

実スマートアンテナを用いるアドホックネットワーク MAC プロトコルの問題とその改善方法について

高塚 雄也[†] 長島 勝城[‡] 萬代 雅希* 渡辺 尚**

[†] 静岡大学大学院情報学研究科 [‡] 静岡大学大学院理工学研究科

* 静岡大学情報学部 ** 静岡大学創造科学技術大学院

〒432-8011 浜松市城北 3-5-1

E-mail: {takatsuka, nagashima, bandai, watanabe}@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

あらまし 近年、指向性アンテナの使用を仮定した指向性 MAC プロトコルが提案されている。従来の指向性 MAC プロトコルでは、理想的なアンテナビームパターンが仮定されていた。しかしながら、実アンテナビームパターンを用いた場合、サイドローブ、バックローブ等のマイナーローブの存在により、理想アンテナでは考慮されていなかった問題が発生することが考えられる。本論文では、実アンテナビームパターンを用いて既存の MAC プロトコルを評価し、問題点を定量的に明らかにする。問題点として、NAV が適切に設定されないために起こる四つの衝突を明らかにし、それらについて考察する。続いて、実アンテナの使用を仮定した指向性 MAC プロトコルを提案する。提案方式では、指向性巡回待機、NAV (Network Allocation Vector) request フレームの送信により、周辺端末との衝突を回避する。シミュレーション結果により、実アンテナビームパターンを適用した従来の MAC プロトコルと比較し、提案方式のスループット性能が向上することを示す。

キーワード 指向性、MAC プロトコル、スマートアンテナ、サイドローブ、バックローブ

Problems of Ad Hoc Network MAC Protocol with Practical Smart Antennas and its Improvement

Yuya TAKATSUKA[†] Katsushiro NAGASHIMA[‡] Masaki BANDAI* and Takashi WATANABE**

[†] Graduate school of informatics, Shizuoka University

[‡] Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

* Faculty of informatics, Shizuoka University ** Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

3-5-1 Jouhoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8011 Japan

E-mail: {takatsuka, nagashima, bandai, watanabe}@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

Abstract Recently, several MAC protocols using directional antennas, typically referred to as directional MAC protocols, have been proposed for wireless ad hoc networks. However, the MAC protocols in the previous studies were evaluated using simulation with ideal antenna forms. When using practical antenna beam forms, side lobes and back lobes exist which may cause new problems. In this paper, we evaluate the performance of the directional MAC protocol in the previous studies with practical antenna beam forms. In addition, we propose a directional MAC protocol that assumes practical antenna beam forms. The proposed MAC protocol mitigates data collisions due to the effects of minor lobes. The simulation results show that the proposed directional MAC protocol improves throughput performance compared to existing directional MAC protocol when using practical antenna beam forms.

Keyword Directional, MAC Protocol, Smart Antenna, Side lobe, Back lobe

1. はじめに

近年、無線アドホックネットワーク[1]が注目されている。無線アドホックネットワークは、端末のみで構成され、固定インフラを必要としないネットワークである。従来の無線アドホックネットワークでは、全方向に同じ利得を持つ無指向性アンテナの使用を仮定していた。しかし、無指向性アンテナでは無線帯域を十

分に有効利用することができないため、空間利用効率が低下してしまう。そのため、無指向性アンテナの使用を仮定した IEEE 802.11 DCF [2]では、高スループットの実現が困難となっている。そこで、アンテナの指向性を電氣的制御可能なスマートアンテナが提案されている。スマートアンテナを用いることにより、空間利用効率の向上、通信エリアの拡張が期待される。

近年、スマートアンテナの使用を仮定した指向性 MAC プロトコルが提案されている。しかし、従来の指向性 MAC プロトコルでは、理想的なアンテナビームパターンが仮定されている。理想アンテナでは、送信角度内は全て同じ利得であり、送信方向以外の利得は考えられていない。しかしながら、実アンテナでは、送信方向以外にも、サイドローブ、バックローブ等のマイナーローブが発生する。

本シミュレーションでは、理想アンテナの使用を仮定した指向性 MAC プロトコルについて実アンテナビームパターンを用いて評価し、実アンテナでの問題点を定量的に明らかにする。実アンテナビームパターンとして、ESPAR (Electrically Steerable Passive Array Radiator) アンテナ[3]のビームパターンを使用する。その後、実アンテナでの問題点に対処する指向性 MAC プロトコルを提案し、従来の指向性 MAC プロトコルと比較し、スループット性能が改善することを示す。

2. 関連研究

IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) は無指向性アンテナの使用を仮定した MAC プロトコルである。RTS (Request To Send), CTS (Clear To Send) を送信し、周辺端末に NAV (Network Allocation Vector) を設定することにより、隠れ端末問題に対処しているが、さらし端末問題が発生する。また、IEEE 802.11 DCF では、空間利用効率の低下が引き起こされる。

近年では、スマートアンテナを用いることにより、空間利用効率の向上、通信距離の拡張を可能とする指向性 MAC プロトコルが提案されている。

DMAC (Directional MAC)[4]では、全フレーム送信を指向性ビームで行う。DMAC の通信シーケンスは、RTS/CTS/DNAV (Directional NAV)[5]を設定する。DNAV を設定した端末は、DNAV が設定されている方向への送信を禁止し、それ以外の方向への通信を許可する。通信範囲は、使用する指向性アンテナに依存する。DMAC では、指向性制御に必要な位置情報取得方法については明記されていない。

DMAC の拡張方式として、MMAC (Multi-hop RTS MAC)[4]が提案されている。MMAC の通信シーケンスは、RTS/CTS/DNAV/ACK である。RTS にはマルチホップ RTS が用いられ、通信距離の拡張が行われている。MMAC においても DMAC 同様、指向性制御に必要な位置情報取得方法については明記されていない。また、マルチホップ RTS に必要なルート構築方法についても示されていない。

SWAMP (Smart Antennas Based Wider-range Access MAC Protocol)[6]は IEEE 802.11 DCF をベースとし、二つのアクセスモードを持つ。一つのアクセスモードでは無指向性送信 1 ホップ間の通信を行い、もう一方のアクセスモードでは、無指向性送信 2 ホップ間の端末と指向性を用いて 1 ホップで通信を行う。SWAMP では、空間利用効率の向上を図り、通信距離の拡張も行われる。指向性制御に必要な位置情報はプロトコル内で取得する。

3. 評価プロトコル

本論文では、SWAMP を用いて、実アンテナパターンでの指向性 MAC プロトコルの性能を定量的に評価する。SWAMP は、OC-mode (Omni-directional area Communication access mode), EC-mode (Extend area Communication access mode) と呼ばれる二つのアクセスモードを持つ。SWAMP の詳細な動作について次に述べる。

3.1. OC-mode

OC-mode は、宛先端末の位置情報を取得していない場合、または、無指向性通信 1 ホップで通信可能な場合に選択される。OC-mode の通信について図 1 に示す。送信元端末 S は、無指向性ビームで RTS を送信する。RTS には S の位置情報を付加する。RTS を受信した宛先端末 D は、RTS から S の位置情報を取得する。宛先端末 D は無指向性ビームで CTS を送信する。CTS には D の位置情報と NHDI (Next Hop Direction Information) として S の位置情報を付加する。RTS を受信せずに CTS を受信した周辺端末は、NHDI を自身の NHDI テーブルに登録する。CTS を受信した送信元端末 S は、CTS から宛先端末 D の位置情報を取得する。送信元端末 S は無指向性ビームで SOF (Start Of Frame) を送信する。SOF には NHDI として D の位置情報を付加する。CTS を受信せずに SOF を受信した周辺端末は、NHDI を自身の NHDI テーブルに登録する。RTS/CTS により、送信元端末 S、宛先端末 D は互いの位置情報を取得しているため、DATA, ACK は送信、受信ともに指向性で行う。NHDI として登録された位置情報は、EC-mode での指向性制御に使用する。

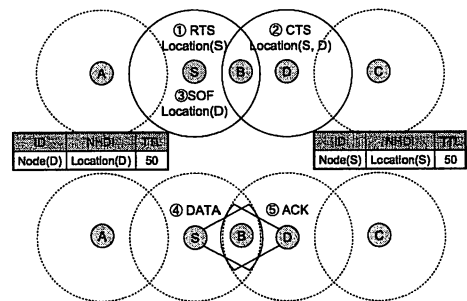


図1 OC-mode

OC-mode では、従来の NAV よりも期間の短い Omni-NAV を使用する。Omni-NAV を図 2 に示す。Omni-NAV は、RTS (RTS と SOF) または CTS のみ受信した端末に設定される。Omni-NAV を設定した端末は、SOF 通信が完了するまで自身の送信を禁止する。Omni-NAV を使用することにより、空間利用効率の向上を図っている。

3.2. EC-mode

EC-mode は宛先端末の位置情報が OC-mode により取得済みの場合に選択される。EC-mode では、無指向

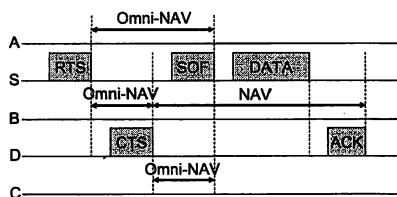


図2 Omni-NAV

性通信 2 ホップ必要な端末と指向性通信 1 ホップで通信を行う。EC-mode の通信について、図 3 に示す。送信元端末 S は、高送信電力で RTS を送信する。高送信電力で送信する理由は、宛先端末 D が無指向性で待機しているためである。RTS には S の位置情報を付加する。CTS/DATA/ACK は、送信元端末 S、宛先端末 D が互いの位置情報を取得しているため、送信、受信ともに指向性で行う。EC-mode では空間利用効率の向上、ホップ数の削減を図っている。

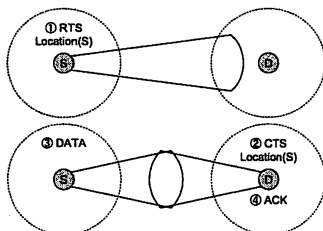


図3 EC-mode

4. 実アンテナビームパターンを用いた指向性 MAC プロトコルの定量的評価

本章では、実アンテナビームパターンを用いた指向性 MAC プロトコルの定量的評価を行う。

4.1. シミュレーションパラメータ

シミュレーションパラメータについて示す。端末数は 100 とし、1500m×1500m の範囲にランダムに配置する。端末の移動は考えないものとする。パケットは、各端末でパケット発生率 λ (packet/s) のポアソン分布に従って発生するとする。宛先端末は、無指向性通信 2 ホップ以内の端末からランダムに選択される。パケットサイズは 1460 バイト、無指向性通信範囲は 250m とする。使用する無線帯域は 2Mbps とする。

評価プロトコルは、IEEE 802.11 DCF、理想アンテナビームパターンを用いた SWAMP、実アンテナビームパターンを用いた SWAMP とする。

4.2. 実アンテナビームパターン

スマートアンテナの一つに、電気的制御により指向性を制御可能な ESPAR アンテナ[3]がある。ESPAR アンテナを図 4 に示す。アンテナ #0 で送受信を行い、アンテナ #1～#6 にかかる電圧を制御することにより、指

向性を制御する。本論文では、ESPAR アンテナのビームパターンを使用して評価を行う。ESPAR アンテナのビームパターン例を図 5 に示す。指向性ビームでは、サイドローブ、バックローブが発生する。

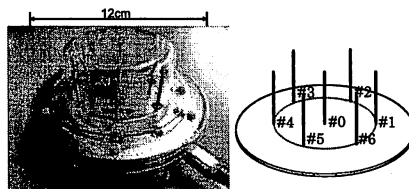


図4 ESPAR アンテナ

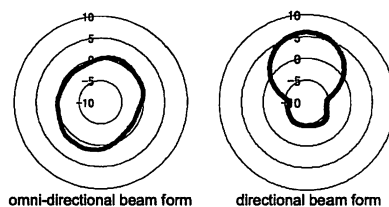


図5 ビームパターン

4.3. 性能評価

パケット発生率に対するスループット性能を図 6 に示す。理想アンテナビームパターンを用いた SWAMP は、IEEE 802.11 DCF と比較し、高いスループット性能を示している。高スループットは、OC-mode での Omni-NAV による空間利用効率の向上、EC-mode でのホップ数の削減などによって実現されていると考えられる。しかし、実アンテナビームパターンを用いた SWAMP は、理想アンテナビームパターンを用いた場合と比較し、スループット性能が低下している。

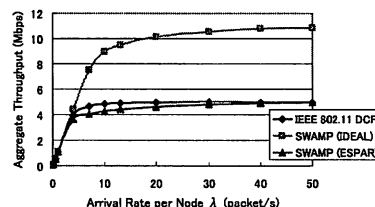


図6 スループット性能

スループット性能低下の原因として、DATA パケット受信中の衝突が考えられる。OC-mode、EC-mode それぞれにおける DATA 受信の成功数、エラー数を図 7、図 8 に示す。実アンテナビームパターンでの DATA 通信成功数は、理想アンテナビームパターンと比較し減少し、エラー数が増加していることがわかる。

OC-mode、EC-mode における DATA 通信中の衝突パケット数をそれぞれ図 9、図 10 に示す。OC-mode、EC-mode とともに主な衝突原因は、OC-mode、EC-mode の RTS となっている。RTS の衝突が多い原因として、周辺端末に NAV が適切に設定されていないことが考えられる。次章では、NAV が適切に設定されていないことによる衝突の原因について詳しく考察する。

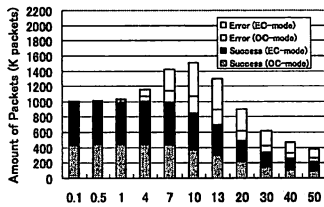


図7 成功・エラー数 (理想アンテナ)

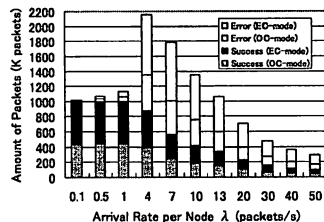


図8 成功・エラー数 (実アンテナ)

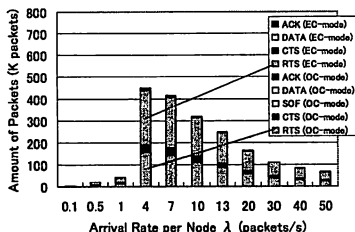


図9 衝突パケット数(OC-mode)

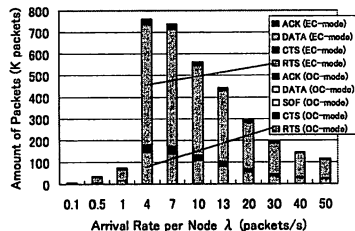


図10 衝突パケット数(EC-mode)

5. 衝突原因

本章では、四つの衝突原因について考察する。なお、本章の図中の実線は送信ビーム、破線は受信ビームを示す。

5.1. Omni-NAV 後の送信による衝突

SWAMP では、Omni-NAV を設定することにより、SOF 通信終了後の通信を可能とし、空間利用効率の向上を図っている。理想アンテナパターンの場合を図 11(a)に示す。周辺端末 X は SOF 通信終了後、自身の送信を開始する。理想アンテナではマイナーローブが存在しないため、周辺端末 X の送信と端末 D の DATA 受信との衝突は起こらない。実アンテナパターンの場合を図 11(b)に示す。(a)と同様に周辺端末 X が自身の送信を開始する。実アンテナではマイナ

ーローブが存在するため、周辺端末 X の送信と端末 D の DATA 受信との衝突が起こる。Omni-NAV 後の送信による衝突については、空間利用効率を上げるために Omni-NAV を使用する SWAMP で起こる問題である。Omni-NAV の代わりに DNAV を設定することにより空間利用効率は下がるが、この問題は解決できると考えられる。

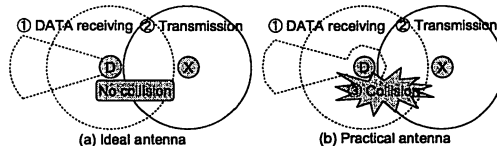


図11 Omni-NAV 後の送信による衝突

5.2. OC-mode における隠れ端末の送信による衝突

無指向性送信されたパケットを受信できない範囲に位置する周辺端末はコントロールフレームを受信することができない。コントロールフレームを受信できない端末は、自身の周辺での通信は行われていないと判断し、通信を開始してしまう。しかし、指向性ビームは無指向性ビームよりも利得が高いため、受信時とは利得の異なるビームで送信することにより、DATA 受信との衝突が考えられる。理想アンテナパターンの場合を図 12(a)に示す。端末 D のコントロールフレームを受信しなかった端末 X が指向性で送信した場合、端末 D の受信ビームにはマイナーローブが存在しないため衝突は起こらない。これは deafness となるが、衝突とはならない。実アンテナパターンの場合を図 12(b)に示す。(a)と同様に周辺端末 X が送信を行うが、端末 D の受信ビームにはマイナーローブが存在するため、DATA 受信との衝突が起こる。これは、位置情報の配布を目的としている無指向性送信と空間利用効率を上げるための指向性送信の二つを用いる SWAMP で起こる問題である。

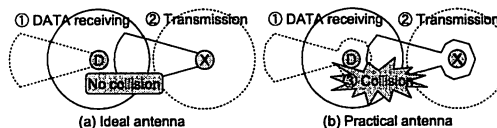


図12 OC-mode での隠れ端末の送信による衝突

5.3. EC-mode における隠れ端末の送信による衝突

EC-mode では全フレーム送信を指向性で行う。そのため、送信ビームのメインローブ内に位置しない周辺端末が、無指向性でコントロールフレームを受信することは困難となる。しかし、コントロールフレームを受信できなかった端末が指向性で送信した場合、受信ビームのマイナーローブとの干渉が起こりえる。理想アンテナパターンの場合を図 13(a)に示す。端末 D のコントロールフレームを受信しなかった端末 X が指向性で送信をした場合、端末 D の受信ビームにはマイナーローブが存在しないため衝突は起こらない。これは deafness となるが、衝突とはならない。実アンテナパターンの場合を図 13(b)に示す。(a)と同様に周辺端末 X が送信を行うが、端末 D の受信ビームにはマイナー

ープが存在するため、DATA 受信と衝突が起こる。この問題は、DMAC, MMAC においても起こる問題である。

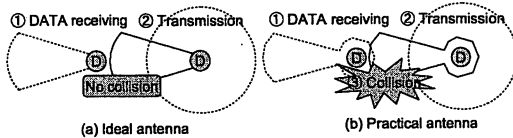


図13 EC-modeでの隠れ端末の送信による衝突

5.4. 指向性隠れ端末の送信による衝突

EC-modeでは、RTSは高送信電力で送信される。これは、EC-modeが無指向性送信-無指向性受信で2ホップ必要な端末と指向性送信-指向性受信で1ホップで通信するためである。宛先端末が無指向性で待機しているときのみ送信電力を高くし、指向性送信-無指向性受信1ホップで無指向性送信-無指向性受信で2ホップ必要な端末と直接通信を可能にする。RTSの送信電力は宛先端末が無指向性で受信する場合に、無指向性送信-無指向性受信で2ホップ必要な端末と通信を可能としている。そのため、周辺端末の受信メインローブとRTS送信端末の送信メインローブが向き合った場合、無指向性送信-無指向性受信で2ホップ以上の端末にまで通信が可能となってしまう。図14に例を示す。端末Dは端末SからのDATAを指向性で受信している。このとき、端末Xは無指向性送信では直接通信不可能な端末Sに指向性かつ高送信電力でRTSを送信する。この場合、無指向性通信で2ホップよりも離れた端末Dにまで影響を与えてしまう。この問題は、DMAC, MMACにおいても起こる問題である。

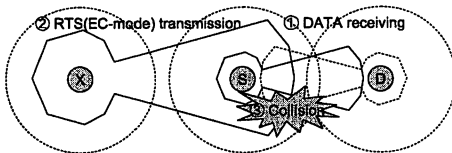


図14 指向性隠れ端末の送信による衝突

6. 提案方式

本章では、実アンテナの使用を仮定した指向性MACプロトコルを提案する。提案方式はSWAMPをベースとし、サイドローブ、バックローブによる影響、指向性隠れ端末による影響に対処する。SWAMP同様二つのアクセスモードを使用し、空間利用効率の向上、通信エリアの拡張を行う。指向性制御に必要な位置情報は、プロトコル内で取得する。

6.1. 必要条件

前章で述べた衝突原因のうち、5.1はNAV時間を短縮するために起こる問題であり、DNAVを設定することによって解決できると考えられる。5.2~5.4については、NAVが通信に影響を与える周辺端末すべてに設定されないために起こる問題である。NAVが適切に設定されない原因を次に示す。

1. コントロールフレーム受信ビームパターンと

RTS送信ビームパターンが異なる。

2. NAVを設定するコントロールフレーム送信ビームパターンとDATA受信ビームパターンが異なる。
3. コントロールフレーム送信電力とRTS送信電力が異なる。

これらを解決するために、二つのことが必要であると考えられる。一つ目は、コントロールフレームの受信を指向性で行うことである。これにより、1が解決される。二つ目は、DATA受信ビームパターンと同ビームパターン、EC-modeのRTSと同送信電力でNAVをセットすることである。これにより、2,3が解決される。この二つを行うことで、通信に影響を与える周辺端末にNAVをセットすることができると考えられる。

6.2. 指向性巡回待機

コントロールフレームの受信を指向性で行うため指向性巡回待機を提案する。図15に示すように、アイドル状態では、各端末は指向性ビームを巡回させながら待機する。指向性ビームを360度回転させるために必要な時間は $200\mu s$ である[7]。そのため、各コントロールフレームのプリアンプルの前に $200\mu s$ のプリアンプル α を付加し、プリアンプル α を受信した端末は回転を停止し、受信を開始するようにする。SOF(OC-mode)またはRTS(EC-mode)を受信した周辺端末は、その後に行われるDATA送信が終了するまで、受信した方向からの信号は受信しない。これは、通信時間の長いDATAを受信することで、他の周辺端末からのコントロールフレームを受信できなくなることを軽減させるためである。

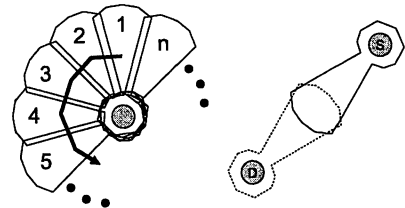


図15 指向性巡回待機

6.3. NAVリクエストフレーム

DATA受信ビームパターンと同ビームパターン、EC-modeのRTSと同送信電力で送信するコントロールフレームをNAVリクエストフレームと定義する。具体的には、OC-modeのRTR(Ready To Receive)、EC-modeのCTSである。RTRはSWAMPに新たに追加したコントロールフレームである。周辺端末に最も影響を与える可能性のあるコントロールフレームはEC-modeのRTSである。そのため、図16に示すように、DATA受信端末がDATA受信と同ビームパターン、EC-modeのRTSと同送信電力で送信し、周辺端末にNAVを設定する。NAVリクエストフレームを受信した周辺端末が、受信したビームパターンと同ビームパターンでEC-modeのRTSを送信した場合、この送信はDATA受信と衝突することになる。従って、NAVリクエストフレームを受信した周辺端末は、受信した方向へDNAVを設定し、送信を延期する。

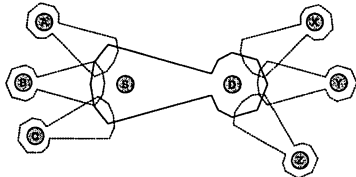


図16 NAV リクエストフレーム

6.4. 送信電力制御

提案方式では三つの送信電力を仮定する。送信電力、送信ビームパターン、受信ビームパターン、通信距離を表1に示す。周辺端末は指向性ビームを巡回させ、受信はすべて指向性で行われる。通信距離は送受信ビームのメインローブを向け合った場合の最大通信距離である。

表1 送信電力

送信電力	送信ビームパターン	受信ビームパターン	通信距離
P_{iO}	無指向性	指向性	d
P_{iD_1}	指向性	指向性	d
P_{iD_2}	指向性	指向性	$2d$

6.5. OC-mode

OC-mode のシーケンスチャートを図17(a)に示す。OC-mode は、宛先端末の位置情報を取得していない場合、無指向性送信1ホップで通信可能な場合に選択される。OC-modeでの最大通信距離は d である。提案方式では、NAV リクエストフレームとして RTR を SWAMP に追加している。

RTS/CTS/SOF は、送信電力 P_{iO} の無指向性ビームで送信する。SOF 通信終了後、宛先端末 D は RTR を送信電力 P_{iD_2} の指向性ビームで送信する。RTS, CTS, SOF を受信した周辺端末は RTR 終了まで、RTR を受信した周辺端末は ACK 終了まで DNAV を設定する。DATA/ACK は送信電力 P_{iD_1} の指向性ビームで送信する。

OC-mode では、空間利用効率の向上を図っている。なお、EC-mode で使用する位置情報の解決方法は SWAMP と同様である。

6.6. EC-mode

EC-mode のシーケンスチャートを図17(b)に示す。EC-mode は、OC-mode により宛先端末の位置情報を取得している場合に選択される。EC-modeでの最大通信距離は $2d$ である。EC-modeでは、CTS が NAV リクエストフレームとなる。

通信は RTS/CTS/DATA/ACK で行われ、すべてのフレームは送信電力 P_{iD_2} の指向性ビームで送信する。

EC-mode では、空間利用効率を向上させるとともに、ホップ数の削減も行っている。

7. 性能評価

本章では、提案方式の性能評価を行う。シミュレーションパラメータは基礎評価と同様である。パケット

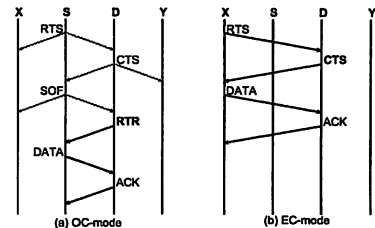


図17 シーケンスチャート

発生率に対するスループットを図18に示す。実アンテナパターンを用いた SWAMP と比較し、約1.5倍の性能改善がなされていることがわかる。実アンテナパターンを用いた SWAMP は DATA 通信中の衝突が多いため、スループット性能が低下してしまう。提案方式では、指向性巡回待機、NAV リクエストフレーム送信により、DATA 受信中の衝突を減少させることにより、スループット性能を改善している。

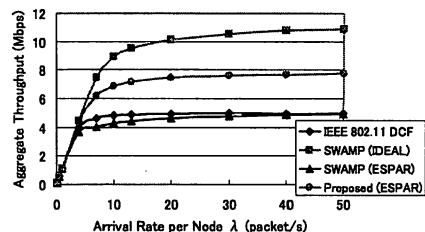


図18 スループット性能

8. おわりに

本論文では、既存の指向性 MAC プロトコルについて実アンテナパターンを用いて評価し、Omni-NAV, OC-mode における隠れ端末、EC-mode における隠れ端末、指向性隠れ端末による問題を明らかにした。これらの問題に対処するため、指向性巡回待機、NAV リクエストフレーム送信を行う指向性 MAC プロトコルを提案した。シミュレーション評価では、提案方式のスループット性能が向上することを示した。

参考文献

- [1] R. Jurdak, C. V. Lopes and P. Baldi, "A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad Hoc Networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol.6, no.1, First Quarter 2004.
- [2] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," 1999.
- [3] S. Chandran (Ed), "Adaptive Antenna Arrays Trends and Applications," Springer, pp.184-204, 2004.
- [4] R. R. Choudhury, S. Yang, R. Ramanathan and N. H. Vaidya, "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks," Proc. ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp.59-70, Sep. 2002.
- [5] M. Takai, J. Martin, A. Ren and R. Bagrodia, "Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc), pp.183-193, 2002.
- [6] 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, DECEMBER 2004.
- [7] T. Ueda, S. Tanaka, D. Saha, S. Roy, and S. Bandyopadhyay, "Location-Aware Power-Efficient Directional MAC Protocol in Ad Hoc Networks Using Directional Antenna," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, No.3, pp.1169-1181, March 2005.