

## アドホックネットワークにおいてスマートアンテナを利用したMACプロトコルの特性評価

高田 昌忠<sup>†</sup> 長島 勝城<sup>†</sup> 渡辺 尚<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>静岡大学大学院情報学研究所 <sup>‡</sup>静岡大学情報学部

**あらまし** 無線アドホックネットワークにおいて無線媒体の効率的利用は重要な課題である。従来MACプロトコルの多くは無指向性アンテナを前提としている。一方、スマートアンテナの利用は干渉の低減・空間利用効率の向上・通信エリアの拡張を提供でき性能改善が見込める。そこで我々はスマートアンテナを利用したアドホックネットワーク MAC プロトコル SWAMP を提案している。SWAMP は IEEE 802.11 DCF をベースとして設計されており、2種類のアクセスモードと4種のアンテナビームフォームを効果的に用いることで空間利用効率の向上と通信エリアの拡張の両方を実現する。また、近隣端末の位置情報の取得・更新を解決する。本稿では計算機シミュレーションによる性能評価を実施し、SWAMP のスループット・チャンネル利用率・オーバーヘッド特性を明らかにする。また、ビーム幅・再送回数・近隣端末位置情報を格納するテーブルの有効期間を表す TTL (Time To Live) 値が SWAMP の性能に与える影響に関してそれぞれ検討を行う。

**キーワード** アドホックネットワーク, メディアアクセス制御, スマートアンテナ, IEEE 802.11

### Characteristics Evaluation of a MAC Protocol Using Smart Antennas in Ad Hoc Networks

Masanori TAKATA<sup>†</sup>

Katsushiro NAGASHIMA<sup>†</sup>

Takashi WATANABE<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Information, Shizuoka University

<sup>‡</sup>Faculty of Information, Shizuoka University

**Abstract** In wireless ad hoc networks, one essential issue is how to improve the channel utilization of a wireless channel and its throughput. The previous research on wireless ad hoc networks typically assumed the use of omni-directional antennas. On the other hand, using smart antennas may offer some benefits compared with omni-directional antennas, e.g., interference reduction, spatial reuse enhancement of the wireless channel and the transmission range extension. We have proposed a MAC protocol for ad hoc networks using smart antennas, called SWAMP based on IEEE 802.11 DCF. It consists of two access modes and uses four beamform patterns effectively to obtain the spatial reuse of the wireless channel and a wider transmission range, and it contains a method of obtaining location information on its neighbors. This paper evaluates SWAMP through simulation studies in terms of throughput, channel utilization and overhead characteristics. Parameters, such as TTL, retry limit and beam width, are also examined.

**Keyword** Ad Hoc Networks, Medium Access Control, Smart Antennas, IEEE 802.11

#### 1. はじめに

近年の無線通信技術の進歩と無線機器の普及に伴い、無線アドホックネットワークの研究が盛んに行われている [1]。無線アドホックネットワークとは既存のインフラを必要とせず移動可能な無線端末だけで一時的に構築されるネットワークである。無線アドホックネットワークでは全端末が 1 つの無線チャンネルを共有するため、無線媒体の効率的利用は重要課題の 1 つである。

従来無線アドホックネットワークにおいて無指向性アンテナの利用が前提とされてきた。IEEE 802.11 DCF [2] に代表される MAC プロトコルも無指向性アンテナの利用を前提として設計されているため、空間利用の効率が低く、MAC プロトコルの性能がボトルネッ

クとなりネットワーク全体の性能を制限することが指摘されている [3]。

そこでスマートアンテナが注目を集めている [4]。一般にスマートアンテナは以下の特徴を持つことで知られる。第 1 に、希望する方向へアンテナの指向性を制御することが可能であり、干渉低減により同時通信数を増加させることができる。第 2 に、主ビーム幅を絞ることによりアンテナ利得を上げたビームはより遠くの端末との直接通信を可能にし、通信エリアを拡張することができる。

我々は無線アドホックネットワークでこのスマートアンテナの 2 つの特徴を考慮した MAC プロトコル SWAMP (Smart antennas based Wider-range Access

MAC Protocol)を提案している [5] . SWAMPはIEEE 802.11 DCFをベースとし2種類のアクセスモードを併用することで空間利用効率の向上と通信エリアの拡張を同時に提供し、ネットワーク全体のスループット性能を改善する。また、指向性を制御するために必要な近隣端末位置情報の取得・更新を解決する。本稿では計算機シミュレーションによる性能評価を実施し、SWAMPのスループット・チャネル利用率・オーバーヘッド特性を明らかにするとともに、ビーム幅・再送回数・近隣端末情報の有効期間を表すテーブルのTTL値がSWAMPの性能に与える影響に関して検討を行う。

## 2. 関連研究

IEEE 802.11 DCF [2] はアクセス方式にCSMA/CAを用いた分散型MACプロトコルであり、無線アドホックネットワークの研究で最も多く利用されている。データ送信に先立って行われるRTS/CTSフレーム交換で近隣ノードはNAV (Network Allocation Vector)を設定し、現在行われている通信を妨害しないようにする仮想キャリアセンス機構を持つ。これにより隠れ端末問題を軽減するものの、さらし端末問題が発生する。従って無指向性アンテナを用いるIEEE 802.11は1つの通信を行うために多くの空間(メディア)を占有し、同一周波数における空間利用効率は非常に低くなる。

そこで近年、IEEE 802.11 DCFをベースとしスマートアンテナによる指向性ビームを適用したMACプロトコルの提案がなされている。

DMAC (Directional MAC) [6] ではCTSを除く全フレームが指向性ビームを用いて送信される。また、仮想キャリアセンスとして、受信した方向にのみNAVを設定するDNAV (Directional NAV)が提案された。これによって同時通信数の増加による性能改善が示された。[7]では、DMACを拡張したMMAC (Multihop RTS MAC)が提案された。これはRTSのみを近隣ノードで中継させ以降の通信は離れたノードとの直接通信を行い、通信エリアの拡張を実現するプロトコルである。これによってマルチホップ伝送時のホップ数減少による性能改善が示された。しかしこれらのプロトコルは宛先ノードの正確なGPS位置情報やRTSを中継するルート等が予め取得できていることを前提としているため、これらを取得するために必要なオーバーヘッドに関して考慮されていない。

それに対し、RTS/CTS交換を無指向性ビームで行いAOA (Angle Of Arrival)を算出することにより、続くDATA/ACKは指向性通信を行うプロトコルが提案された [8, 9, 10]。これらによって空間利用効率の向上が達

成されたが、得られる方向情報は無指向性ビームでの通信エリア内(以降、無指向性通信エリア)のノードに制限され、スマートアンテナのもう1つの特徴である通信エリアの拡張には対応していない。

[11, 12, 13]は、無指向性通信エリア外のノードの方向情報を取得する方法を提案し、通信エリアの拡張に試みた。これらは無指向性ビームよりも高利得な指向性ビームを用いて全方位走査(rotation beam)を行う。しかしこの全方位走査は1周させるために複数回の送信が必要であり、オーバーヘッドが増加する。また、[11]ではHELLOパケットの定期的な送信がノード密度の増加と共にスループットの低下をもたらすことが示されている。従って、スループット向上のためには少ないオーバーヘッドで近隣トポロジを学習する必要がある。

我々が提案しているSWAMPはこれらのプロトコルとは異なり、オーバーヘッドを少なくするため端末位置情報の取得に高利得指向性ビームを使用せず、無指向性ビームだけを用いて通信エリアに対応した端末位置情報の取得が可能である。

## 3. SWAMP

SWAMP [5]はIEEE 802.11 DCFをベースとし、2種類のアクセスモードと4種のアンテナビームフォームを効果的に用いることによって空間利用効率の向上と通信エリアの拡張に対応したプロトコルである。OC-mode (Omni-directional Communication area access mode)は宛先ノードが近隣に位置する場合、または位置が分からない場合に選択され、空間利用効率の向上と周辺への位置情報の通知を目的としている。一方、EC-mode (Extended Communication area access mode)は宛先ノードが無指向性通信エリア外に位置する場合にテーブル情報に基づいて直接通信を行い、通信エリアの拡張を目的としている。この2つのアクセスモードは、通信開始時に宛先ノードの位置情報が送信元ノードのテーブルに格納されているか否かでどちらかが選択される。以下でSWAMPについて述べる。

### 3. 1. アンテナモデル

SWAMPで用いる4種類のアンテナビームフォームを図1に示す。dは無指向性ビームでの最大通信距離を示している。図1において左側が送信時ビームフォーム、右側が受信時ビームフォームを表し、送信側のビームフォームと受信側のビームフォームが重なった場合に受信信号の復調に十分な受信電力が得られることを表している。任意の方向へこれらのビームフォームが形成可能であり、少なくともIEEE 802.11 DCFにおけるSIFS

(Short Inter Frame Space) [2] の間に制御可能であると仮定する。

一般的なアンテナの指向性は、ビーム幅を狭くするほど送信電力が集中され、アンテナ利得が高くなる性質を持つ。従って、図 1 の場合  $\alpha > \beta > \gamma$  となる。ビーム幅が SWAMP の性能に与える影響に関しては 4.2 節で検討する。

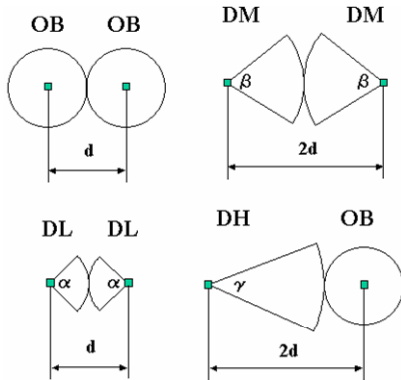


図 1. スマートアンテナビームフォーム  
 左側：送信時ビームフォーム  
 右側：受信時ビームフォーム

- 無指向性ビームフォーム (OB)  
 全方位に対し利得  $G_o$ . 同アンテナ対向により距離  $d$  での通信が可能
- 指向性ビームフォーム 1 (DL)  
 ビーム幅  $\alpha$ . 利得  $G_o$ . 同アンテナ対向により距離  $d$  での通信が可能
- 指向性ビームフォーム 2 (DM)  
 ビーム幅  $\beta$ . 利得  $G_m (>G_o)$ . 同アンテナ対向により距離  $2d$  での通信が可能
- 指向性ビームフォーム 3 (DH)  
 ビーム幅  $\gamma$ . 利得  $G_h (>G_m)$ . 利得  $G_o$  アンテナとの対向により距離  $2d$  での通信が可能

### 3. 2. OC-mode

OC-mode は無指向性通信エリア内に位置するノード宛の通信を想定して設計されたアクセスモードである。宛先ノードの位置が分からない場合 OC-mode が選択される。図 2 に送信元ノードを B、宛先ノードを C としたときの OC-mode フレームシーケンスとフレーム送信に使用するビームフォームを示す。OC-mode は無指向性の制御フレームと指向性のデータフレームから構成される。まず送信元 B はアンテナの指向性制御に必要な宛先ノードの位置情報を取得する必要がある。同様に宛先ノードにも送信元ノードの位置情報が必要である。従って、無指向性ビームフォームで送信される

RTS/CTS に自身の位置情報を付加し、交換することにより互いの位置情報を取得する。これによって得られた通信相手の位置情報を更に近隣ノードへ配布する。この情報を NHDI (Next Hop Direction Information) と呼ぶ。宛先ノード C は送信元ノード B の位置情報を CTS の NHDI フィールドに付加する。送信元ノード B は近隣ノードへ宛先ノード C の位置情報を配布するために CTS 受信後、SOF (Start Of Frame) を追加し送信する。これにより、NHDI を受信した近隣ノード A、D は無指向性通信エリア外のノード C、B の位置情報をそれぞれ取得することができる。取得した NHDI は NHDI テーブル (表 1) に格納され、この情報は EC-mode 通信を行う際に使用される (3.3 節)。SOF 送信後、DATA/ACK はオンデマンドに取得した方向情報に従い、利得増加のない指向性ビーム DL の主ビームを通信相手方向へ向け合うことで送受信される。

従来 IEEE 802.11 DCF では隠れ端末であった D やさらし端末であった A は NAV を設定するため通信を行うことができない。これが空間利用効率を低下させてきた。一方、OC-mode では DATA/ACK の指向性通信が開始されると、A や D が送信しても B-D 間の通信と干渉することはないため omni-NAV 満了後自身の通信を開始することができる (図 3)。この結果、従来よりも通信遅延期間を短縮することができ、空間利用効率を向上させる効果がある。

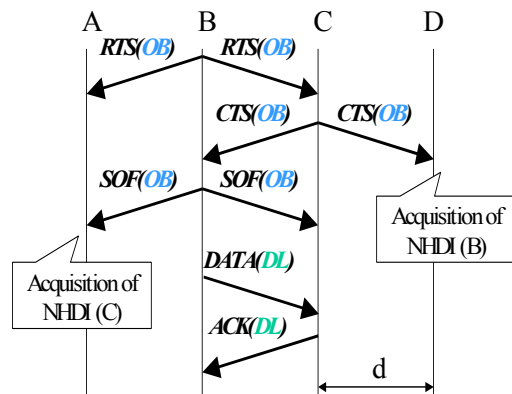


図 2. OC-mode フレームシーケンス (B to C)

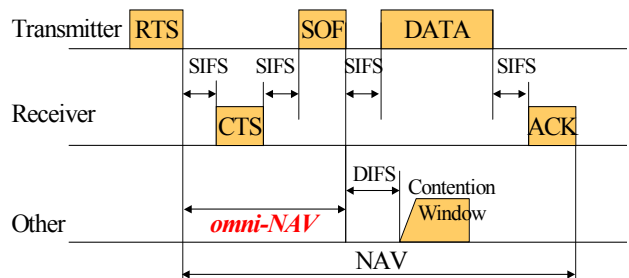


図 3. SOF フレームと omni-NAV

表 1. NHDI テーブル

Node ID	NHDI	TTL
Node(N1)	L <sub>N1</sub>	225
Node(N2)	L <sub>N2</sub>	ttl_init
Node(N3)	L <sub>N3</sub>	0

### 3. 3. EC-mode

EC-mode は無指向性通信エリア外に位置し, NHDI を取得済みのノード宛の通信で用いられる. 図 4 に送信元ノードを A, 宛先ノードを C としたときの EC-mode フレームシーケンスとフレーム送信に使用するビームフォームを示す. 送信元 A は以前取得した NHDI から宛先ノード C の方向を算出し, その方向へ指向性ビームを形成し RTS を送信する. 各ノードはアイドル状態のとき無指向性ビームで待機しているため, EC-mode 通信を要求する RTS フレームは最も高利得な DH を用いる. その後の通信は DM の主ビームを通信相手方向へ向け合うことで送受信される. 規定回数の再送に失敗した場合, NHDI テーブルから宛先ノード情報を削除し OC-mode による再送を試みる. EC-mode の再送回数が SWAMP 全体の性能に与える影響は 4.2 節で調査する.

このように EC-mode は, 以前近隣で行われた OC-mode 通信によって得られた NHDI を基に全フレームに対し指向性ビームを用いることによって通信エリアを無指向性通信エリアの 2 倍に拡張する. しかし, 移動環境下においては実際の宛先ノードの位置と NHDI にはギャップが生じることが考えられる. 従って情報の有効期間を表す NHDI テーブルの TTL 値が重要なパラメータとなる. これに関しては 4.2 節で検討する.

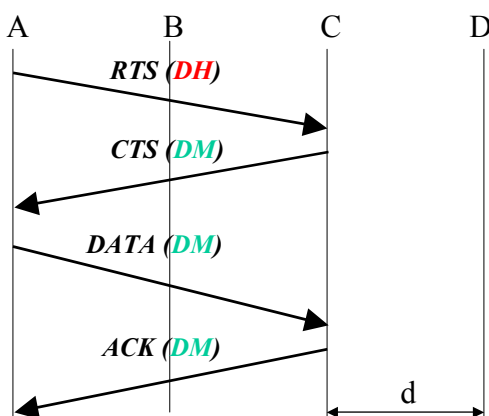
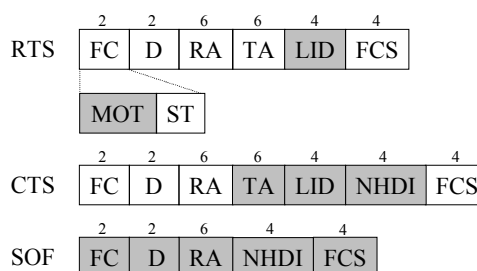


図 4. EC-mode フレームシーケンス (A to C)

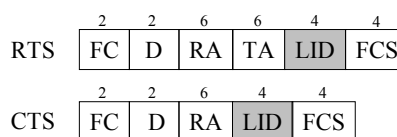
### 3. 4. フレームフォーマット

SWAMP はアンテナの指向性制御に必要な近隣ノードの位置情報の取得・更新を行うために IEEE 802.11 の制御フレームを拡張する. 図 5 に SWAMP のフレームフォーマットを示す. 色づけされたフィールドが拡張部分であり, フィールド長の単位は Byte である. FC フィールドの MOT 及び ST によりアクセスモードとフレーム種別を識別する. DATA 及び ACK フレームは IEEE 802.11 から変更はない. 制御フレームの拡張によるオーバーヘッドの増加に関しては 4.1 節で考察する.

#### OC-mode Control Frames



#### EC-mode Control Frames



- FC : *Frame Control*
- MOT : *Mode type*  
(OC-mode, EC-mode)
- ST : *Subtype (RTS, CTS, SOF)*
- D : *Duration*
- RA : *Receiver Address*
- TA : *Transmitter Address*
- LID : *Location ID*  
(own location information)
- NHDI : *Next Hop Direction Information*
- FCS : *Frame Check Sequence*

図 5. フレームフォーマット

### 4. 特性評価

計算機シミュレーションにより SWAMP の特性を評価する. 共通シミュレーション仮定を表 2 に示す.

本評価では指向性ビームによるメディアアクセス制御の効果に注目するために, 伝送路特性としては自由空間伝播に基づく距離減衰のみを考慮し, フェージングや

シャドウイングによる損失は無視した。アンテナモデルは図 1 を用い、主ビームの角度内でのみ送信及び受信が可能であるとした。フレームフォーマットは図 5 に基づく。記載していないその他のパラメータについては IEEE 802.11 (直接拡散方式) [2] の規定値に従う。我々が提案している SWAMP は OC-mode と EC-mode を併用する方式 (以降, SWAMP (OC+EC)) であるが, SWAMP の特性を詳細に分析するため, 全通信に対して OC-mode のみを利用する方式 (以降, SWAMP (OC)) についても測定を行った。また, 比較のため無指向性アンテナを用いる IEEE 802.11 DCF についても同様の評価を行った。

表 2. シミュレーション仮定

ペイロードサイズ	512 Bytes
無指向性通信距離 (d)	250 m
ビーム幅	45 degrees
最大再送回数 (OC / EC)	7 回 / 4 回
無線帯域	2 Mbps
シミュレーション時間	300 sec

#### 4. 1. 基本特性評価

400 ノードが 20×20 の格子状に配置され, 格子間隔は 250m とした。データパケットは全ノードにおいてパラメータ λ によるポアソン分布に従い発生し, 500m 内の 12 近隣ノードからパケット毎にランダムに宛先が決定される (図 6)。SWAMP (OC+EC) は 250m 以内の宛先へは OC-mode を, それより離れた宛先へは EC-mode を選択して 1 ホップで転送する。一方, IEEE 802.11 と SWAMP (OC) は 250m より離れたノード宛の場合, 予め設定されたノードを中継し 2 ホップで転送する。

性能指標として, 1 ノード当たりの負荷に対するスループット, 同時通信数及びオーバーヘッドを用いる。それぞれの指標は無線帯域  $W$  [bps], ノード  $j$  における受信データパケット数  $N_{rcv\_data,j}$ , 総受信ビット数  $L_{rcv,j}$  [bit], 総送信ビット数  $L_{send,j}$  [bit], 総受信ペイロードビット数  $L_{rcv\_data,j}$  [bit], ペイロードサイズ  $D$  [bit], ノード数  $m$ , シミュレーション時間  $T_{simulation}$  [sec] を用いて式 (1), (2), (3) で定義される。

$$\text{スループット } \uparrow [\text{bps}] = \frac{\sum_j^m (N_{rcv\_data,j} \times D)}{T_{simulation}} \quad (1)$$

$$\text{同時通信数} = \frac{\sum_j^m L_{rcv,j}}{W \times T_{simulation}} \quad (2)$$

$$\text{オーバーヘッド} = \frac{\sum_j^m L_{send,j}}{\sum_j^m L_{rcv\_data,j}} \quad (3)$$

図 7 にスループット特性を示す。いずれの方式も負荷の増加に伴いスループットが飽和しており, この値が各方式のネットワーク容量と考えることができる。IEEE 802.11 に比べ, SWAMP (OC) は約 200% の性能改善が確認できた。この性能改善は, 従来の NAV よりも短い omni-NAV 及び指向性ビームの導入により通信延期期間が短縮されたことで, ネットワーク空間上により多くのペアがお互いに干渉することなく同時に通信が行われたためである。つまり, IEEE 802.11 では干渉を防ぐために全シーケンスが終了するまで隠れ端末・さらし端末は通信を開始することができないが, OC-mode でこれらのノードは新たな通信を開始することができるためである。さらに EC-mode を併用する SWAMP (OC+EC) はスループットが約 400% 向上し, 約 4 倍のネットワーク容量を実現している。これは, 他の方式が 2 ホップ必要な宛先ノードに対して EC-mode 通信で直接伝送を行い, 帯域の消費を少なくすることができるからである。従って, SWAMP は 2 つのアクセスモードを併用することによって空間利用効率の向上と通信エリア拡張の効果を同時に提供し, ネットワーク容量を大幅に増加させることが示された。

図 8 に同時通信数を示す。同時通信数は 1 ビット伝送時間にネットワーク空間で正常に伝送されたデータ量であり, これはチャネル利用率を表す。SWAMP (OC) は IEEE 802.11 に比べ約 2 倍に向上している。空間上に同時により多くの通信ペアが存在することができ, チャネル利用率の向上がスループットの改善につながっている。一方, SWAMP (OC+EC) は通信エリア拡張の効果から 2 ホップ必要な通信を 1 ホップで実現するために同時通信数は SWAMP (OC) と比較して低い。遠くのノードと直接通信するためには高利得な指向性ビームを必要とし, より多くの近隣ノードに影響を与え, コンテンションが生じると考えられる。しかし図 7 と図 8 は EC-mode が少ない帯域の消費で高いスループット,

ネットワーク容量を実現できることを示している。

図9にオーバーヘッド特性を示す。オーバーヘッドは、ペイロード1ビットを転送するために送信されたビット数を表し、オーバーヘッド1が理想的な通信である。

SWAMPは位置情報を近隣に通知するためにIEEE 802.11のRTS, CTSフレームの拡張(フィールドの追加), SOFフレームの追加を行っている(図5フレームフォーマット)。ペイロードサイズを512 Bytesとしたときの最小オーバーヘッドは各方式において以下の通りである。

- IEEE 802.11  
 $(RTS + CTS + DATA + ACK) / \text{payload}$   
 $= (20 + 14 + 546 + 14) / 512$   
 $= 1.16$
- OC-mode  
 $(RTS + CTS + SOF + DATA + ACK) / \text{payload}$   
 $= (24 + 28 + 18 + 546 + 14) / 512$   
 $= 1.23$
- EC-mode  
 $(RTS + CTS + DATA + ACK) / \text{payload}$   
 $= (24 + 18 + 546 + 14) / 512$   
 $= 1.18$

これにより低負荷時にはIEEE 802.11と比較してSWAMPのオーバーヘッドはわずかに大きい。しかし、中高負荷時においてIEEE 802.11は送信失敗によってオーバーヘッドが著しく増加している。一方、SWAMPは、中高負荷時におけるオーバーヘッドの増加が少ない。これはネットワーク容量が増加したため、送信失敗によるオーバーヘッドの増加が少ないためである。このことから、IEEE 802.11と比較しSWAMPには追加したオーバーヘッドがあるものの、それを上回る性能改善がなされていると言える。

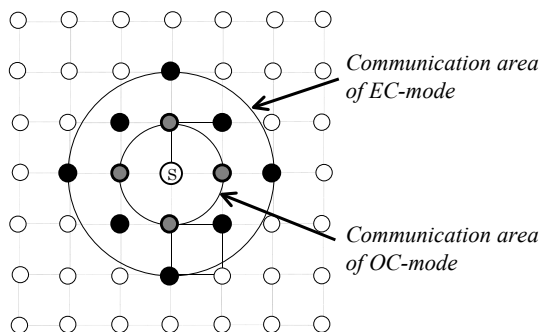


図6. グリッドトポロジモデル

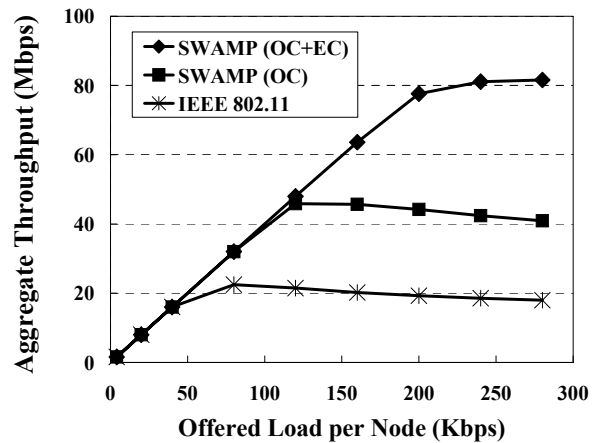


図7. スループット特性

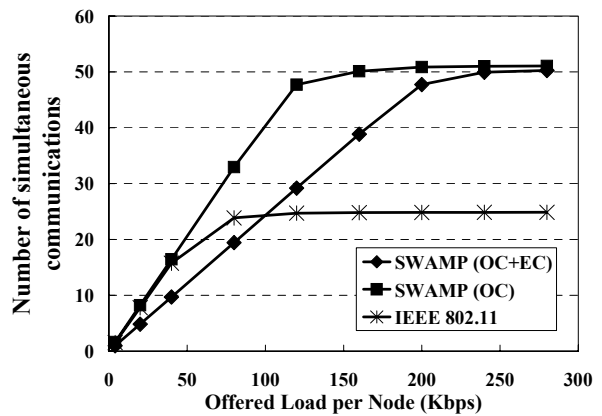


図8. 同時通信数

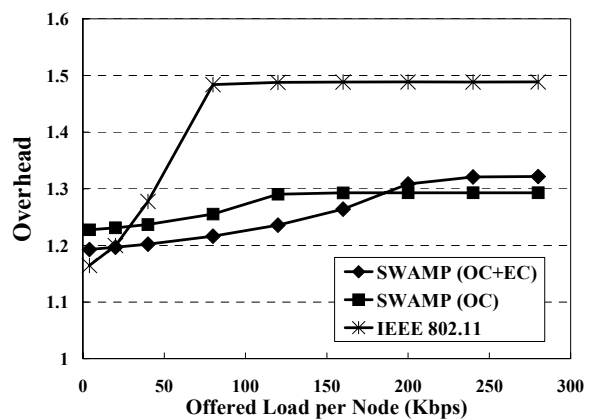


図9. オーバーヘッド特性

#### 4. 2. パラメータ条件に関する検討

以降、ノードの移動を考慮したモデルを想定し各パラメータがSWAMPの性能に与える影響を検討する。600m×600mのエリアで20ノードがランダムウェイポイントモデル[1]に従い移動する。移動モデルにお

る最大移動速度は 40km/h, ポーズタイムは 0 [s]とした。データパケットは全ノードにおいてパラメータによるポアソン分布に従い発生し, パケット毎にネットワーク空間からランダムに宛先が決定される。MAC プロトコルにおいて最大再送回数を越えたデータは廃棄される。

このモデルでの SWAMP の性能評価は[5]で行われ, IEEE 802.11 と比較し負荷量に対するスループット特性の改善, ノード数に対するスケラビリティに関して報告されている。ここでは, 性能に影響を与えるパラメータとしてビーム幅, 最大再送回数及び NHDI テーブルの TTL 値に関する検討を行う。

#### 4.2.1 ビーム幅に関する検討

図 10 は異なるアングルセットを用いたときの SWAMP の正規化したスループットを示す。アングルセット 30/20/15 はそれぞれ図 1 の DL/DM/DH のビーム幅 [degree] を表す。ネットワーク負荷 200Kbps を境にそれよりも低負荷時は大きなアングルセットほど性能が良く, それよりも高負荷時は逆に小さなアングルセットほど性能が良い。これは NHDI テーブルの情報の信頼度 (情報の新しさ) と密接に関係する。SWAMP では近隣で行われた OC-mode 通信を聞くことによって 2 ホップ離れたノードを学習する。そのため, 低負荷時には近隣で行われる OC-mode が少なく NHDI テーブルの更新頻度が低い。従って古い情報に基づいて EC-mode を行う場合, 実際の宛先ノードの位置と NHDI との間にギャップが生じる。これは宛先ノードが移動するためである。しかし, ビーム幅の広い指向性ビームであれば形成するビームの領域内に宛先ノードが存在する確率が増え, 送信が成功する可能性が高くなる。一方, 高負荷時には近隣で頻繁に OC-mode が行われることから NHDI テーブルの更新頻度が高く, テーブル情報は新しく信頼性がある。このときビーム幅の狭い指向性ビームを利用したとしても, 高い確率で宛先ノードがビームの領域内に存在する。従って, テーブル情報が新しく信頼性がある場合はよりビーム幅の狭い指向性ビームを利用して空間利用効率を向上させることができる。

以上から, ネットワーク負荷に応じて指向性ビームの形状を適応制御することで更なる性能向上が見込めることが分かった。一方, ビーム幅の最適値は移動速度にも影響を受けるため, 適応制御には移動度と負荷量を考慮する必要がある。

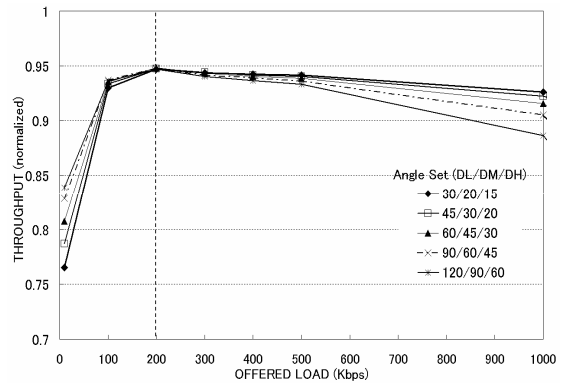


図 10. ビーム幅とスループットの関係

#### 4.2.2 最大再送回数に関する検討

図 11 はネットワーク負荷を 2Mbps に固定し, EC-mode の最大再送回数の設定値を変化させた場合のスループット及び EC-mode の到達率を示す。再送回数が増えるにつれ到達率が高くなるが, 多くの再送はバックオフ時間の増加と無線チャネルの占有を招き, 結果スループットを低下させる。従って, 最大スループットを得るためには EC-mode 最大再送回数を 4 から 6 の間で設定するのが望ましいことが分かる。

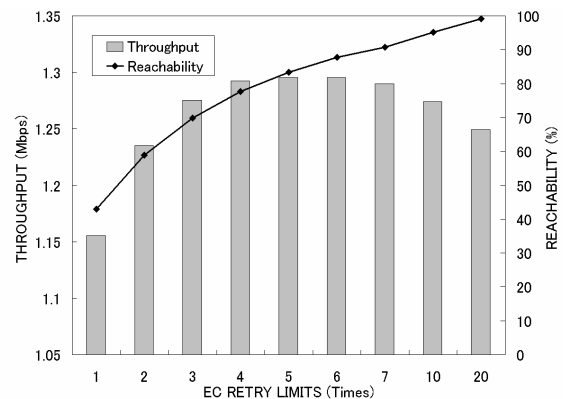


図 11. EC-mode 再送回数とスループット及び到達率

#### 4.2.3 NHDI テーブルの TTL 値に関する検討

近隣ノードから取得した 2 ホップ先のノードの位置情報である NHDI は自身の NHDI テーブルに格納される。テーブルには情報の新しさを識別するために TTL フィールドが存在する。新規で格納するときは `ttl_init` (初期値) を設定する。TTL は時間経過とともにデクリメントされ, 0 になった時点で対応するノード情報がテーブルから削除される。既に登録されているノードに対応する NHDI を取得した場合は, 登録情報を更新し TTL を初期値へ戻す。

TTL の初期値 `ttl_init` が SWAMP に与える影響を調査するため, エリアサイズ 2000m×2000m, ノード数

50, 最大移動速度を 80km/h とし, 頻繁に近隣トポロジが変化するネットワークを仮定した.

図 12 はネットワーク負荷を 500Kbps に固定し, TTL の初期値を変化させた場合のスループット及び EC-mode の到達率を示す. TTL の初期値が大きい場合到達率が低下している. これはテーブル情報の更新頻度が少なく, 信頼性が低下したためである. 一方初期値が小さい場合, 高い到達率を達成している. これは古い情報を削除することでテーブル情報の信頼性が向上したためである. しかし, スループットはこのとき低下している. これは EC-mode 通信が減少し, EC-mode による性能改善の効果が得られないためである. 従って, NHDI テーブルの信頼性と性能改善はトレードオフの関係にあると言える. 最適値は NHDI の取得に影響するネットワーク負荷や移動度, 更にはアプリケーションやユーザが要求する QoS (Quality of Service) などを考慮する必要がある.

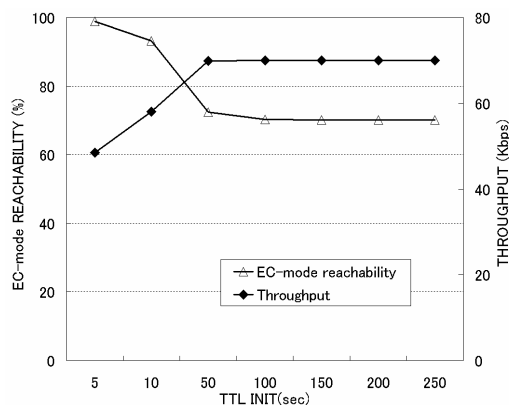


図 12. TTL とスループット及び到達率

## 5. むすび

本稿では計算機シミュレーションによる性能評価を実施し, SWAMP のスループット・チャンネル利用率・オーバーヘッド特性を明らかにした. 空間利用効率の向上と通信エリアの拡張の効果により, IEEE 802.11 DCF と比較して SWAMP が約 4 倍のネットワーク容量を実現することを示した. そして IEEE 802.11 に追加したオーバーヘッドがあるものの, それを上回る性能改善がなされたことを示した. また, ビーム幅・再送回数・NHDI テーブルの有効期間を表す TTL 値が SWAMP の性能に与える影響に関して検討を行った. これらのパラメータを適応制御するためにはネットワーク負荷や移動度を考慮して検討する必要があることが分かった.

今後, 今回の検討を基に SWAMP の拡張を行う.

## 参考文献

- [1] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva, "A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols", Proc. ACM Mobile Computing and Network (MobiCom), Oct. 1998.
- [2] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications", 1999.
- [3] S. Xu and T. Saadawi, "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, June 2001.
- [4] P. H. Lehne and M. Pettersen, "An Overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol.2, no.4, Fourth Quarter 1999.
- [5] 長島勝城, 高田昌忠, 渡辺尚, "スマートアンテナを利用したアドホックネットワーク MAC プロトコルの提案と評価", 信学技報, RCS2003-132, Oct. 2003
- [6] Y. -B. Ko, V. Shankarkumar and N. H. Vaidya, "Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks", Proc. IEEE INFOCOM, March 2000.
- [7] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N. H. Vaidya, "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks", Proc. ACM Mobile computing and Network (MobiCom), Sep. 2002.
- [8] N. S. Fahmy, T. D. Todd and V.Kezys, "Ad Hoc Networks with Smart Antennas using IEEE 802.11-Based Protocols", Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Oct. 2002.
- [9] A. Nasipuri, K. Li, and U. R. Sappidi, "Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas", Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (ICCCN), Oct. 2002.
- [10] 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), June 2002.
- [11] R. Ramanathan, "On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas", Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), Oct. 2001.
- [12] T. Korakis, G. Jakllari, L. Tassiulas, "A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks", Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), June 2003.
- [13] S. Bandyopadhyay, K. Hasuie, S. Horisawa, and S. Tawara, "An Adaptive MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Community Network (WACNet) Using Electronically Steerable Passive Array Radiator Antenna", IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Nov. 2001