

スマートアンテナを用いるアドホックネットワーク MACプロトコルの指向性隠れ端末問題とその解決法

関戸 正規[†] 高田 昌忠^{††} 長島 勝城[†]
萬代 雅希^{†††} 渡辺 尚^{†††}

アドホックネットワークにおいて無線媒体の効率的な利用のためにスマートアンテナの利用が期待されている。本論文でははじめに代表的な無指向性 MAC プロトコル IEEE 802.11 DCF と 3 つの指向性 MAC プロトコル, DMAC, MMAC, SWAMP のマルチホップ伝送時の特性について比較評価を行う。評価により, 指向性隠れ端末問題と呼ばれる問題によって指向性 MAC プロトコルの性能が送信元と宛先間のルート形状に強く依存することを明らかにする。次に, 指向性隠れ端末に起因する性能劣化への対処として, 通信の意図を知らせ指向性隠れ端末に NAV を設定させる 3 つの方式 High gain CTS (HCTS) 方式, Backward RTS (BRTS) 方式, Relayed CTS (RCTS) 方式を提案する。3 つの方式はそれぞれ異なる方法で進行中の通信を指向性隠れ端末に知らせ, NAV を設定させることで指向性隠れ端末問題に対処する。計算機シミュレーションにより提案方式が指向性隠れ端末問題を解決し, スループット性能が改善することを示す。

A Directional Hidden Terminal Problem in Ad hoc Network MAC Protocols with Smart Antennas and the Solutions

MASANORI SEKIDO,[†] MASANORI TAKATA,^{††}
KATSUSHIRO NAGASHIMA,[†] MASAKI BANDAI^{†††}
and TAKASHI WATANABE^{†††}

Smart antennas are expected to enhance scalability in ad hoc networks. This paper at first evaluates three directional MAC protocols, DMAC, MMAC and SWAMP as well as the omni-directional protocol IEEE 802.11 DCF in multi-hop transmission environment. The evaluations address the problem that the performance strongly depends on the topology of routes between sources and destinations, referred to as a directional hidden terminal problem. After analyzing the problem, we propose three solutions. The solutions are NAV indicators which are high gain CTS (HCTS), backward RTS (BRTS) and relayed CTS (RCTS) indicating on-going communications to a directional hidden terminal to set NAV. Among those we show that the solutions have the improvement of the throughput.

1. はじめに

無線通信技術の進歩と無線機器の普及にともない, 固定インフラを必要とせず, 端末のみで一時的にネットワークを構築することができる無線アドホックネットワークが注目され, 研究がさかに行われている^{1),2)}。無線アドホックネットワークにおける無線媒体の効率的な利用を目的として, SWAMP (Smart

antennas based Wider-range Access MAC Protocol³⁾, DMAC (Directional MAC Protocol⁴⁾, MMAC (Multi-Hop RTS MAC Protocol⁴⁾などのスマートアンテナ⁵⁾を用いた MAC (Medium Access Control) プロトコル (以降, 指向性 MAC プロトコル) が提案されている。従来多く用いられている代表的な無指向性 MAC プロトコルである IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function⁶⁾は無指向性アンテナの利用を前提に設計されているため, 空間の効率的な利用ができない^{7),8)}。それに対し, スマートアンテナは特定の方向にビームを向けることが可能で, 無指向性アンテナに比べネットワーク性能の向上が期待できる。これまでにスマートアンテナを用いた MAC プロトコルの無指向性 MAC プロトコルに

[†] 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University

^{††} 静岡大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

^{†††} 静岡大学情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University

対する優位性は示されている。また、無指向性 MAC プロトコルと指向性 MAC プロトコルを比較評価する研究⁹⁾も行われている。しかしそれらは指向性 MAC プロトコルどうしの比較評価や指向性 MAC プロトコルを用いる際に適した環境について十分に調査されていない。

本論文では代表的な無指向性 MAC プロトコル IEEE 802.11 DCF と 3 つの指向性 MAC プロトコルのマルチホップ伝送時の特性について比較評価を行い、指向性 MAC プロトコルの有効性や問題点について考察する。また、考察結果より指向性 MAC プロトコルを用いる際に適した環境について述べる。評価と考察により明らかになった指向性隠れ端末問題について分析し、指向性隠れ端末に起因する性能劣化への対処として RTS (Request To Send) と CTS (Clear To Send) を拡張した 3 つの方式、Backward RTS (BRTS) 方式、High gain CTS (HCTS) 方式、Relayed CTS (RCTS) 方式を提案し、それぞれ性能評価する。これらの提案方式はすべて、指向性隠れ端末問題を引き起こす端末に NAV を設定させ、通信を延期させることによって指向性隠れ端末問題に対処する。

以降 2 章では本論文で評価する 4 つの MAC プロトコルについて説明し、3 章ではそれらのプロトコルの性能評価を行う。4 章では 3 章の評価によって明らかになった指向性 MAC の問題について述べるとともに 3 つの対処法を提案し評価する。最後に 5 章でまとめとする。

2. 評価対象プロトコル

本論文では以下の 4 つの MAC プロトコルを評価する。本文中の図では実線を指向性送受信範囲、破線は無指向性受信範囲とする。端末間で送受信ビームフォームが重なると通信が可能であることを表す。

2.1 IEEE 802.11 DCF⁶⁾

IEEE 802.11 DCF は現在最も普及し、多くの無線アドホックネットワークの研究で用いられている MAC プロトコルである。無指向性アンテナを利用し、RTS/CTS/DATA/ACK の順に通信を行う。物理キャリアセンスに加え、仮想キャリアセンスを行う。仮想キャリアセンスとは、データ送信に先立って制御フレーム RTS/CTS を交換することにより、近隣端末に NAV (Network Allocation Vector) を設定させ通信を妨害しないようにするための機構である。仮想キャリアセンスによって隠れ端末問題に対処しているが、無指向性アンテナを用いるため広くメディアを占有してしまうことから空間利用効率が低く、同時通信数が

小さい。

2.2 SWAMP³⁾

SWAMP は IEEE 802.11 DCF をベースとし、2 つのアクセスモードを使い分けることによって空間利用効率の向上と通信距離の拡張に対応したプロトコルである。前提として、各端末が GPS (Global Positioning System) などにより自身の絶対位置情報を得られることとされている。本研究ではそれぞれのアクセスモードを評価対象とする。以下に SWAMP における 2 つのアクセスモードを述べる。

・OC-mode (Omni-directional area Communication access mode)

無指向性通信で 1 ホップの通信距離内に宛先端末がいる場合のアクセスモードである。SOF (Start Of Frame) という位置情報交換のための制御フレームを追加している。RTS/CTS/SOF/DATA/ACK の順に通信を行い、RTS/CTS/SOF を無指向性ビームで、DATA/ACK を指向性ビームで送信する。RTS/CTS/SOF の交換によって通信相手の位置情報を取得し、取得した位置情報を近隣に通知する。送信元端末は RTS に自身の位置情報を付加して送信する。RTS を受信した宛先端末は CTS に自身の位置情報および RTS に付加された送信元端末の位置情報を付加して送信する。CTS を受信した近隣端末は 2 ホップ離れた送信元端末の位置情報を得られる。同様に CTS を受信した送信元端末は、SOF に CTS から得られた宛先端末の位置情報を付加して送信する。SOF を受信した近隣端末は 2 ホップ離れた宛先端末の位置情報を得ることができる。このように OC-mode では通信ペアが互いの位置情報を近隣に配布する仕組みを持つ。また RTS/SOF のみを受信、あるいは CTS のみを受信した近隣端末は、通信ペアが DATA、ACK の指向性通信を開始した後であればその通信に干渉しない。そのため従来の NAV よりも短い Omni-NAV の間自身の通信を延期する。Omni-NAV を設定する端末は従来の NAV よりも早く自身の通信を開始することが可能となるため空間利用効率が向上する。

・EC-mode (Extend area Communication access mode)

無指向性通信で 2 ホップ先に宛先端末が位置する場合のアクセスモードである。OC-mode で近隣から取得した端末の位置情報を基に指向性を制御する。RTS/CTS/DATA/ACK の順に通信を行い、すべてを指向性ビームで送信する。RTS を高利得な指向性ビームで送信することによって無指向性ビームで 2 ホップ先の端末と直接通信を行う。つまり通信エリアは無指

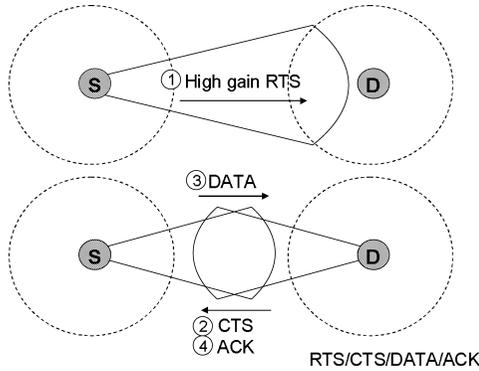


図 1 SWAMP (EC-mode)
Fig. 1 SWAMP (EC-mode).

向性ビーム使用時に対してホップ数的に 2 倍に拡張される．図 1 に SWAMP (EC-mode) の通信の流れを示す．① 送信元端末 S は D 宛に高利得な指向性ビームで RTS を送信する．② RTS を受信した宛先端末 D は CTS を指向性ビームで送信する．③ CTS を受信した S は DATA を指向性送信し，④ DATA を受信した D は ACK を指向性ビームで返す．

2.3 DMAC⁴⁾

DMAC は IEEE 802.11 DCF をベースとし，RTS/CTS/DATA/ACK の順に通信を行い，すべてを指向性ビームで送信する．RTS/CTS を受信した近隣端末は Directional NAV (DNAV)⁴⁾ を設定し，RTS/CTS を送信した端末の方向への通信を延期するため，現在行われている通信を妨害しない．このとき DNAV が設定されていない方向への自身の通信は可能となる．このように DMAC では DNAV と指向性ビームによって空間利用効率を向上させている．また通信エリアは使用する指向性ビームの通信距離に依存する．DMAC では各端末が GPS によって自身の位置情報を取得可能であることを前提としているが，指向性の制御に必要な位置情報取得方法については示されていない．図 2 に DMAC の通信の流れを示す．① 送信元端末 S は D 宛に指向性ビームで RTS を送信する．② RTS を受信した宛先端末 D は CTS を指向性ビームで送信する．③ CTS を受信した S は DATA を指向性送信し，④ DATA を受信した D は ACK を指向性ビームで返す．

2.4 MMAC⁴⁾

MMAC は DMAC を拡張したプロトコルで，DMAC 同様 RTS/CTS/DATA/ACK すべてを指向性ビームで送信する．MMAC では RTS を近隣端末で中継するマルチホップ RTS を利用し通信エリアの拡張を図っている．マルチホップ RTS は RTS を送信

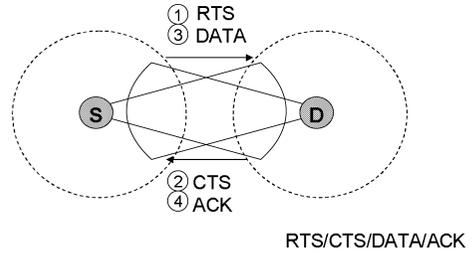


図 2 DMAC
Fig. 2 DMAC.

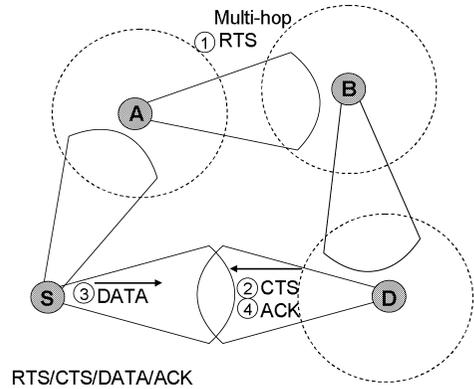


図 3 MMAC
Fig. 3 MMAC.

しても CTS が返ってこない場合，つまり宛先がより遠くに存在する場合に用いられ，送信元が RTS を近隣端末に中継させて宛先端末に通信の意思を伝える．このとき送信元端末は受信ビームの指向性を宛先端末の方向へ向けて待機する．マルチホップ RTS を受信した宛先端末は送信元の方向へ指向性ビームで CTS を返す．このように互いが指向性アンテナを用いることで直接通信可能な距離を拡張する．MMAC についても DMAC 同様位置情報取得方法については示されていない．さらに RTS のマルチホップルートの構築方法についても示されていない．図 3 に MMAC の通信の流れを示す．送信元端末 S は宛先端末に RTS を指向性送信するが，CTS が返ってこないとき，① S は指向性受信ビームを宛先方向に向け，近隣端末 A にマルチホップ RTS を指向性送信する．マルチホップ RTS を受信した A はさらに B にマルチホップ RTS を指向性送信する．② B からのマルチホップ RTS を受信した宛先端末 D は S に CTS を指向性送信する．このとき S は受信ビームの指向性を D の方向に向けている，つまり S，D が指向性ビームを向け合っているため S は CTS を受信できる．③ CTS を受信した S は DATA を D へ指向性送信する．④ DATA を受信した D は ACK を S の方向に指向性送信する．

表 1 シミュレーション緒元
Table 1 Simulation parameters.

トポロジ	5 × 5 格子配置 (間隔 150 m)
フロー数	4 (固定, 4 ホップ) *SWAMP (EC-mode), MMAC: 2 ホップ
トラフィック	CBR トラフィック生成
データサイズ	512 byte
無指向性ビーム	250 m
通信距離	
指向性ビーム幅	45°
伝送速度	2 Mbps

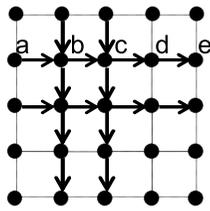


図 4 直進モデル
Fig. 4 Straight model.

3. 性能評価

2章で述べた5つの方式のマルチホップ環境での計算機シミュレーションによる比較評価を行い、指向性MACプロトコルとマルチホップフローの形状、アンテナビーム形状の関係について考察する。C++により自作した計算機シミュレータを用いて性能評価を行う。表1にシミュレーション諸元を示す。

各方式で用いるアンテナビームによる最大通信距離はIEEE 802.11 DCF, SWAMP (OC-mode)では250 m, SWAMP (EC-mode)では500 m, DMACでは900 m⁴⁾と250 mの2種類, MMACでは900 m⁴⁾とする。また宛先端末の位置情報は既知とし、2つの異なるルート形状を仮定する。図4の直進モデルでの4フローのEnd-to-Endスループット総計の評価結果を図5に、図6の非直進モデルでの4フローのEnd-to-Endスループット総計の評価結果を図7に示す。なお、各方式はそれぞれのプロトコルにおける通信距離の拡張への対応によりホップする端末が異なる。たとえば、a-e間のフローでは直進モデルと非直進モデルのどちらにおいてもIEEE 802.11 DCF, SWAMP (OC-mode), DMACはa-b-c-d-e, SWAMP (EC-mode)はa-c-e, MMACはa-d-eとマルチホップする。

図5より、ホップ数の少ないMMACと、送信距離の小さい指向性ビームを用いるDMAC(250 m)が高い性能を示すことが分かる。SWAMP (EC-mode)やDMAC(900 m)では高利得な指向性ビームが進行方

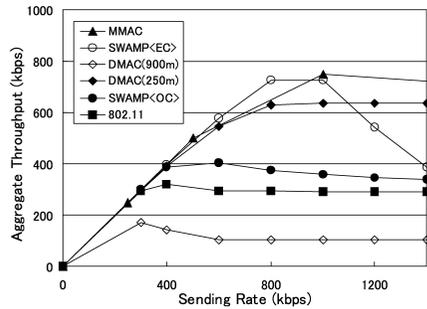


図 5 直進モデルスループット
Fig. 5 Straight model throughput.

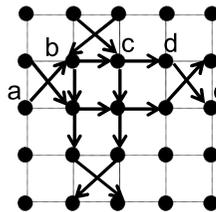


図 6 非直進モデル
Fig. 6 Non-straight model.

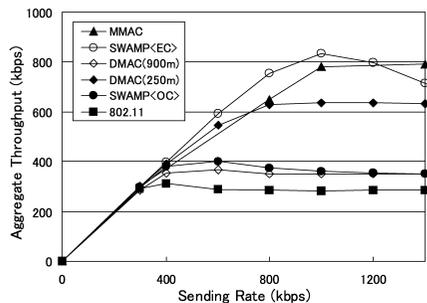


図 7 非直進モデルスループット
Fig. 7 Non-straight model throughput.

向に存在する他のリンクに干渉するため、直進性の強い図5のルートでは十分に性能が得られていない。またSWAMP (OC-mode)はIEEE 802.11 DCFに比べて高い性能を示したが、無指向性ビームによる制御フレームを用いるため周辺端末の通信を延期させる。そのためDMAC(250 m)よりも低い性能を示すことが分かる。

図7より、すべての指向性MACプロトコルがIEEE 802.11 DCFよりも良い性能を示すことが分かる。特にSWAMP (EC-mode)は低負荷では高利得な指向性ビームによる干渉が生じず、またMMACに比べRTSのマルチホップを必要としないため最も高い性能を示す。

図5および図7より、SWAMP (EC-mode)は直進モデルよりも非直進モデルにおいて高い性能を示す

ことが分かる．また直進モデルと非直進モデルのどちらにおいても DMAC (900 m) は DMAC (250 m) よりも性能が低い．これは DMAC (900 m) が必要以上に高利得なビームを使用することで周辺リンクへの干渉を引き起こすためである．

SWAMP (EC-mode) と MMAC は通信距離の拡張により仮定した 2 つのモデルにおいては 1 フローを 2 ホップで通信できる．そして高いスループットが得られており、通信距離の拡張がマルチホップネットワークにおいて有効であることが示される．しかし SWAMP (EC-mode) は同ホップ数の MMAC に比べて高負荷時において性能が低い．この原因については 4 章で述べる．

また、1 フローが 4 ホップで構成される 3 つの方式を比較すると、無指向性通信の IEEE 802.11 DCF よりも DATA/ACK を指向性ビームで送信する SWAMP (OC-mode) は性能が良く、さらに制御フレームも含めすべて指向性ビームを用いる DMAC (250 m) が最も高い性能を示す．ただし、宛先端末の位置情報が取得できていることが前提であることと高利得な指向性ビームを使用しないという条件が必要である．いい換えると、指向性ビームを送信する際には到達距離を可変とし、必要最小限の到達距離で送信することで性能向上の可能性がある．これを実現するには宛先端末の信頼性の高い位置情報が必要である．

今回の性能評価では宛先端末の位置情報を既知とする．これは DMAC, MMAC に有利な条件である．ビームの指向性制御のためには宛先端末の位置情報が必要不可欠である．SWAMP は OC-mode で無指向性ビームを用いて宛先端末の位置情報の取得を解決し、EC-mode では OC-mode で得られた宛先端末の位置情報と通信距離の長い RTS を使用してより遠くの端末との通信を可能にしている．それに対し DMAC, MMAC ではあらかじめ宛先端末の位置情報を取得できていることを前提としているため MAC プロトコルのみではうまく機能せず、上位層で宛先端末の位置情報を取得するためのオーバーヘッドの増加は避けられない．

以上より、IEEE 802.11 DCF に対する指向性 MAC プロトコルのスループット性能について、通信距離拡張によるホップ数の削減、および送信範囲の限定によって性能が向上することが分かった．そして過度に高利得なビームは性能を劣化させる．また、指向性 MAC プロトコルを用いる際のルートについて、自ルートでの直進性をなくすことによって性能が向上すること、近隣リンクとの並行性をなくすことによって性能が向

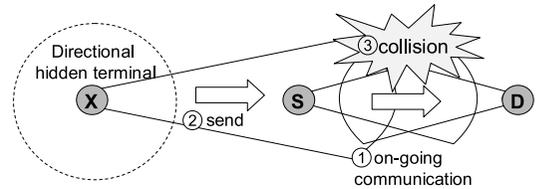


図 8 指向性隠れ端末問題

Fig. 8 Directional hidden terminal problem.

上することが明らかになった．

4. 指向性隠れ端末問題とその対処

図 5 より、SWAMP (EC-mode) は、ホップ数が等しい MMAC およびホップ数の多い DMAC (250 m) よりも低い性能を示す．SWAMP (EC-mode) の直進モデルでの性能の劣化は、直進性の高いルートで高利得な指向性ビームを用いる際に起きる新たな隠れ端末問題の発生が原因である．以後この問題を指向性隠れ端末問題と呼び、この問題の原因となる端末を指向性隠れ端末と呼ぶ．本論文では指向性隠れ端末問題およびその 3 つの解決策を提案する．また、それぞれの解決策について性能評価を行い、有効性を考察する．

4.1 指向性隠れ端末問題

高利得な指向性ビームを用いることで指向性隠れ端末問題が発生する．図 8 に指向性隠れ端末問題が発生するメカニズムを示す．

① S が D と通信中であるとする．

② X に S 宛のパケットが発生すると、X は物理キャリアセンスをするがビジーを検出しないため送信を開始する．

③ X の高利得な指向性ビームが D の受信ビームにまでも届いてしまうため、衝突が起こり、S-D 間のリンクを破壊する．

指向性隠れ端末問題は自身の通信が行えないだけでなく、現在行われている通信までも破壊する．そのため、指向性隠れ端末問題はさらし端末問題や deafness 問題⁴⁾ よりも深刻な問題である．この問題は DMAC や MMAC でも発生するが、特に RTS を高利得な指向性ビームで送信する SWAMP (EC-mode) などの MAC プロトコルにおいて性能低下の原因となっていると考えられる．図 9 に 3 章の直進モデルおよび非直進モデルでの SWAMP (EC-mode) における 1 本のルート (2 ホップ) 上での、DATA 受信成功数/CTS 受信成功数を示す．1 本のみに着目しているため、CTS 通信成功後の DATA 通信の失敗は、DATA 通信中に指向性隠れ端末に通信を妨害されたことを意味する．つまり、DATA 受信成功数/CTS 受信成功数が低いほ

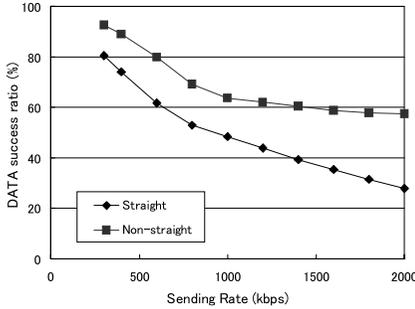


図 9 DATA 受信数/CTS 受信数 (EC-mode)
Fig. 9 Num of DATA / Num of CTS (EC-mode).

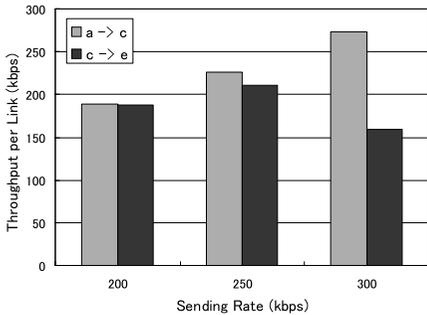


図 10 直進モデルでのリンク間スループット (EC-mode)
Fig. 10 Straight model throughput of 2 links (EC-mode).

ど指向性隠れ端末問題による DATA 破壊が起きていることを示す。図 9 より, SWAMP (EC-mode) では指向性隠れ端末問題によって性能が低下することが分かる。特に直進モデルでは指向性隠れ端末問題による性能劣化は顕著で, 高負荷時には DATA 通信の半分以上が妨害されていることが分かる。

次に図 5 の直進モデルでの SWAMP (EC-mode) における 1 本のルート a-c-e 上の隣接する 2 リンク a-c および c-e のスループットを図 10 に示す。図 10 より, 負荷が上がるにつれて a-c のスループットに比べ, c-e のスループットが下がることが分かる。これは, 指向性隠れ端末問題によって前方リンク c-e が後方リンク a-c の RTS に破壊されるため, 宛先 c まで届かないパケットが多いことが原因である。

4.2 指向性隠れ端末問題への対処方法

指向性隠れ端末問題は, 通信しようとする端末が指向性隠れ端末にこれから通信することを気づかせる (NAV を設定させる) ことにより対処することができる。以下では指向性隠れ端末問題への対処方法を提案する。なお, ここで提案する 3 つの方式は SWAMP 以外の指向性 MAC プロトコルにも適用可能である。

4.2.1 High gain CTS (HCTS) 方式

宛先端末が CTS をより高利得なビーム, または高

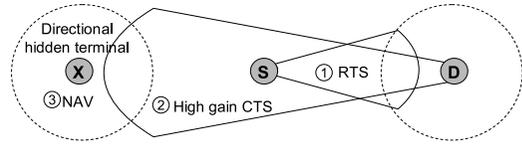


図 11 High gain CTS (HCTS)
Fig. 11 High gain CTS (HCTS).

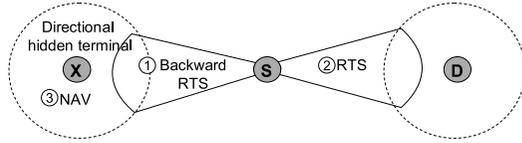


図 12 Backward RTS (BRTS)
Fig. 12 Backward RTS (BRTS).

電力なビームで送信することによって, 指向性隠れ端末に NAV を設定させる方式である。図 11 に高利得 CTS (HCTS) による指向性隠れ端末抑制の様子を示す。送信元 S は宛先 D に RTS を指向性送信する。RTS を受信した D は HCTS を送信する。この HCTS によって指向性隠れ端末となりうる X は NAV を設定し自身の通信を延期する。そして HCTS を受信した S は DATA を指向性送信し, 宛先は ACK を指向性ビームで返す。

このとき HCTS は, 指向性隠れ端末が存在しうる範囲すべてのカバーが可能である。しかしそのためにはアンテナ利得を非常に大きくするか, 送信電力を大きくしなければならない。そのため, 送信ビームが及び範囲が大きくなり, 多くの他の通信を妨げる可能性がある。

4.2.2 Backward RTS (BRTS) 方式

送信端末が宛先端末への RTS 送信に先立ち, 送信アンテナの指向性を宛先端末の方向に対して後方に向け, RTS を送信する方式である。図 12 に RTS 後方送信による指向性隠れ端末抑制の様子を示す。後方に送信された BRTS によって指向性隠れ端末 X は NAV を設定する。その後 S, D は X に妨害されることなく通信が可能となる。

一方, BRTS や文献 10) の方式では, 送信端末が宛先端末からの CTS を受信できない場合であっても周辺端末は NAV を設定し自身の通信を延期する。そのため空間利用効率が低下する可能性がある。

RTS によって指向性隠れ端末になる可能性のある端末に NAV をセットさせる方式には, 送信端末が RTS を回転送信する方式が提案されている¹⁰⁾。しかし, アンテナの指向性を変えながら RTS を何度も送信するため, BRTS に比べてオーバーヘッドが大きく, 宛先端末からの CTS の返信がない場合でも周辺端末は NAV

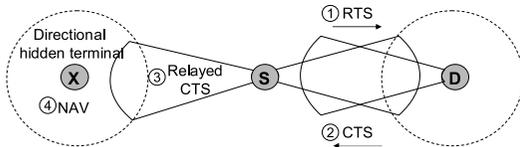


図 13 Relayed CTS (RCTS)
Fig. 13 Relayed CTS (RCTS).

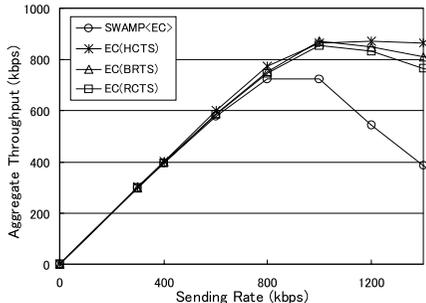


図 14 直進モデル (提案方式評価)
Fig. 14 Straight model added three solutions.

を設定し自身の通信を延期する．したがって空間利用効率低下する可能性がある．

4.2.3 Relayed CTS (RCTS) 方式

送信元端末が宛先端末から受け取った CTS を後方に転送する方式である．図 13 に RCTS による指向性隠れ端末抑制の様子を示す．送信端末 S は、宛先端末 D に RTS を指向性ビームで送信し、D からの CTS を受信した後に RCTS を後方に送信する．この RCTS を受信した端末は NAV を設定する．その後 DATA/ACK が送受信される．送信端末が RCTS を送信するタイミングは、宛先端末からの CTS を受信した後である．そのため S が D からの CTS を受信できない場合は RCTS を送信しないため、X は自身の通信を開始することができ、空間利用効率の向上が期待できる．

4.3 提案方式の性能評価

3 章と同じ条件の下で、HCTS 方式、BRTS 方式、RCTS 方式を評価する．提案した方式はどの指向性 MAC プロトコルにも適用可能であるが、ここでは各提案方式によって SWAMP (EC-mode) を拡張したものを評価する．直進モデルでの評価結果を図 14 に、非直進モデルでの評価結果を図 15 に示す．

図 14 より、直進モデルでは提案した 3 方式すべてが SWAMP (EC-mode) より高い性能を示すことが分かる．また、HCTS 方式はほとんどの指向性隠れ端末を抑制するため、提案方式の中でも最も高い性能を示す．図 16 に直進モデルでの SWAMP (EC-mode) に HCTS 方式を適用した場合における 1 本のルート

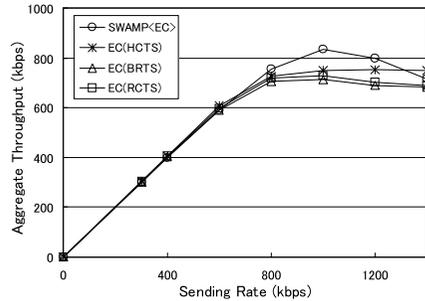


図 15 非直進モデル (提案方式評価)
Fig. 15 Non-straight model added three solutions.

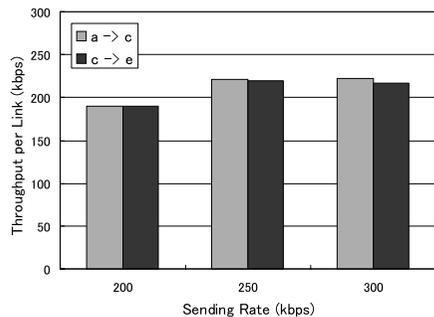


図 16 直進モデルでのリンク間スループット (HCTS)
Fig. 16 Straight model throughput of 2 links (HCTS).

a-c-e 上の隣接する 2 リンク a-c および c-e のスループットを示す．

図 10 と図 16 の比較より、負荷が上がっても a-c のスループットと c-e のスループットの差が小さいことが分かる．また図 14 の BRTS 方式および RCTS 方式は指向性隠れ端末問題を抑制し性能を向上させているものの、高負荷時にやや性能が低下する．また、BRTS 方式が RCTS 方式よりも良い性能を示す．BRTS 方式では送信元端末が後方に BRTS を送信し指向性隠れ端末に NAV を設定させた後、宛先との通信を試みる．RCTS 方式では RTS/CTS パケットの交換の後 RCTS によって後方端末に NAV を設定させる．よって、RCTS 方式は制御パケット RTS/CTS/RCTS の交換中に通信を妨害される場合があるため BRTS 方式よりも低い性能を示す．

図 15 より、非直進モデルでは提案した 3 つの方式はすべて SWAMP (EC-mode) よりも性能が低下することが分かる．このモデルでは、指向性隠れ端末が存在する位置は送信端末の後方ではあるが、BRTS や RCTS では指向性隠れ端末をカバーできない場合がある．また、このモデルではルートの直進性が低いことから指向性隠れ端末問題があまり発生しないため、提案方式が余計に周辺端末の通信を妨害する．

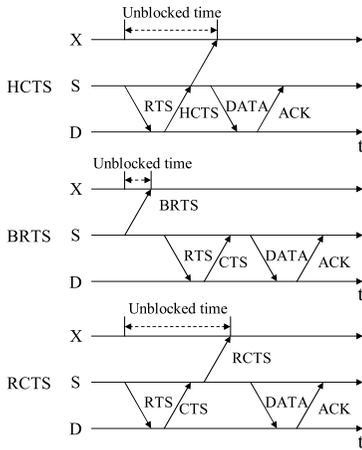


図 17 タイミングチャート
Fig. 17 Timing chart.

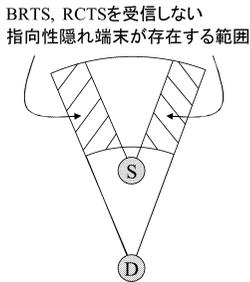


図 18 BRTS, RCTS により隠れ端末の存在しうる位置
Fig. 18 Non-cover area of BRTS, RCTS.

3つの提案方式の中では HCTS が最も高い性能を示す。HCTS 方式は指向性隠れ端末となりうる端末を抑制する。BRTS 方式, RCTS 方式は HCTS に比べ指向性隠れ端末を防ぐことができないため高負荷時にやや性能が低下する。RCTS 方式が BRTS 方式よりも良い性能を示す。図 17 より, 3 方式を比較すると, 自身が通信を開始してから周辺端末を抑制できない時間 (図中の Unblocked time) は RCTS>HCTS>BRTS の関係にあることが分かる。RCTS は宛先からの CTS が返ってきた後に送信されるため送信元が宛先と通信できない場合には無駄に後方端末を抑制しない。しかし, BRTS は通信開始時に後方端末を抑制するため, 送信元が宛先と通信できない場合でも後方端末は通信を延期する。よって, BRTS 方式は RCTS 方式よりも低い性能を示す。

図 14 および図 15 より, 直進モデルと非直進モデルのどちらにおいても HCTS は指向性隠れ端末問題を解決できるが, BRTS と RCTS は解消しきれていない。その理由は指向性隠れ端末の存在位置にある。図 18 に指向性隠れ端末の存在しうる位置を示す。指

向性隠れ端末が存在しうる範囲は宛先端末が指向性隠れ端末の送信ビームを受信する範囲である。つまり, 宛先端末の受信ビームに送信ビームが届く端末に NAV を設定させれば指向性隠れ端末問題は起こらない。これを実現するには宛先自ら指向性隠れ端末に NAV を設定させる HCTS が最も適している。HCTS 方式は通信ペアの宛先端末が指向性隠れ端末問題の抑制を試みるため, 従来の CTS と同じ角度で高利得または高電力ビームを用いて HCTS を送信すればすべての端末を抑制可能である。

一方, BRTS 方式と RCTS 方式は送信元端末が指向性隠れ端末問題の抑制を試みるが, これらの方式では送信元の後方の限られた端末のみにしか NAV を設定させることができず, 指向性隠れ端末問題を解決することができない。対処法としては文献 10) と同様に BRTS や RCTS をあらゆる方向に複数回送信するか, 送信ビーム幅を大きくする方法が考えられる。しかしどちらの方法でも指向性隠れ端末となりえない位置の端末の通信まで延期させる可能性がある。また複数回制御パケットを送るオーバーヘッドが性能低下を引き起こすことが考えられる。指向性隠れ端末となりうる端末すべてに NAV を設定させることができたとしても, 抑制範囲が大きくなり, 端末が高密度なネットワーク環境では多くの他の通信の妨害し, ネットワーク性能を低下させる問題も考えられる。これらのことから, 指向性隠れ端末問題を抑制するには, 宛先側の端末が HCTS を用いることが効果的であることが分かる。しかし, 非直進モデルのように指向性隠れ端末問題が起こりにくいルートモデルにおいては, 各提案方式が指向性隠れ端末とならない端末にまで NAV を設定させるため性能が低下する。

以上より, 3つの提案方式が性能を向上させることができるかは, ネットワークのルートにも依存することが分かる。直進モデルのような直進性の強いルートでは, 提案した3つの方式は有効であるといえる。しかし, 直進性の弱いルート, つまり指向性隠れ端末問題が起こりにくい環境では性能を下げることが分かる。指向性隠れ端末問題の解決と同時通信数にはトレードオフの関係がある。なお, モビリティの影響, 指向性 MAC プロトコルを前提としたルーティングについては文献 11), 12) で考察を行っている。

5. おわりに

本論文では代表的な無指向性 MAC プロトコル IEEE 802.11 DCF と 3つの指向性 MAC プロトコル, DMAC, MMAC, SWAMP のマルチホップ伝送

時の特性について比較評価を行い、指向性隠れ端末問題と呼ばれる問題によって指向性 MAC プロトコルの性能が送信元と宛先の間のルート形状に強く依存することを明らかにした。我々は指向性隠れ端末問題を分析した後、指向性隠れ端末に起因する性能劣化への対処として、通信の意図を知らせ NAV を設定させる 3 つの方式 High gain CTS (HCTS) 方式, Backward RTS (BRTS) 方式, Relayed CTS (RCTS) 方式を提案しそれぞれ評価した。提案方式が指向性隠れ端末問題を解決し、スループット性能が改善されることを示した。今後はさらにさまざまな環境での指向性隠れ端末問題の影響や対処を検討する。

参 考 文 献

- 1) Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C. and Jetcheva, J.G.: The Dynamic Source Routing Protocol For Mobile Ad Hoc Networks, Internet-Draft, draft-ietf-manet-dsr-05.txt (2001).
- 2) Broch, J., Maltz, D.A., Johnson, D.B., Hu, Y.C. and Jetcheva, J.: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols, *Proc. ACM Mobile Computing and Network (Mobicom)* (1998).
- 3) 長島勝城, 高田昌忠, 渡辺 尚: スマートアンテナを用いた 2 種アクセス併用指向性メディアアクセス制御プロトコル, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-B, No.12, pp.2006-2019 (2004).
- 4) Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *Proc. ACM Mobile Computing and Network (MobiCom)*, pp.59-70 (2002).
- 5) Lehne, P.H. and Pettersen, M.: An Overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.2, No.4, Fourth Quarter (1999).
- 6) ANSI/IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications (1999).
- 7) Xu, S. and Saadawi, T.: Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?, *IEEE Commun. Mag.*, Vol.39, No.6, pp.130-137 (2001).
- 8) Li, J., Blake, C., Couto, D.S.J.D., Lee, H.I. and Morris, R.: Capacity of Ad Hoc Wireless Networks, *Proc. ACM/IEEE Mobile Computing and Networks (MobiCom)* (2001).
- 9) Huang, Z. and Shen, C.: A Comparison Study of Omnidirectional and Directional MAC Protocols for Ad hoc Networks, *Globecom* (2002).
- 10) Korakis, T., Jakkari, G. and Tassiulas, L.: A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp.98-107 (2003).
- 11) Takata, M., Bandai, M. and Watanabe, T.: An extended directional MAC for location information staleness in ad hoc networks, *2nd International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking (WWAN)* (2005).
- 12) Sekido, M., Takata, M., Bandai, M. and Watanabe, T.: Directional NAV Indicators and Orthogonal Routing for Smart Antenna Based Ad Hoc Networks, *2nd International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking (WWAN)* (2005).

(平成 17 年 2 月 2 日受付)

(平成 17 年 4 月 1 日採録)



関戸 正規 (学生会員)

1981 年生。2004 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院情報学研究所修士課程在学中。モバイルコンピューティング、アドホックネットワークにおけるメディアアクセス制御およびルーティングに関する研究に従事。



高田 昌忠 (学生会員)

1980 年生。2003 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2004 年同大学大学院情報学研究所修士課程修了。現在、同大学院理工学研究所博士後期課程在学中。静岡大学 21 世紀 COE プログラム「ナノビジョンサイエンスの拠点創成」COE 研究員。2004 年度情報処理学会東海支部学生論文奨励賞受賞。2004 年度第 20 回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術学生賞) 佳作受賞。モバイルコンピューティング、アドホックネットワークにおけるメディアアクセス制御およびルーティングに関する研究等に従事。IEEE, 電子情報通信学会各学生会員。



長島 勝城

1974年生。1997年静岡大学工学部電気工学科卒業。同年静岡日本電気株式会社（現 NEC アクセステクニカ株式会社）入社。高速マルチレイヤスイッチをはじめとする通信機器開発に従事。現在に至る。2004年静岡大学大学院情報学研究科修士課程修了。在学中、無線通信用メディアアクセス制御プロトコル等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



萬代 雅希（正会員）

1973年生。1996年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1998年同大学大学院修士課程修了。2004年同大学院後期博士課程修了。1998～2000年ソニー（株）勤務。2001～2003年日本学術振興会特別研究員。2004年静岡大学情報学部情報科学科助手。現在に至る。主として、通信ネットワークに関する研究に従事。工学博士。IEEE、電子情報通信学会各会員。



渡辺 尚（正会員）

1959年生。1982年大阪大学工学部通信工学科卒業。1984年同大学大学院博士前期課程修了。1987年同博士後期課程修了。工学博士。同年徳島大学工学部情報工学科助手。1990年静岡大学工学部情報知識工学科助教授。現在、同大学情報学部情報科学科教授。1995年文部省在外研究員（カリフォルニア大学アーバイン校）。計算機ネットワーク、分散システム、アドホックネットワーク、センサネットワークに関する研究等に従事。2005年情報処理学会モバイルコンピューティング研究会主査。訳書『計算機設計技法』、『802.11 無線ネットワーク管理』等。IEEE、電子情報通信学会各会員。