

指向性受信方式による低遅延 MAC Level 2hop ブロードキャストプロトコルに関する検討

國安 哲郎¹ 重安 哲也¹

概要：IEEE802.11 を用いた無線アドホックネットワークにおいて隠れ端末問題によるブロードキャスト通信の受信率低下を改善するために、これまで我々は指向性受信を導入した RTB-DR 方式により受信率の低下・ばらつきを改善できることを明らかとしてきた。本稿では、この指向性受信に加え、送信端末からのブロードキャストを受け取った隣接端末がさらに 2hop 先の端末へ受信したパケットを転送することで送信端末から 2hop 以内の端末に対して低遅延でブロードキャストを実現する方式を提案する。この際、2hop 先端末の受信にも指向性受信を導入する。また提案手法の性能評価によって、同方式は既存方式と比較して、高い受信率を達成、かつ短時間で 2hop 以内の端末にブロードキャストパケットを配送できることを示す。

1. はじめに

近年、無線アドホックネットワークの普及により、スマートフォンなどの端末間や自動車間などで通信を行うことが可能となった。このアドホックネットワークにおけるブロードキャストを活用することで、繁華街やイベント会場などの過密地域での広報情報、災害時などにおける緊急情報や安否情報、道路の渋滞情報などの伝達・転送に高い効果を発揮する。そのため、アドホックネットワークにおけるブロードキャストに関連する研究は、これまでに多くの取り組みが行われている [1][2][3]。

ところで、代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 では、ブロードキャスト送信時は、送信端末上で CTS が衝突してしまうことから RTS (Request To Send) /CTS (Clear To Send) 交換を用いることができない。このため、隠れ端末問題により、高トラフィック時に著しく受信率が低下することが問題となっている [4]。

そこで、ブロードキャスト受信端末のうち、最も多くの隠れ端末と接続している端末を 1 台選定し、同端末に対してブロードキャスト開始前にユニキャストで RTS/CTS 交換を行うことで受信率を効率的に向上する手法が提案されている [5]。しかし、同方式ではネットワーク中の隠れ端末の存在位置の偏りが小さい場合は、提案方式による受信率向上効果が低下することが知られている。これを改善するために、2 段階で RTS/CTS 交換を行う方式が提案されて

いる [6]。同手法はブロードキャスト開始前の RTS/CTS 交換を 2 段階で実施することで、前述の 1 段階の RTS/CTS 交換よりも多くの隠れ端末を抑制することができる。結果として、この手法を採用することにより、受信率は改善できるものの、端末間におけるブロードキャスト受信率にばらつきが発生するという問題が指摘されている。

そこで、指向性受信を導入した RTB-DR 方式が文献 [7] によって提案されている。同手法を用いれば、RTS/CTS 交換を行った端末以外の端末の受信率も向上できるため、端末間における受信率のばらつきを改善できることが明らかになっている。

さて、RTB-DR では、これまでの指向性受信を採用しない方式と同様に隠れ端末に向けて CTS 信号を送信する。そのため、CTS に記載する duration 値を調整すればこれを受信した端末の送信延期時間も意図した長さに設定できることになる。

そこで本稿では、送信端末から正しくブロードキャストを受信した隣接端末のうち、あらかじめ送信端末から指定された複数の端末のみが送信端末からのブロードキャストパケットの受信後に、ただちに送信端末から 2hop 先の端末へブロードキャストパケットを転送する機能を追加することで、低遅延で 2hop ブロードキャストを実現する手法を提案する。また、既存方式で単に 2 回ブロードキャストを行うときと比較して、受信率を保持し、より広範囲に配送できていることを計算機シミュレーションを用いて明らかにする。

¹ 県立広島大学 経営情報学科
Dept. of Management and Information Systems, Prefectural University of Hiroshima

2. 関連研究

2.1 IEEE802.11

2.1.1 IEEE802.11DCF の制御の仕組みと問題点

代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 は、アドホックネットワークにおける送受信において分散型の MAC (Medium Access Control) プロトコルである DCF (Distributed Coordination Function) を使用する。DCF では、チャンネルアクセス方式として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を規定している。CSMA/CA のユニキャスト時の動作を図 1 を用いて述べる。まず、新たに送信を開始する端末は無線チャンネルの使用状況をキャリアセンスによって確認し、他端末によるパケットの送信が行われていなければ自身の新たな送信を開始するが、そうでなければ送信を待機する。これにより同一エリア内での複数同時送信の発生によるパケットの衝突を防ぐことができる。そして、データパケットを正常に受信した端末は ACK (Acknowledgement) パケットを返信する。ここで、ACK パケットの返信がない場合には送信が失敗したと判断し、データパケットの再送を行うことでデータ通信の信頼性を確保する。

また、IEEE802.11DCF では隠れ端末問題については図 2 に示すように、オプションとして規定される RTS/CTS 交換を用いることでその対策を行っている。送信を試みる端末は、データを送信する前に宛先端末へ RTS 信号を送信し、宛先端末は受信可能であれば CTS 信号を返す。送信端末は CTS の返信を確認後、データの送信を開始する。このとき RTS、CTS を傍受した端末はそれらのパケットのヘッダにある duration フィールドを読み取り、ACK の返信が終わるまで自端末の新たな送信を待機する。これにより、送信に干渉する可能性のある端末からの送信を抑制しパケットの衝突を防ぐことができる。

しかし、自端末の送信範囲内にいるすべての端末に対して一度に送信を行うブロードキャスト方式において RTS/CTS 交換を用いると受信端末が一斉に CTS を返信してしまうため、送信端末上において CTS 同士が衝突がするためにブロードキャスト方式では、RTS/CTS 交換を用いることができない。

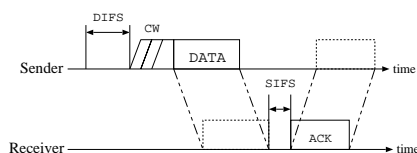


図 1 IEEE802.11DCF のユニキャスト通信におけるチャンネルアクセス

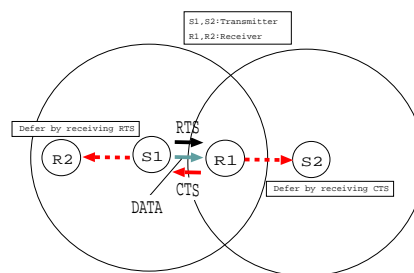


図 2 RTS/CTS 交換

2.2 SRTS 方式, DRTS 方式および RTB-DR 方式

前述した通り、ブロードキャストにおいて IEEE802.11 では RTS/CTS 交換が使用できない問題があったが、この問題を解決するために、これまでに SRTS (Single RTS) 方式 [5], DRTS (Double RTS) 方式 [6] および RTB-DR (RTS/CTS for Broadcast for Directional Receiving) 方式 [7] がそれぞれ提案されている。以下ではこれらの概要について述べる。

2.2.1 SRTS 方式の制御方法と問題点

SRTS 方式の動作を図 3 を用いて説明する。同手法について送信端末 S はまず、ブロードキャスト開始前に隣接端末リスト (表 1 参照) および隠れ端末リスト (表 2 参照) を作成し、それを元に危険度および危険度減少値を算出する。

図 3 に示すネットワークにおける隣接端末リストの構成手順を次に述べる。まず、送信端末 S は端末 R1, R2 が端末 H1 ~ H4 を宛先として送信する RTS または DATA を傍受し、その送信元アドレスを参照することで R1, R2 が S の隣接端末であると認知する。同様の処理を繰り返して実行することにより隣接端末リストを構成する。

次に隠れ端末リストについて述べる。ここでは、送信端末 S は傍受した全ての RTS または DATA の宛先アドレスを参照し、隣接端末リストに記載のないアドレスであればその端末を隠れ端末であると認知する。さて、同表における危険度とは隠れ端末ごとの送信範囲内にいる隣接端末の個数である。また、危険度減少値とは隣接端末ごとの送信範囲内にいる隠れ端末の危険度の合計値である。この SRTS 方式においてはこのうち危険度減少値の最も高い単一の端末とのみ RTS/CTS 交換を行う。これによりブロードキャスト受信率は大きく向上する。

しかし、SRTS 方式は RTS の宛先と選定した単一の端末を隠れ端末問題から守ることはできるが、それ以外の端末とは RTS/CTS 交換を行わないため、隠れ端末の干渉から守ることができない。そのため、ひとつの隣接端末に多数の隠れ端末が偏って接続されていれば効果的に受信率を向上できるが、隣接端末ごとの隠れ端末数が均等になっている、つまり偏りの度合いが減少するとネットワーク全体の受信率が効果的に向上できないという問題がある。

2.2.2 DRTS 方式の制御方法と問題点

SRTS 方式の問題点を解決するために 2 段階の RTS/CTS

表 1 隣接端末リスト

端末 ID	危険度減少値
R1	4
R2	3

表 2 隠れ端末リスト

接続 ID	接続先端末 ID	危険度
H1	R1	1
H2	R1	1
H3	R1, R2	2
H4	R1	1

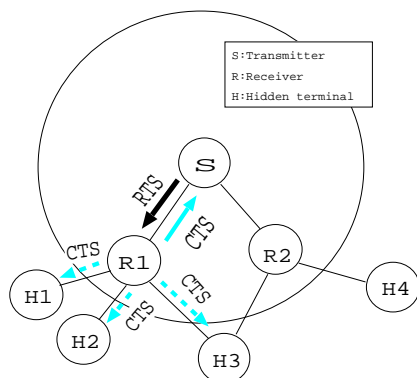


図 3 SRTS 方式

交換を行い、より広範囲に存在する隠れ端末の送信を抑制する DRTS 方式が提案された。2 段階目の RTS に対する CTS の返信が隠れ端末上で衝突が発生するのを防ぐために CTS Reply に選定された端末にのみ 2 段階目の RTS を送信する。以下に図 4 のトポロジを元に選定手順を記載する。

1. 1 段階目の RTS の宛先端末とその送信範囲内にいる隠れ端末を除外する (図 4 (1))
2. 危険度および危険度減少値を算出し、最大の危険度減少値を持つ端末を CTS Reply に加える (複数存在する場合は端末番号の小さい端末を選定する)
3. 2 で選定された端末の送信範囲内にいる隠れ端末と、その隠れ端末の送信範囲内にいる隣接端末を除外する (図 4 (2))
4. 隣接端末がまだ存在する場合、手順 2 に戻り手続きを続行する

図 4 において CTS Reply として選定されるのは R2, R4 の 2 端末であり、DRTS ではこれらの複数の端末を宛先として 2 段階目の RTS を送信する。DRTS では、このように CTS Reply を用いることにより、SRTS 方式よりも多くの隠れ端末を抑制できる。

また、DRTS では 2 段階目の RTS に対する CTS の返信が送信端末上で衝突することを防ぐため、図 5 に示すように送信端末は 2 段階目の RTS を送信した SIFS 時間

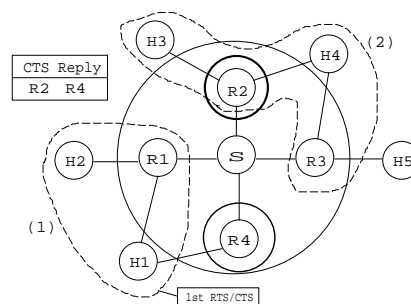


図 4 DRTS 方式における CTS Reply の選定

後に、2nd CTS window とよぶ期間を設定する。同期間の間、送信端末は全てのパケットの受信処理を行わずに待機する*1。2nd CTS window 後、送信端末は直ちにブロードキャストを開始する。

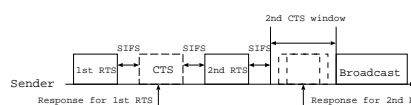


図 5 2nd CTS window

DRTS 方式は 2 段階で RTS/CTS 交換を行うことにより、SRTS 方式よりも広範囲の隠れ端末を抑制でき、隠れ端末の偏り具合を減少させた場合も SRTS 方式より高いブロードキャスト受信率を得られる。しかし、高トラフィック時では端末間のブロードキャスト受信率にばらつきが生じるという問題がある。

2.2.3 RTB-DR 方式の制御方法

DRTS 方式の問題点を解決するために指向性受信を導入した RTB-DR 方式が提案されている。同方式は DRTS 方式のように 2 段階の RTS/CTS 交換は行わない。

RTB-DR は図 7 に示すように RTS/CTS 交換を危険度減少値の最も大きい単一の端末と 1 回のみ行うが、それ以外の受信端末も RTS を傍受することにより送信端末の位置を検知することで、すべての受信端末が送信端末に対して指向性受信を設定することによってブロードキャストパケットを受信する。

同方式では、無指向性/指向性のモードを切り替えるスイッチドビームアンテナを利用する。アンテナモデルを図 6 に示す。同アンテナは等分割された n 個のアンテナアレイによって構成される。全てのアレイがアクティブとなっている場合は無指向性モードとして、いずれかの単一のアレイがアクティブとなっている場合はその方向への指向性モードとしてそれぞれ動作する。なお、アイドル状態の際は無指向性モードで待機する。これにより各受信端末は指向性を設定した方向以外からの受信を遮断するため、他の端末による干渉を防ぐことができる。その結果、RTS/CTS 交換を行う端末だけでなく、他の隣接端末も隠れ端末問題

*1 これは、複数 CTS が送信端末上で衝突を起こすことを前提としているためである。

を回避することができ、端末間における受信率のばらつきを抑えることができる。

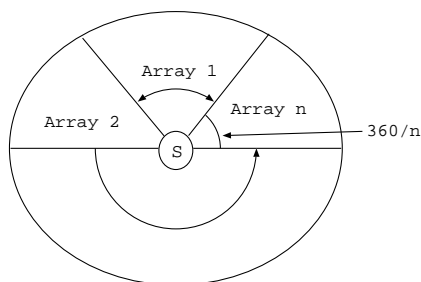


図 6 アンテナモデル

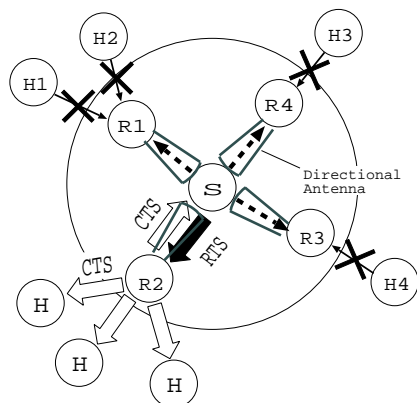


図 7 RTB-DR 方式

3. 提案方式

本節では、送信端末から 2hop 以内の端末に対して、低遅延でブロードキャストを実現する手法について提案する。具体的には、RTB-DR 方式と同様の指向性受信を用いることで、高い受信率でありかつ、より短時間で広範囲に届けること手法を提案する。

3.1 提案方式の仕組み

提案方式では、RTB-DR 方式と同様にブロードキャスト受信の際に指向性を設定する。さらに隣接端末のうち、あらかじめ指定された端末は送信端末からのブロードキャストを受信した後、ただちにそのパケットを自端末の隣接端末、つまり送信端末からみて 2hop 先の端末に向けてブロードキャストする。この時、送信端末から 2hop 先の端末も 1hop 先の端末と同様に指向性受信を行う。提案方式の動作概要を以下に記載する。

1. 隣接隠れ端末リストの作成と危険度・危険度減少値を算出し、1hop 先端末の中から CTS Reply を選定する
2. CTS Reply を選定する
3. 2 で選定された端末を宛先とする RTS を送信する。

RTS を受け取った隣接端末はその到来方向から送信端末の位置を検出し、同方向に対してただちに指向性を設定する。ただし、CTS Reply として選定された端末は、SIFS 時間後に CTS を返信したのちに指向性受信に切り替えを行う

4. 送信端末は CTS window 期間に移行し、返信される CTS の受信処理を行わずに待機する
5. CTS window 終了後、ただちに送信端末はブロードキャストを開始する。ブロードキャストを受信後、CTS Reply に選定されている隣接端末は隠れ端末に対して受信したパケットを再ブロードキャストする

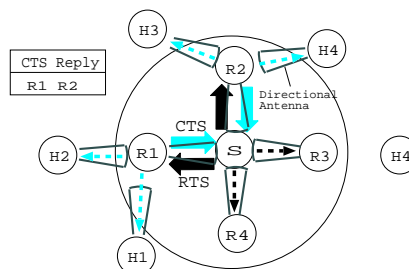


図 8 提案方式の動作概要 1

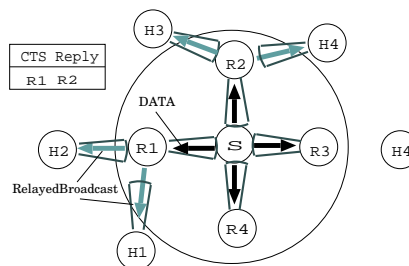


図 9 提案方式の動作概要 2

図 8 に示すように、CTS Reply に選定された隣接端末は RTS/CTS 交換を行うが、RTS/CTS 交換の宛先とならなかった 1hop 端末は RTS を、2hop 端末は CTS をそれぞれ傍受することで理想的には 2hop 以内のすべての端末がブロードキャストパケットを指向性受信する。このようにすることで、RTB-DR と同様に提案方式も指向性を設定している方向以外から到来するパケットによる干渉の影響を排除できるため、全ての端末の対干渉能力の向上を期待できる。

図 9 に示すように、提案方式の利点は CTS Reply に選定された隣接端末の受信完了後の即時再ブロードキャストにより、送信端末からのデータパケットを短時間で、より広範囲に届けることができる点である。

ところで、データパケットのサイズに関わらず、無線 LAN では送信所要時間のうち信号が実際にチャンネルに送出される前の DIFS 時間、バックオフ時間は変化しない。

つまり、どんなに小さなパケットを送信する際にも信号送出には同じだけの時間がオーバーヘッドとして必要となる。(バックオフ時間はランダムであるため、毎回変動するがその大きさはデータパケットのサイズとは無関係に決定される。)これに対して、本節で提案する隣接端末が受信後ただちに再ブロードキャストする手法では、これらの DIFS + バックオフ時間を省略しつつ、より広範囲へ送信することができる。しかし、ただ単に再ブロードキャストするだけでは受信率の著しい低下が想定され、実用がないため、指向性受信との併用により受信率を保持しつつ再ブロードキャストを実装することができる。

4. 提案方式の性能評価

提案手法の性能を評価する。具体的には、まず、提案手法と CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式で単に 2 回ブロードキャストを行うときの受信率を評価した結果を示す。次に提案手法と RTB-DR 方式の RTS 送信回数に対するブロードキャスト送信比率を評価した結果を示す。最後に、提案手法について、あるトポロジにおける各端末の高・中・低トラフィック時の受信率の分布を示す。

表 3 に評価に用いた諸元を示す。

表 3 シミュレーション諸元

Parameter	Value
Data Rate	11Mbps
Communication Range	100m
SIFS	10 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot	20 μ sec
Contention Window Size	Min:31, Max:1023
MAC Header	DATA:24, RTS:16 CTS:10, ACK:10(Bytes)
Frame Check Sequence	4Bytes
PLCP Header and Preamble	192 μ sec
Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Arrays	4
Number of Terminals	100
Simulation Field	500m \times 500m

4.1 ブロードキャスト受信率特性

図 10, 11, 12 にトラフィック負荷に対するネットワーク全体、1hop 先のみ、2hop 先をのみの受信率の特性をそれぞれ示す。

なお、ここで述べる受信率とはブロードキャストの送信対象となる全端末のうち正常にブロードキャストを受信した端末の割り当てとしている。よって、2hop 先の受信率の算出において、母数となるのは送信端末に対する全ての隠れ端末数ではなく、CTS Reply 端末からの再ブロードキャストの送信対象となる 2hop 先端末の台数となる。(こ

れは、CTS Reply 端末の選出結果より、再ブロードキャストの送信対象にならない端末が存在する。)

これらの図より、どの受信率特性においても 0.5Mbps を越えたあたりから受信率が低下してしまうことがわかる。これはトラフィックの増加とともに送信端末からの RTS を受信(傍受)に失敗する端末が増えることで、これらの端末がブロードキャストに対して指向性受信を設定できなくなったためと考えられる。

また、受信率の減少は 5Mbps 以上のトラフィックで一旦、横ばいとなる。これは、オフロードは増加するものの、チャンネルが飽和状態となり、実際のチャンネル状況にはほぼ変化がなくなったためであると考えられる。

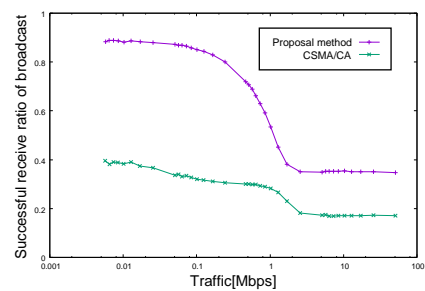


図 10 ネットワーク全体の受信率特性

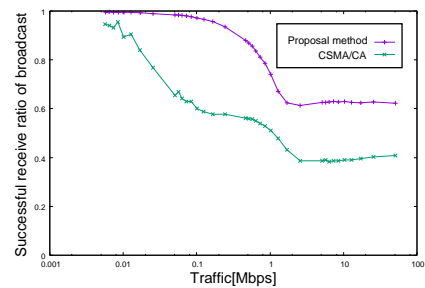


図 11 1hop 先の受信率特性

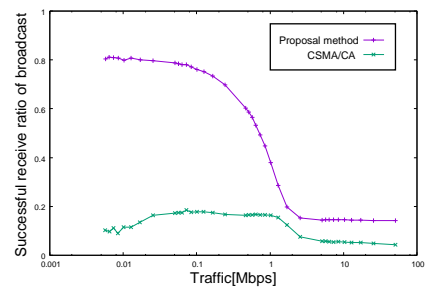


図 12 2hop 先の受信率特性

4.2 RTS 送信回数に対するブロードキャスト送信比率

図 13 にブロードキャスト送信回数を RTS 送信回数で正規化したを示す．同図より RTB-DR 方式は 0.5Mbps 付近から著しく低下していることがわかる．これは，同方式においては送信端末が CTS を正常に受信できなければブロードキャストは行われなためである．つまり送信端末からの RTS を受信できなかった端末は CTS を送信しないため，トラフィックの増加とともに送信端末からの RTS の受信に失敗する確率が高まるためである．これに対し提案手法では隣接端末の RTS の受信したかどうかに関わらず，送信端末は CTS Window 期間後に，必ずブロードキャストを行うため，その値はほぼ 1 となる．このことから提案手法は送信端末の RTS 送信が行われれば必ずブロードキャストが行われるため，RTB-DR 方式より多くのパケットを送信することができ，また，オーバーヘッドの増加を回避することができる．

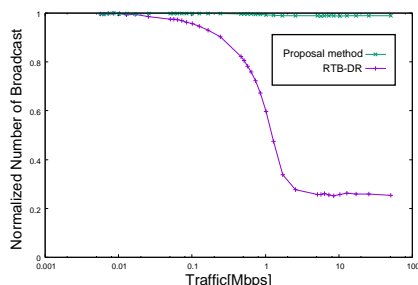


図 13 正規化ブロードキャスト送信回数

4.3 受信率分布

図 14, 15, 16 に高・中・低トラフィック時の各端末の受信率の分布を示す．これらの図より，中・低トラフィック時の 2hop 先の端末は 50%程度を受信率を保持していることがわかる．また，2hop 先の受信範囲をみてみると，再ブロードキャストを実行する CTS Reply 端末を中心により広範囲に受信されていることがわかる．この特性から提案手法が活用される場面として連想されるのは，道路における交差点の信号待ちなど，ある程度決まった形状での過密地域などで情報をより素早く拡散する際に有効であると考えられる．

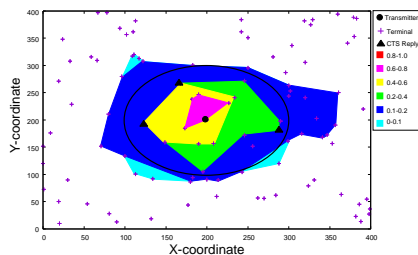


図 14 高トラフィックでの受信率分布

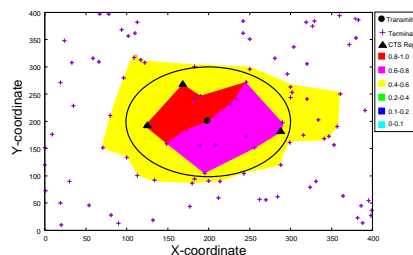


図 15 中トラフィックでの受信率分布

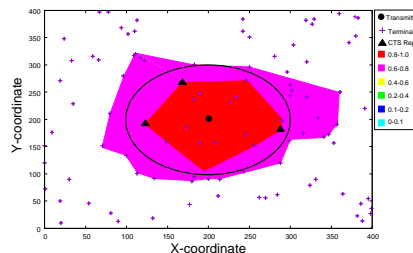


図 16 低トラフィックでの受信率分布

5. むすび

本稿では，IEEE802.11 を用いた無線アドホックネットワークにおいてブロードキャストパケットを低遅延で，より広範囲へ届けるための方式として，送信端末に対する隣接端末がブロードキャストパケット受信後にただちに 2hop 先端末へ再ブロードキャストする手法を提案した．その結果トラフィック負荷が 0.5Mbps までであれば十分な受信率を保持できることがわかった．

今後は，2hop 先の端末が高トラフィック時の受信率低下を改善するために CTS Reply 端末が送信端末からの RTS の受信に失敗した際，それを検知した他の隣接端末が CTSReply 端末の代理で，CTS を返信する機能を追加し，その有効性を調査していく予定である．

参考文献

- [1] 平田千浩，二木志郎，大島勝志，三次匠：Bluetooth におけるマルチホップブロードキャスト方式の設計と実装，電子情報通信学会技術研究報告．NS，ネットワークシステム 105(627)，165-168，(2006)．
- [2] 薫彦男，六浦光一：マルチホップ・ブロードキャスト方式の性能評価，電子情報通信学会技術研究報告．RCS，無線通信システム 107(192)，25-30，(2007)．
- [3] 策力木格，大坐皇智，加藤?彦：高密度環境を考慮した運転支援のためのマルチホップブロードキャストプロトコル，電子情報通信学会技術研究報告．CQ，コミュニケーションオリティ 110(198)，37-42，(2010)．
- [4] 重安哲也，松野浩嗣，森永規彦：隠れ端末の送信を抑制する衝突回避型ブロードキャストプロトコル，情報処理学会論文誌 Vol. 51. No. 2, p453-465，(2010)．
- [5] 平岡宏史，井上大資，重安哲也，森永規彦：自律分散型 MAC プロトコルにおける衝突回避型ブロードキャストプロトコルの検討，電子情報通信学会総合大会 pp. 556，(2008)．
- [6] 角田千広，重安哲也，森永規彦：無線 LAN におけるブロードキャスト時の隠れ端末抑制性能の改善に関する一検

討，電気情報関連学会中国支部連合大会講演論文集 pp . 271-272 , (2008) .

- [7] 竹川恭平，重安哲也：MAC レベルブロードキャスト性能の向上を目的とした指向性受信方式の導入に関する検討，平成 24 年度 (第 63 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集 pp . 371-372 , (2012) .