無線ネットワークアーキテクチャを提案した。提案する指向性全二重無線通信は、マルチホップネットワークにおいて、全二重無線通信の性能が劣化する問題に対し、指向性アンテナの空間利用効率向上の利点を相補的に組み合わせることで、スループットの向上を図る。本研究では、まず、マルチホップ時のスループットの向上のために指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのノードアーキテクチャを提案した。このノードアーキテクチャの特徴は単一トラフィックフローの場合、送信元ノードと宛先ノード間のホップ数が増加してもスループットの減少が小さい点である。しかし、複数のトラフィックフローがあるマルチホップネットワークでは、このノードアーキテクチャを用いた場合、隠れ端末問題が発生する可能性があり、スループット性能が劣化することが予想される。そこで、指向性全二重無線通信のためのルーティングプロトコルを提案した。提案方式では、トラフィックフローが交わらないように迂回させて経路を構築することで隠れ端末問題を低減し、スループットの向上を図る。計算機シミュレーションによる性能評価で提案方式はマルチホップネットワークにおいて、スループットが向上することを確認した。今後、実機に本研究を実装するなど実用性を検証に取り組む予定である。

【参考文献】

- [1] Subramanian, A.P., Lundgren, H. and Salonidis, T.: Experimental characterization of sectorized antennas in dense 802.11 wireless mesh networks, in *ACM Mobihoc'09*, pp. 259-268 (2009).
- [2] Bellofiore, S., Balanis, C.A., Foutz, J., Spanias, A.S.: Smart-antenna systems for mobile communication networks. part 1: overview and antenna design, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 44, No. 3, pp. 145-154 (2002).
- [3] Korakis, T., Jakllari, G. and Tassioulas, L.: A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks, in *ACM MobiHoc'03*, pp. 98-107 (2003).
- [4] Shihab, E., Chai, L. and Pan, J.: A distributed asynchronous directional-to-directional MAC protocol for wireless ad hoc networks, *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 58, No. 9, pp. 5124-5134 (2009).
- [5] Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks, in *ACM Mobicom'02*, pp. 59-70, (2002).
- [6] Ko, Y., Shankarkumae, V. and Vaidya, N.H.: Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks, in *IEEE INFOCOM'00*, pp. 13-21 (2000).
- [7] Takata, M., Bandai, M. and Watanabe, T.: A MAC protocol with directional antennas for deafness avoidance in ad hoc networks, in *IEEE GLOBECOM'07*, pp. 620-625 (2007).

- [8] Watanabe, M., Mitsuhashi, H., Bandai, M., Obana, S. and Watanabe, T.: Empirical discussion on directional MAC protocols for ad hoc networks using practice smart Antennas, in *IEEE ICC'07*, pp. 3642–3647 (2007).
- [9] Takata, M., Bandai, M. and Watanabe, T.: A receiver-initiated directional MAC protocol for handling deafness in ad hoc networks, in *IEEE ICC'06*, pp. 4089–4095 (2006).
- [10] Takatsuka, Y., Nagashima, K., Takata, M., Bandai, M. and Watanabe, T.: A directional MAC protocol for practical smart antennas, in *IEEE GLOBECOM'06*, pp. 1–6 (2006).
- [11] Choi, J., Jain, M., Choi, J., Srinivasan, K., Levis, P. and Katti, S.: Achieving single channel, full duplex wireless communication, in *ACM MobiCom'10*, pp. 1–12 (2010).
- [12] Jain, M., Choi, J., Kim, T.T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, real-time, full duplex wireless, in *ACM MobiCom'11*, pp. 300–312 (2011).
- [13] Oashi, S. and Bandai, M.: Performance of medium access control protocols for full-duplex wireless LANs, in *APSITT'12* (2012).
- [14] Tamaki, K., Sugiyama, Y., Raptino H, A., Bandai, M., Saruwatari, S., Watanabe, T.: Full duplex media access control for wireless multi-hop networks, in *IEEE VTC2013-Spring* (2013).
- [15] Miura, K. and Bandai, M.: Node architecture and MAC protocol for full-duplex wireless and directional antennas, in *IEEE PIMRC'12*, pp. 385–390 (2012).
- [16] Network Simulator ns-3 <http://www.nsnam.org/>
- [17] Kato, K., and Bandai, M.: Routing protocol for directional full-duplex wireless, in *IEEE PIMRC'13*, pp. 3254–3258 (2013).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
指向性アンテナを用いた全二重無線 MAC プロトコル	情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2012) シンポジウム	2012年7月
指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコル	情報処理学会 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2013) シンポジウム	2013年7月
Node Architecture and MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas	IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'12)	2012年9月
Routing Protocol for Directional Full-Duplex Wireless	IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'13)	2013年9月