

# マルチチャネル無線 LAN における MAC レベル ブロードキャストのオーバーヘッド削減手法の提案

松田 莉奈<sup>1</sup> 長嶺 淳子<sup>1</sup> 重安 哲也<sup>1</sup>

**概要:** マルチチャネル無線 LAN システムでは隣接する複数の送受信ペアがお互いに干渉を及ぼさないようにそれぞれ異なるチャネルを MAC プロトコルが割り当てる。その場合、同一時間にできる限り多くの送受信ペアに異なるチャネルに割り当てることで、ユニキャストトラフィックにおける資源利用効率は高くなる。しかしながら、そのような状況下では、ある送信端末に任意の時刻で着目した場合に同端末の周辺端末が自身と異なるチャネルを選択している確率が高くなることで、ブロードキャストを行った場合の受信成功率は低下する。これに対して B-MAC では、ブロードキャスト送信端末から広範囲の端末に対してブロードキャストの開始を宣言し、その後一定時間待機を行う手法をマルチチャネル無線 LAN システムにおけるブロードキャスト方式として提案しているが、同手法を採用すれば送信オーバーヘッドの増大を招いてしまう。そこで本稿では、これを改善するために受信側の準備完了状態をパルス信号により返信させることで、受信側の受信準備が完了していると確認できた場合には、送信開始時間を短縮することでオーバーヘッドを削減する手法を提案する。また、同手法の有効性を計算機シミュレーションによって評価した結果を報告する。

## 1. はじめに

複数の通信チャネルを切り替えながら DATA の送受信を行うことで、高いスループット性能を獲得するマルチチャネル無線 LAN (Local Area Network) システムがある。同システムでは、同時に複数の送受信ペアが、それぞれ異なるチャネルを用いて送受信を実施する [1]-[3]。

当然のことながら、マルチチャネル無線 LAN システムでは、同一時間にできるだけ多くのユニキャスト送受信ペアをそれぞれが互いに干渉を及ぼさないチャネルに効率良く割り当てるように MAC (Media Access Control) プロトコルが制御することで、システムとしての資源利用効率は高くなる。しかしながら、そのような状況下では、任意の時刻に任意の空きチャネルで送信された DATA を受信(傍受)できる端末数は少なくなる。結果として、一度の送信が隣接端末全てを宛先とする MAC レベルブロードキャストの実現は同システムにとって困難な課題となる。

代表的なマルチチャネル用の MAC プロトコルである CAM-MAC (Cooperative Asynchronous Multichannel MAC) [4] は、実際のユニキャストに先立ち制御チャネルでの交渉によって DATA 送信に使用するチャネルを決定

するプロトコルであるが、ブロードキャスト時の使用チャネル交渉機能は実装されていない。

CAM-MAC にブロードキャスト用のチャネル交渉機能を追加した B-MAC (Broadcast MAC) [5] は、1) 送信端末がブロードキャストの開始を宣言した後に一定時間待機し、現在、他のチャネルで送信中の端末がいたとしても、その送信が終了し制御チャネルを監視する状態に戻ると予想される最大時間まで待機すること、2) ブロードキャスト端末から 2hop 先の隠れ端末の送信を抑制するために通常のパケット送信時よりも広い範囲に向けてブロードキャストの開始を通知する BPRA (Broadcast PProbe-A) を送信することの 2 点を提案している。

しかしながら、B-MAC はブロードキャスト開始の宣言から実際の送信開始までの待機時間が送信オーバーヘッドを大きく増大させる。また、BPRA を受信した 2hop 先の端末の通信が一律に制限される。従って、実際は送信を行ったとしてもブロードキャストの受信に影響を与えない端末であっても BPRA を受信すれば不必要に送信が抑制されることで、結果として、チャネル利用効率を低下させる欠点がある。

そこで本稿では、これらの 2 点を改善する方式について検討する。具体的には、B-MAC におけるブロードキャスト宣言時に、隣接端末から受信準備完了を知らせるパルス

<sup>1</sup> 県立広島大学 経営情報学部  
Faculty of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima

信号を指定したスロットに返信させる。送信端末は全ての受信端末が受信可能状態になったことを同信号を検知することで確認できれば、送信開始までの待機時間を短縮し、ブロードキャストを早期に開始することでオーバヘッドを削減する。

以降、本稿を次のように構成する。2章では、既存のマルチチャネル用 MAC プロトコルの概要について述べ、同プロトコルが対処すべき一般的な問題について説明する。また、ブロードキャスト用マルチチャネル MAC プロトコルとして提案されている B-MAC についても詳述し、同方式の欠点を明らかにする。3章では、2章で示した問題点を解決するために提案する方式の制御方式について述べる。4章ではまず、提案方式におけるパルス信号の返信率とオーバヘッド削減率の関係について示した後、計算機シミュレーションを用いて、一般的なネットワークトポロジにおける性能を評価した結果を報告する。5章はまとめであり、本稿で得られた成果を総括する。

## 2. 関連研究

非同期ランデブー型のマルチチャネル無線 LAN において、新たな送信要求が生じた場合、送受信端末は、まず制御チャンネル上で DATA 送信時に使用するチャンネルを決定する。図1に同方式のチャンネル選択手法を示す。同図に示すように、RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 等の制御チャンネルで送信されるパケットに選択チャンネル番号を記載することで、送受信端末は互いに使用予定チャンネルの通知を行い、DATA はその通知に基づいたチャンネルで送信される。

ここで、周囲の端末は制御チャンネルを傍受することで選択されたチャンネル番号を知ることができるが、現在 DATA チャンネル上で送受信中の端末はこれを知ることができない(図1における (I) の期間)。そのため、そのような端末が、現在の送受信が終了した直後に連続して送受信を行う場合、複数の送受信ペアが同一チャンネルで DATA を送信してしまう可能性がある。そのような時、DATA パケットは衝突によって失われる。これをマルチチャネル隠れ端末問題という [1]。

### 2.1 CAM-MAC

CAM-MAC はマルチチャネル隠れ端末問題を軽減する手法を提案している。CAM-MAC では、新たな送信要求が発生した場合、制御チャンネル上でヘッダに DATA 送信チャンネルの選択情報を記録した PRA/PRB (PProbe-A/PProbe-B) を新規送受信端末間で交換することで、DATA 送信時に使用するチャンネルを交渉する(図2を参照)。

PRA/PRB 交換を傍受した隣接端末は、自端末のチャンネル使用テーブルを参照し、この新しい送受信が既に実施中の送受信ペアが使用している DATA 送信チャンネルと異なる

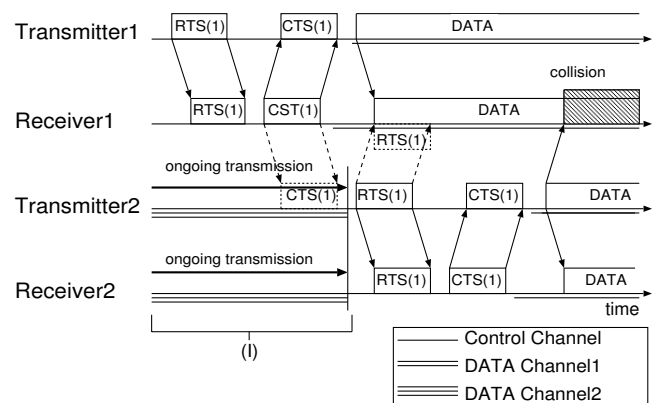


図1 非同期ランデブー型チャンネル選択手法とマルチチャネル隠れ端末問題

チャンネルを正しく選択しているかどうかをチェックする。もし、同一のチャンネルを誤って選択していた場合には、同一のチャンネルでの DATA 送信によるパケット衝突を回避するために、INV (INValid) を送信する。逆に、INV を受信することなく正しく PRB を受け取った場合、新規送受信端末は選択したチャンネルを利用できるとわかるため、その確認として CFA/CFB (ConFirm-A/ConFirm-B) を送受信端末間で交換するとともに、周辺端末にチャンネル交渉の成立とユニキャスト開始を通知する。

受信端末は CFB 送信後に、送信端末は CFB を受け取った後にそれぞれ DATA チャンネルへ移動し、DATA の送受信を行う。受信端末からの CFB を受信することができなかった時には、送信端末は周囲に通知した CFA の情報を無効にするための NCF (Negative ConFirmation) を送信し、バックオフ手続きに移る。

以上が CAM-MAC におけるチャンネル交渉手法であるが、これはユニキャストでは有効に機能するが、ブロードキャスト時に使用すると PRA に対する複数の PRB が送信端末上で互いに衝突するためにそもそも使用できない。また、高い密度で多くのユニキャスト送受信ペアに互いが干渉しないように異なる DATA 送信チャンネルが割り当てられている場合は、どのチャンネルを選択しても隣接端末全てを宛先としたブロードキャストを実施することは当然のことながら困難となる。

### 2.2 LBP

シングルチャンネルのブロードキャスト方式に LBP (Leader Based Protocol) がある [6]。LBP では、まずブロードキャスト送信端末は自身の隣接端末の中からリーダ端末を選ぶ。送信端末は RTS をそのリーダ端末に、リーダ端末はその返信として CTS をそれぞれ送信することで安全な DATA 送信を行う。

リーダ端末に選ばれた端末の 1hop 以内の端末は CTS を傍受し、NAV (Network Allocation Vector) を設定するためブロードキャスト中に隠れ端末の妨害にさらされるこ

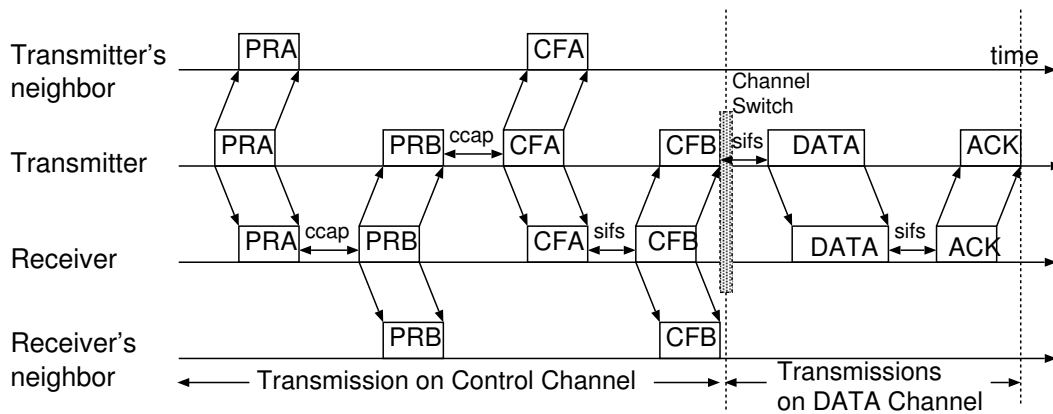


図 2 CAM-MAC の動作

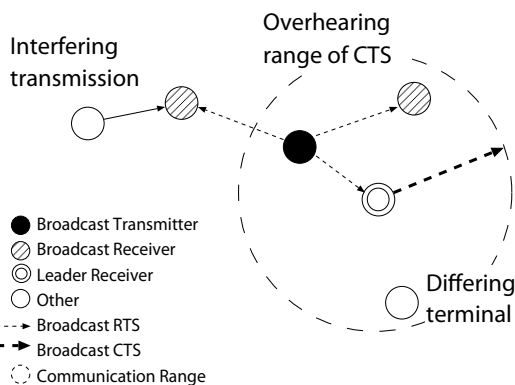


図 3 LBP の動作

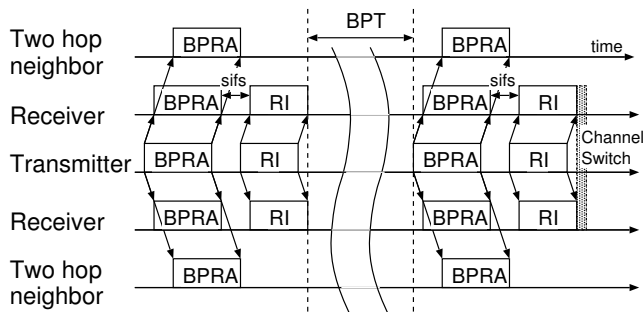


図 4 B-MAC の動作

とはないが、他のブロードキャスト受信端末の周りでは衝突が起きてしまう可能性がある (図 3 参照)。そこで、DATA を受信することができなかった受信端末は NACK (Negative ACKnowledgment) を、リーダ端末が正しく受信できた場合は ACK (ACKnowledgment) をそれぞれ送信する。これらの ACK もしくは NACK によって、送信端末は再送の必要性を判断する。しかしながら、この方式で全ての隠れ端末の送信を抑制することは難しく、またマルチチャンネルシステムで同方式を用いることはできない。

### 2.3 B-MAC

マルチチャンネル無線 LAN における CAM-MAC をベースとしたブロードキャスト方式として提案されている B-MAC

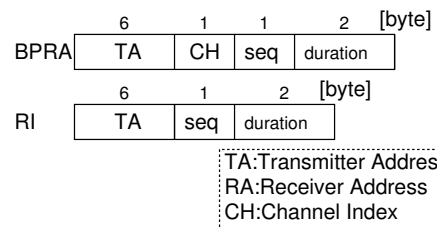


図 5 B-MAC のフレームフォーマット

の動作を図 4 を用いて説明する。B-MAC は送信端末側の保持するチャンネル使用情報のみに基づいてチャンネルを選択する。また、受信端末周辺に位置する隠れ端末を抑制するために、送信端末から 2hop 先の端末まで到達する電力でブロードキャスト開始の宣言を行う BPRAs を送信する。BPRAs にはブロードキャスト時に使用を希望するチャンネルの番号を付与する。しかし、全受信端末が BPRAs のチャンネル選択情報を正しく確認したかどうかは送信端末側では把握できないため、万が一、BPRAs 送信時に別チャンネルにおいてデータを送受信中の端末がいたとしても、これらが必ず制御チャンネルの監視に戻ってくると考えられる期間 (BPT: Broadcast Prediction Time) 待機した後に再度チャンネル選択情報を 2 度目の BPRAs によって通知し、その後にはじめてブロードキャストを開始する。ここで、BPT は送信される可能性のある最大長のデータの送信に必要な時間とする。

BPRAs を受信した端末は同パケットのヘッダの duration フィールドを参照し、同フィールドに記載される期間の間、指定されたチャンネルでの送信を延期する (図 5 参照)。

BPRAs の送信後、ブロードキャスト送信端末は自身から通常の送信範囲 (すなわち、ブロードキャスト受信端末) のみに対して RIs (Receiver Identifier) を送信する。RI を受信した端末は、自身が以降のブロードキャストにおける受信端末であると認識し、受信準備を行う。ここで他のチャンネルで送受信を行っていた等の理由により、RI を受信できなかった隣接端末は BPT 時間中に新たな送信を開始しようと試みる可能性があるが、そのように BPT 中に PRA

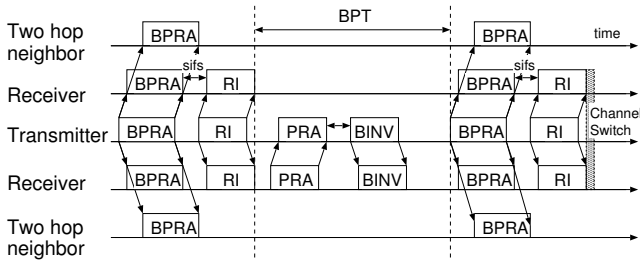


図 6 BPT 中の他送信割り込み防止

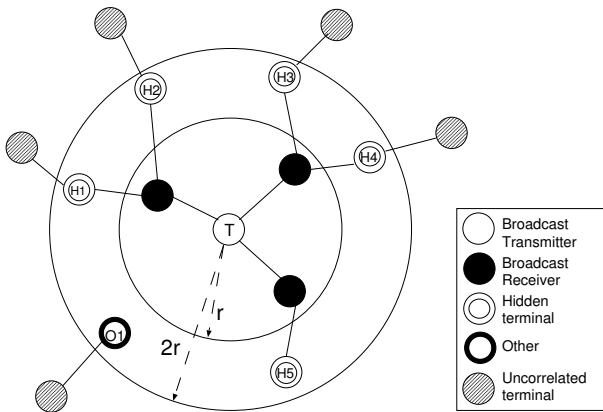


図 7 ネットワークトポロジ

が送信された場合は、ブロードキャスト送信端末によって同端末に対し BPT 中であり、送信を控えるように通知する BINV (Broadcast INV) が返信されることで、送信が制御される (図 6 参照)。

ところで、B-MAC では、図 7 に示すように BPRAs を通常の packets 送信範囲 ( $r$ ) の 2 倍の範囲 ( $2r$ ) に送信する。従って、ブロードキャスト受信端末と隣接しておらず、本来、隠れ端末とならない "O1" のような端末まで指定されたチャンネルでの送信が不要に抑制される。また、1 度目の BPRAs を送信した際に全受信端末がこれを受信でき、正しく受信準備が完了した際にも B-MAC は 2 度目のチャンネル選択情報の送信まで必ず一定時間待機するため、ブロードキャスト開始までに長い時間を要するなどといった欠点を抱えている。

### 3. 提案方式

前述した B-MAC の問題を解決するために本稿で提案する手法を説明する。図 8 に提案方式の動作を示す。

まず、提案方式では、ブロードキャスト端末が B-MAC 同様に 2hop 先まで送信する BPRAs のヘッダに宛先端末となるすべての隣接端末の ID を記載する (図 9 参照)。2hop 先の端末はその宛先に自身の隣接端末が含まれていなければ、自身の送信延期は不必要であると判断し、ブロードキャスト中にも同じチャンネルを用いて並行してユニキャストを行うことを可能とする。

BPRAs を受信したブロードキャスト受信端末は BPRAs

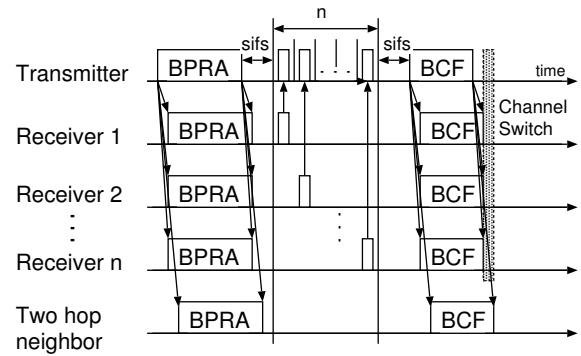


図 8 提案方式の動作 (BPT 短縮成功時)

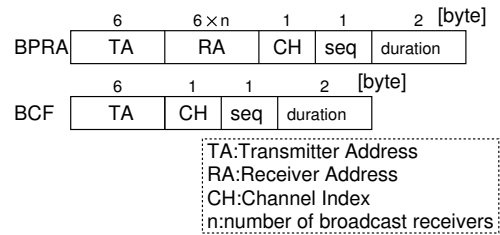


図 9 提案方式のフレームフォーマット

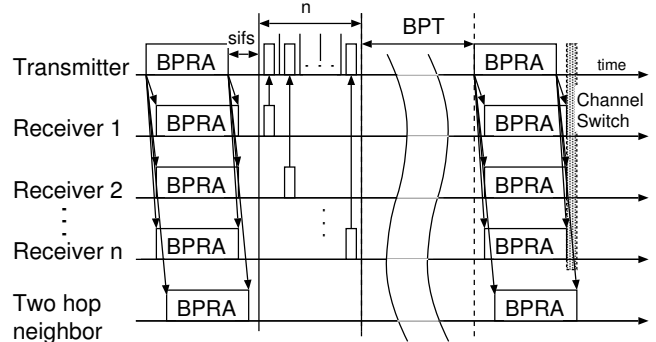


図 10 提案方式の動作 (BPT 短縮失敗時)

中で指定された順番に指定されたタイミングでパルス信号を送信側に返信する。ここで、同信号は、受信準備完了を通知するだけであるため、受信側で信号の有無がわかるものであれば良い。さて、1 度目の BPRAs 送信であっても全ての受信端末からのパルス信号を送信端末が確認できた場合、送信端末は BPT 時間の経過を待たず、直ちにチャンネルの切り替えとブロードキャストの開始を行う。BPT の短縮を実施する場合は、これを通知するために、BCF (Broadcast Confirmation) を BPRAs と同じ範囲に対して送信する (図 8)。

逆に、全てのブロードキャスト受信端末から正しくパルス信号を受信できなかった場合は、図 4 に示す B-MAC と同様に BPT 時間待機し、2 度目の BPRAs を送信した後にブロードキャストを開始する (図 10)。

さて、B-MAC では常に全ての端末を宛先としたブロードキャストのみを実現する方式となっていたが、提案方式では、BPRAs に記載するアドレスを適切に設定すること

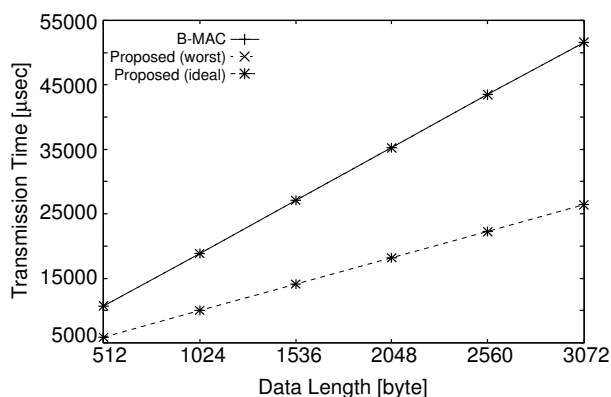


図 11 DATA パケット長対ブロードキャスト所要時間

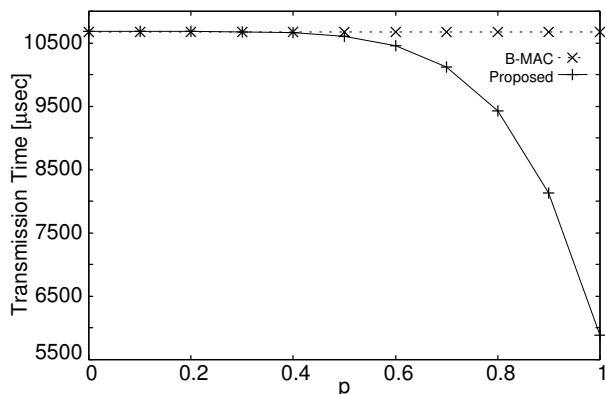


図 12 パルス信号受信成功確率対ブロードキャスト所要時間

で、マルチキャストへの柔軟な対応が可能となる。

#### 4. 提案方式の有用性評価

##### 4.1 ブロードキャスト所要時間の算出

提案方式の有用性を評価するために、DATA パケット長を変化させた場合 (図 11) と、隣接端末からのパルス信号が正しく受信される確率を変化させた場合 (図 12) の B-MAC と提案方式のブロードキャスト所要時間を算出した結果を比較する。同時間の算出に使用した条件を表 1 に示す。

図 11 は、提案方式において 1 度目の BPRA の後に全てのブロードキャスト受信端末からのパルス信号を受信することができ、BPT 時間を短縮できた場合 (ideal)、1 つ以上のパルス信号が受信できず、BPT 時間待った場合 (worst) ならびに既存の B-MAC の計 3 方式のブロードキャスト所要時間を算出した結果をそれぞれ示している。

同図から、DATA パケット長が短い時は提案方式 (ideal) のブロードキャスト所要時間はあまり向上していないが、DATA パケット長が大きくなるにつれて提案方式は B-MAC よりも大きくブロードキャスト所要時間が短縮できることがわかる。これは、DATA パケット長に対するチャネル選択のための交渉を制御チャネル上で行うオーバーヘッドが DATA 送信時間に比べて相対的に小さくなるためである。

表 1 ブロードキャスト所要時間の算出条件

| Parameter                | Value  |
|--------------------------|--|
| Data Rate                | 1Mbps  |
| SIFS                     | 10μsec   |
| DIFS                     | 50μsec   |
| MAC Header               | DATA:24, BPRA:6 × n + 10, BCF:10, ACK:10 (Bytes) |
| Frame Check Sequence     | 4Bytes   |
| PLCP Header and Preamble | 192μsec  |
| Number of Neighbors      | 6  |

表 2 シミュレーション諸元

| Parameter                | Value  |
|--------------------------|--|
| Data Rate                | 1Mbps  |
| Communication Range      | 100m   |
| SIFS                     | 10μsec   |
| DIFS                     | 50μsec   |
| Slot                     | 20μsec   |
| Contention Window Size   | Min:31, Max:1023                                 |
| MAC Header               | DATA:24, BPRA:6 × n + 10, BCF:10, ACK:10 (Bytes) |
| Frame Check Sequence     | 4Bytes   |
| PLCP Header and Preamble | 192μsec  |
| Payload                  | 512Bytes   |
| Arrival Process          | Poisson Arrival                                  |
| Number of Terminals      | 50   |
| Simulation Field         | 500m × 500m                                      |
| Number of Channels       | 3  |

図 12 は、ブロードキャスト受信端末数を 6、また DATA パケット長を 512byte とした時に、各受信端末からのパルス信号が正しく返信される確率を  $p$  と設定し、この  $p$  を変化させた場合のブロードキャスト所要時間の期待値を算出した結果をそれぞれ示している。前述したように、提案方式では少なくとも 1 つ以上のパルス信号を受信できなかった場合は B-MAC と同様にブロードキャストの開始まで一定時間待機するため、ブロードキャスト所要時間は短縮できないが、 $p$  の値が高くなれば、高い確率で全ての受信端末から返信されるパルス信号を受信することができ、結果としてブロードキャスト所要時間が効果的に短縮できることがわかる。

##### 4.2 ブロードキャスト特性に対する計算機シミュレーション評価

提案方式を計算機シミュレーションにより評価した結果について述べる。表 2 に、評価に用いた諸元を示す。同表に示すように、評価では 500m × 500m のシミュレーションフィールド内に 49 端末を一様乱数によってランダムに配置した (図 13)。また、これに加えて、同フィールド中央にブロードキャスト送信端末を配置した。全ての端末に

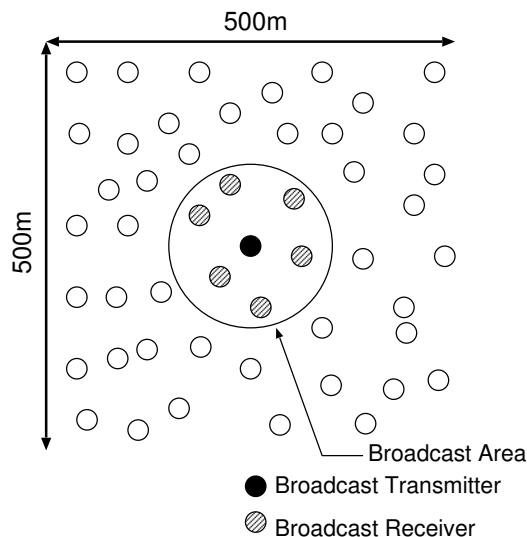


図 13 シミュレーショントポロジ

は指数分布に従ったランダムな送信要求を生じさせ、ブロードキャスト送信端末以外の任意の端末に生じた送信要求は、同端末の隣接端末の中からランダムに選択した端末を宛先としたユニキャスト送信を実施させた。シミュレーション中、ユニキャスト送信は CAM-MAC に、ブロードキャスト送信は提案方式にそれぞれ従って処理を行った。

さて、図 13 はネットワークトポロジを示しているが、同図に示すようにブロードキャスト受信端末は平均約 6 端末となっている。これは前節における評価と同様の条件とするためである。

図 14 にトラフィックを変化させた場合の BPT 短縮に成功した割合を計算機シミュレーションにより求めた結果を示す。なお評価では制御チャンネルを 1 つ、DATA チャンネルを 2 つの計 3 チャンネルのシステムとしたため、最大トラフィックは DATA チャンネルの帯域上限の合計である 2Mbps 程度としている。

さて、同図からわかるように、トラフィックの違いにより、短縮成功率は大きく変化するものの、トラフィック上限値付近においても 40 % 程度の短縮に成功していることがわかる。

図 15 に、提案方式ならびに B-MAC における 1 回のブロードキャスト所要時間の平均値を導出した結果を示す。同図からもわかるとおり、BPT 短縮成功率が高い低トラフィック時ほどブロードキャスト所要時間は大きく低減できるが、高トラフィック時においても、B-MAC と比べて十分なオーバーヘッド削減効果を得られていることがわかる。

#### 4.3 マルチキャスト特性に対する計算機シミュレーション評価

3. 節に述べたように、提案方式は BPRA 中に記載する宛先アドレスを調整することによってマルチキャスト方式に対応できる。そこで、本節では提案方式のマルチキャ

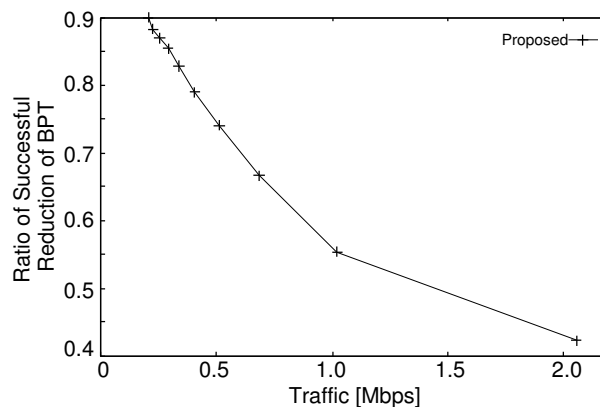


図 14 トラフィック対 BPT 短縮成功率

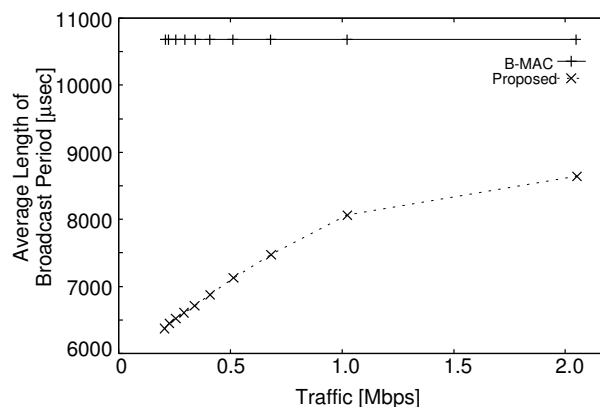


図 15 提案方式におけるブロードキャスト時の平均所要時間

スト性能を計算機シミュレーションによって評価する。評価に用いる諸元は 4.2 節と同じものとし、新たに、マルチキャスト受信端末選択率  $\alpha$  を指標として導入する。 $\alpha$  はマルチキャスト送信端末の任意の隣接端末がマルチキャスト受信端末として選択される割合を示す。本節の評価では、 $\alpha = 0.8, 0.6, 0.4$  の値を用いた。前述のようにシミュレーションフィールド中央に配置された端末の通信範囲内には約 6 端末存在するため、評価に用いた  $\alpha$  の値では、約 4.9, 3.7, 2.5 端末がそれぞれマルチキャスト受信端末として選択されることになる。

図 16 に  $\alpha$  を変化させた場合のマルチキャスト送信時の BPT 短縮成功率を示す。同図から  $\alpha$  の値が小さい場合に高い BPT 短縮成功率となることがわかる。

また、マルチキャスト所要時間の平均値を提案方式において  $\alpha$  を変化させた場合と B-MAC を比較した結果を図 17 に示す。前述のように B-MAC はそもそもマルチキャストであってもブロードキャスト時と同じ制御となってしまうため、同所要時間は全く変化しないものの、提案方式は、マルチキャスト宛先端末のみのパルス信号返信を確認するだけでマルチキャストの早期送信開始の可否を判断できるため、 $\alpha$  が小さな場合、すなわち状態を確認すべき端末数が少ない場合に大きく B-MAC に比べてオーバーヘッドを削減できていることがわかる。

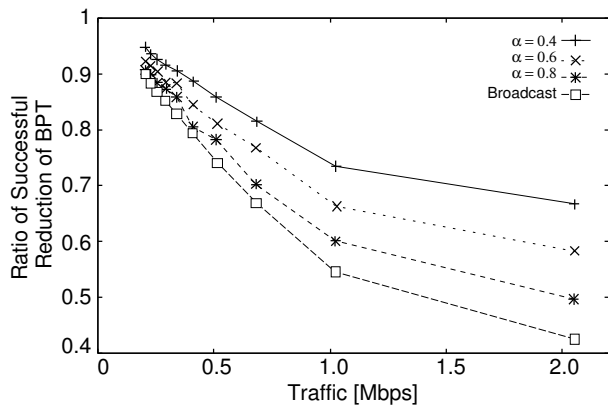


図 16 トラフィック対 BPT 短縮成功率

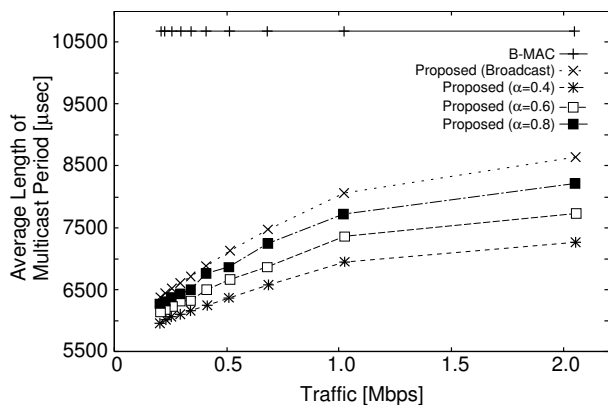


図 17 提案方式におけるマルチキャスト時の平均所要時間

## 5. おわりに

本稿では、マルチチャネル無線 LAN システムにおけるブロードキャスト時のオーバーヘッドを削減するために、既存のマルチチャネル用ブロードキャスト MAC である B-MAC に、送受信端末の受信準備完了状態に基づいた早期ブロードキャスト開始制御を導入した方式を提案した。提案手法の有効性を評価した結果、提案方式は B-MAC に比べて大きくオーバーヘッドを削減できることを明らかにした。また、提案方式は B-MAC と異なりマルチキャスト対応も可能であることから、同特性についても評価を行い、マルチキャスト時は B-MAC よりもさらに大きくオーバーヘッドを削減できることを示した。

さて、本文中で述べたように、本稿における提案方式は、BPRA のヘッダに宛先端末 ID を記載することの副次的効果として、2hop 先の端末に対する unnecessary 送信制限を B-MAC と比べて軽減する方式であるが、同効果については、また、稿を改めて報告するつもりである。

## 参考文献

[1] J. So, N. Vaidya : Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver, Proc. the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (ACM

2004, pp. 222–233 (2004).  
 [2] P. Bahl, R. Chandra and J. Dunagan, : SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks, Proc. of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.216–230 (2004).  
 [3] Hoi-Shwung, W. So, J. Walrand and M. Jeonghoon: Mc-MAC: A Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol, Proc. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2007, pp.334–339 (2007).  
 [4] T. Luo, M. Motani, and V. Srinivasan: Cooperative asynchronous multichannel MAC: Design, analysis, and implementation, Proc. Mobile Computing, IEEE Transactions on, pp.338–352 (2009).  
 [5] Y. Wan, X. Chen, and J. Lu: Broadcast Enhanced Cooperative Asynchronous Multichannel MAC for Wireless Ad Hoc Networks, Proc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM) 2011, pp.1–5 (2011).  
 [6] Z. Li, T. Herfet: MAC Layer Multicast Error Control for IPTV in Wireless LANs, Proc. Broadcasting, IEEE Transactions on, pp. 353–362 (2009).