

指向性受信により1度の送信機会で2hop先端末まで送信を行うMAC Levelブロードキャストプロトコル

國安 哲郎^{1,a)} 重安 哲也²

受付日 2016年5月23日, 採録日 2016年11月1日

概要: アドホックネットワークでの隠れ端末問題の影響を軽減するブロードキャストプロトコルとして、指向性受信を導入したRTB-DR方式が提案されている。同方式ではRTS/CTS交換を行う際、ブロードキャスト送信端末からRTSを受け取った複数の端末はそれらに隣接する2hop先の端末に向けて再度CTSを送信する。そのため、CTSに記載するduration値を調整すれば、これらの2hop先端末の送信延期時間を任意に指定できる。本論文では、送信端末の隣接端末のうち、ネットワークポロジを考慮してあらかじめ指定した複数の端末から2hop先の端末に対して転送する機能を追加することで、ブロードキャスト送信端末が得た1度の送信機会において2hop先端末まで送信を行うDTHBを提案する。

キーワード: アドホックネットワーク, MAC Levelブロードキャスト, 指向性受信

A New 2hop MAC Level Broadcast Protocol Employing Directional Receiving at one Transmission Opportunity

TETSURO KUNYASU^{1,a)} TETSUYA SHIGEYASU²

Received: May 23, 2016, Accepted: November 1, 2016

Abstract: RTB-DR which is equipped with directional receiving, has been proposed for broadcast protocol to mitigate hidden terminal effects on ad-hoc network. In the RTB-DR, the terminals neighboring to broadcast sender transmits CTS to terminals two hops away from the sender. The period for transmission deferral of the 2 hop terminals can be controlled the duration value of the CTS. In this paper, we propose MAC Level 2hop broadcast protocol, named DTHB which forwards broadcast packet to terminals within 2 hop terminals by selected sender's neighbors. The proposed protocol delivers broadcast packet by one transmission opportunity of broadcast sender.

Keywords: ad-hoc network, MAC Level broadcast, directional receiving

1. はじめに

無線アドホックネットワークでは、任意の端末から一定範囲内に存在するすべての端末へ情報を配信するために、他端末の中継によって、より広範囲の端末と通信を可能に

するマルチホップブロードキャスト [1], [2], [3], [4] の形態を用いることができる。これを適用することで、繁華街やイベント会場などの過密地域での広報情報や、災害時などにおける緊急情報や安否情報、車々間通信による道路の渋滞情報などの伝達に高い効果を発揮することができる。

さて、代表的な無線LAN規格であるIEEE802.11DCF (Distributed Coordination Function) において、送信範囲外に端末が存在する状況では、受信端末上でパケットが衝突する隠れ端末問題によりスループットが低下することが知られている。そのため、隠れ端末対策としてRTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 交換を規定している。送信開始前に送受信端末間でRTS, CTSを交換すること

¹ 県立広島大学大学院総合学術研究科
Graduate School of Comprehensive Scientific Research,
Prefectural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558,
Japan

² 県立広島大学経営情報学科
Department of Information and Management Systems,
Prefectural University of Hiroshima, Hiroshima 734-8558,
Japan

^{a)} q622006vf@ed.pu-hiroshima.ac.jp

で、これらを傍受した周囲の端末に、送信終了予定期間まで送信を延期させることで衝突を回避する。

しかし、無線 LAN 規格に規定される RTS/CTS 交換はユニキャスト通信では有効に機能するが、ブロードキャスト通信では複数の隣接端末から CTS が同時に返信され、送信端末上で衝突が発生するため使用できない。これを解決するために、これまでに様々な衝突回避型ブロードキャストプロトコル [5] が提案されている。まず、文献 [6] において、事前に隣接端末の中から隠れ端末の影響を最も受けやすいと思われる端末を 1 つ選定し、その端末とのみ事前の RTS/CTS 交換を行う SRTS (Single RTS) 方式が提案されている。次に、文献 [7] では、2 段階の RTS/CTS 交換を行い、より広範囲の隠れ端末の送信を抑制する DRTS (Double RTS) 方式が提案されている。そして、文献 [8] では、指向性受信を導入し、RTS/CTS 交換を行う端末以外の端末も隠れ端末問題を回避する RTB-DR (RTS/CTS for Broadcast with Directional Receiving) 方式が提案されている。これらの方式を導入すれば、隠れ端末の送信を抑制し、衝突回数そのものを低減できるため、ブロードキャスト受信率は大きく向上する。しかしながら、これらの手法はすべて、送信端末の送信範囲内の端末にのみしかパケットを送信できない。そのため、従来手法を用いてさらに広範囲の端末に対するブロードキャストを実現するには、それらの MAC プロトコルに加えて、ルーティングプロトコルとの併用が必要となり送信オーバーヘッドは増加する。

これに対して、文献 [9] では EMBHMAC が、文献 [10] では指向性アンテナを用いる手法が、それぞれ MAC レベルでのマルチホップブロードキャストを実現するプロトコルとして提案されている。しかしながら、どちらのプロトコルにおいても TDMA (Time Division Multiple Access) をベースとしているため、現在主流の IEEE802.11 系無線 LAN に採用される CSMA のような柔軟なトラフィックの変動に対応することは難しい。

しかしながら、IEEE802.11 系無線 LAN の CSMA はマルチホップブロードキャストに対応していないため、送信端末から複数ホップ以内の端末にブロードキャストを配信するには、ブロードキャストを受信した端末がその先の端末へ中継送信を行う必要がある。中継送信を実施するには、バックオフ手続きを経たうえで周辺端末との競合の後に新たな送信権の確保が必要となる。当然ながら、多くの端末が同時に競合するような高トラフィック環境下では、送信権確保までの時間も長くなるため、ブロードキャスト開始から所望の範囲内の端末への配信が完了するまでの時間は相対的に長期化する。結果として、過密地域での広報情報や緊急情報といった迅速性が重要視される場面での有用性が低下してしまう。

そこで、本論文では、ルーティングプロトコルに依存せず、従来手法よりも広範囲の端末に対するブロードキャ

ストを IEEE802.11 系無線 LAN に採用される CSMA/CA をベースとする MAC プロトコルにおいて低遅延で実現する手法について考える。具体的には、送信端末が 1 度送信権を確保すれば、ブロードキャストを中継する端末における送信権の競合をなくすることが重要であると考え、そのような手法を実現するプロトタイプとして、既存の指向性受信型ブロードキャストプロトコル RTB-DR を拡張することで、新たに MAC level 2hop ブロードキャストプロトコルを提案する。

また、計算機シミュレーションによって提案手法の性能を評価した結果から、提案手法の有効性について議論する。

2. 関連研究

アドホックネットワークにおけるブロードキャスト手法は大きく分けて、1) 再送によって衝突パケットを回復する衝突回復型 [11], [12], [13] と、2) 隠れ端末の送信を抑制することでパケットの衝突を回避する衝突回避型 [6], [7], [8], [14], [15], [16] の 2 種類に分類できる。1) に分類される手法では、ブロードキャスト後に受信端末から ACK あるいは NACK を送信させることで、再送の要否を判断する。当然、高い受信率の達成には再送の繰返しが必要となること、さらには、ブロードキャストごとに再送回数が異なるために送信所要時間が一定ではないなどの欠点をかかえている。

これに対して、2) に分類される手法は、ブロードキャスト開始前に隠れ端末の送信を抑制することで、ブロードキャスト後の再送のための受信状況調査が不要になるといった利点を持つ。2) に属するプロトコルのうち、最も代表的なプロトコルである BSMA [14] では、ブロードキャスト前に隣接するすべての端末を対象とする RTS/CTS 交換を行うことで、隠れ端末の送信を抑制する。しかしながら、同方式はすべての隣接端末が同時に CTS を返信した場合にもその中の最も受信電力の強い 1 つを補足効果によって認識できるという前提を必要とする。これに対して、補足効果の前提を不要とするプロトコルである PS²MAC [16] が提案されている。同方式は、Data チャネルと Signaling チャネルの 2 つの独立した半二重チャネルを用いる。送信を試みる端末は Signaling チャネルを用いて信号を発信し、これを検知した端末は自身の送信を抑制する。しかしながら、同方式はすべての端末に 2 つのチャネルと 2 つの送受信機を必要とするなど、複雑な手法となっている。

さて、補足効果や複数送受信機具備などの前提を必要としない方式である BMW [15] は送信前に隣接端末の中からラウンドロビンによって選択した端末 1 つのみ、ブロードキャスト前の RTS/CTS 交換を行う。当然ながら、RTS の宛先端末でない隣接端末は隠れ端末の妨害によってブロードキャスト受信に失敗する確率は高くなる。そこで、ブロードキャストの受信に失敗した場合は、受信に失敗し

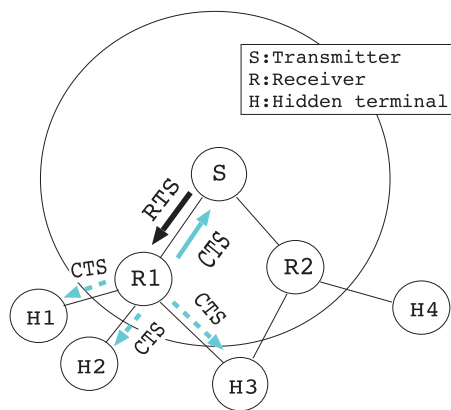


図 1 SRTS による隠れ端末抑制

Fig. 1 Collision mitigation control for hidden terminals on SRTS.

たパケットのシーケンス番号を記録しておき、これを、次回、自身が返信する CTS によって送信端末に通知し再送を促すよう規定されている。BMW はこのように衝突回避と衝突回復のハイブリット型であるとも考えることができるが、衝突回避フェーズにおいては、隣接端末を単純にラウンドロビンで選択することから、ブロードキャスト受信率に影響を及ぼす隠れ端末を選択的かつ効果的に抑制する方式であるとはいえない。

そこで、以下では、衝突回避型に分類される手法のうち、ブロードキャストの受信に影響を及ぼす隠れ端末を効果的に抑制する手法のうち、本論文の提案手法と関連する SRTS ならびに RTB-DR について述べる。

2.1 SRTS

SRTS では、隠れ端末の送信を抑制するために送信端末と隣接する端末から危険度減少値の最も高い 1 端末を RTS 宛先端末に選択し、その端末とブロードキャスト前にユニキャストで RTS/CTS 交換を実施する。ここで、危険度減少値とは、その隣接端末が隣接する隠れ端末の持つ危険度の総和で表させる。危険度とは、その隠れ端末が隣接する隣接端末の個数で表される。

たとえば、図 1 に示すトポロジでは、隠れ端末 H1, H2, H3, H4 の危険度はそれぞれが隣接する隣接端末の数から 1, 1, 2, 1 となる。また、R1 の危険度減少値は、隣接する隠れ端末 H1, H2, H3 の危険度を合計した $1 + 1 + 2 = 4$ となる。同様に、R1 の危険度減少値は $2 + 1 = 3$ となる。

ここで、RTS 宛先端末は最も危険度減少値の高い端末とするため、同図では、R1 が選択される。SRTS では、このようにブロードキャスト送信前により多くの隠れ端末の送信を抑制することで、受信率向上を実現している。

2.2 RTB-DR

前述の SRTS では、事前の RTS/CTS 交換によって抑制されるのは、RTS 宛先端末に隣接する隠れ端末のみであっ

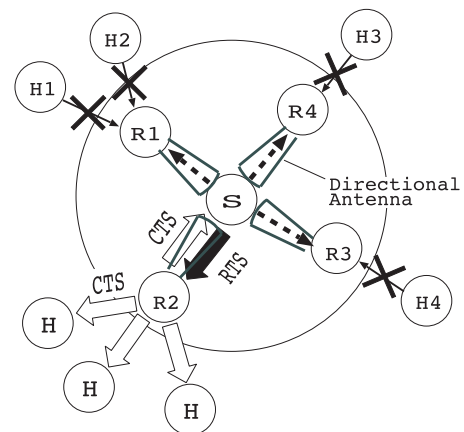


図 2 RTB-DR における隠れ端末抑制

Fig. 2 Collision mitigation control for hidden terminals on RTB-DR.

た。そのため、CTS によって抑制されない隠れ端末と隣接する端末はブロードキャスト中にそれらの端末からの干渉によって受信率が低下するという問題点がある。そこで、RTS 宛先端末以外の端末の受信率も向上させることを目的に RTB-DR が提案された。

RTB-DR では、RTS 宛先端末は CTS 返信後に、それ以外の隣接端末は RTS 傍受後にそれぞれ RTS の到来方向に対して指向性受信を開始する。そのため、RTB-DR ではブロードキャスト受信中に隠れ端末が送信を開始したとしても、受信中の端末はその干渉を排除することですべての隣接端末の受信率向上を実現している (図 2 参照)。

3. 指向性受信方式による低遅延 2hop ブロードキャストプロトコル: DTHB

本章では、パケットの伝達範囲が 1hop にとどまっていた MAC Level Broadcast プロトコルをルーティングプロトコルに依存せずに 2hop の範囲に拡張する手法として DTHB (Directional Two Hop Broadcast) を提案する。DTHB では前章で述べた RTB-DR 方式の指向性受信方式を基本とする。また、RTB-DR におけるブロードキャストでは送信端末から 2hop の範囲の端末が関係することから、これを利用して低遅延で 2hop ブロードキャストを行うこととする。

3.1 アンテナモデルと DTHB の前提条件

DTHB では、文献 [8], [17] と同様の機能を持つアンテナを端末に実装することを想定する。具体的には、図 3 に示すようにアンテナを m 個のアレイから構成し、どの方向に対しても、いずれか 1 つのアレイのビーム幅がカバーすることとする。また、同じく文献 [8], [17] と同様にすべてのアレイを使用して送受信をする無指向性モードと、1 つのアレイによって指定した方向にのみ送受信する指向性モードの 2 つのモードをパケットごとに切り替えることが

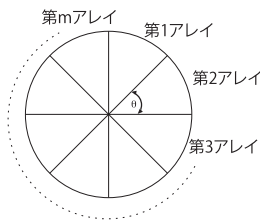


図 3 アンテナモデル
Fig. 3 Antenna Model.

可能であるとする．もちろん，文献 [18] で述べられているように無指向性アンテナと指向性アンテナを2つ端末に実装し，これらを切り替えて使用しても問題なく DTHB の制御を行うことができる．なお，DTHB においてすべての端末はアイドル状態にある間は無指向性モードによってすべての方向からの送信を受信できるものとする．

なお，DTHB では次節でも述べるように，受信したパケットの到来方向に受信利得を設定する．パケットの到来方向の検知方法としては，文献 [19], [20] のようにあらかじめ各端末が GPS によって測定した自身の位置情報を RTS, CTS といった制御パケット中に記録して通知する方法や，文献 [21], [22] のように受信信号から直接パケットの到来方向を推定する方式などがあるが，いずれの方法を使用しても DTHB の送信制御に影響は与えない．

また，DTHB によるブロードキャストを実施する際には，文献 [5] に提案されているように，送信端末は他端末宛の DATA や ACK などを傍受することで，それらのヘッダに記載された宛先，送信元アドレスを基に自身から 2hop 以内の端末の接続関係を把握していることとする．

ところで，DTHB の改良プロトコルについて説明する 3.3 節において端末間の距離推定を端末選択に利用することを述べているものの同機能は必須ではない．

3.2 DTHB の送信制御

DTHB では，RTB-DR 方式と同様にブロードキャストを指向性受信することで受信率向上を図る．さらに 1hop 先の端末のうち，あらかじめ送信端末から指定された複数の端末はブロードキャスト受信完了時に，ただちにそのパケットを送信端末からみて 2hop 先の端末に転送（中継ブロードキャスト）する．このとき，2hop 先の端末も 1hop 先端末と同様に指向性受信を行う．

このとき，送信端末は中継ブロードキャストを行わせる端末を DRTS 方式における CTS Reply 端末と同じアルゴリズム [7] で選定する．本論文における以下のアルゴリズムもそれらの端末を CTS Reply 端末と呼ぶが，以下のアルゴリズムにおける CTS Reply 端末はデータの送信要求とは独立にあらかじめ選定しているものとする．DTHB の動作手順を以下に記載する．

(1) 文献 [7] と同じアルゴリズムで 1hop 先端末の中から

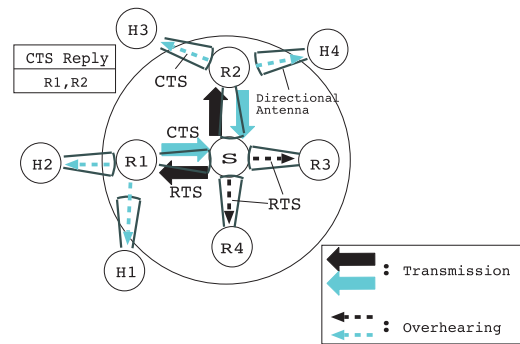


図 4 DTHB の動作概要
Fig. 4 Control procedure on DTHB.

CTS Reply を選定する．

- (2) 上記 (1) で選定した端末を宛先として RTS を送信する．このとき，RTS を傍受した CTS Reply でない 1hop 先端末は RTS の到来方向に対してただちに指向性を設定する．一方，CTS Reply として選定されている端末は RTS 受信後，SIFS 時間後に CTS を無指向で返信したのちに RTS の到来方向に対して指向性を設定する．そして，CTS Reply 端末から送信端末へ返信される CTS を傍受した 2hop 先端末もその到来方向に対して指向性を設定する．
- (3) 送信端末は RTS 送信後に CTS window を設定し，CTS Reply から返信される CTS の最後尾のビットの到着が完了が予定される時刻まで待機する．ここで，送信端末は CTS window 中の CTS の返信の有無にかかわらず，同期間の終了後は次の手順を実行する．
- (4) CTS window 経過後，SIFS 時間の間にキャリアが検知された場合は，一連の送信処理を終了するが，そうでなければ送信端末はブロードキャストを開始する．CTS Reply に選定されている端末はブロードキャストを受信後，2hop 先の端末に対して受信したパケットを中継ブロードキャストする．

図 4 に示すように，1hop 先端末のうち CTS Reply に選定された端末 R1, R2 は RTS/CTS 交換を行うが，そうでない端末 R3, R4 は RTS を，端末 H1, H2, H3, H4 は CTS をそれぞれ傍受することで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 方式と同様に DTHB においても指向性を設定した方向以外から到来するパケットによる干渉排除が期待できる．

ところで，RTB-DR あるいは DRTS などの RTS/CTS 制御をブロードキャストに応用したプロトコルでは，最も危険度減少値の高い隣接端末からの CTS の返信が確認できなければ，ブロードキャストを開始しない．このような手法は，対象端末からの CTS の返信を成功させることで，1度に多くの隠れ端末の送信抑制を実現する．しかしながら，高いレートで干渉トラフィックが発生している状況下では，多くの隠れ端末と隣接する端末から CTS の返信を得

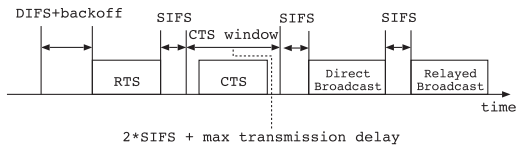


図 5 DTHB の送信所要時間

Fig. 5 Transmission period on DTHB.

ることは非常に難しくなる。そのため、送信端末が、キャリアセンスによって送信権を獲得したにもかかわらず、実際にブロードキャストを開始できないことが多くなる。

そこで、本論文で提案する DTHB は上述の送信手順にもあるとおり、送信端末が送信権を獲得した場合には、CTS window 終了後の SIFS 時間にキャリアが検知されなければ必ずブロードキャストを開始することで、送信回数の急激な低下を回避する手法を採用する。

DTHB は CTS Reply に選定された端末が受信完了後に即時中継ブロードキャストすることにより、送信端末からの DATA パケットを短時間で 2hop 先端末に配信できる。これに対して無線 LAN に採用される既存の CSMA/CA では、送信所要時間のうちパケットが実際にチャネルに送出される前の DIFS 時間、バックオフ時間は DATA パケット長とは無関係に必要となる時間である。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。しかしながら、DTHB では、図 5 に示すように、これらのオーバーヘッド部分である中継ブロードキャスト時の前の DIFS + バックオフ時間を省略して 2hop 先端末へ送信することができる。また、その際、指向性受信との併用により受信率を維持しつつ中継ブロードキャストを実施することが期待できる。

3.3 SCR (Sub CTS Reply) 機能の導入

DTHB における 2hop 先端末の受信率を向上させるために、CTS Reply 端末がブロードキャストの受信に失敗した際に、これを検知した端末が代理で中継ブロードキャストを実施する SCR (Sub CTS Reply) 機能を提案する。

図 6 に SCR 機能の動作概要を示す。ここでは、端末 R5 を CTS Reply 端末 R1 の代理端末とする。SCR 機能では、代理端末は各 CTS Reply 端末につき 1 台ずつ選定するものとし、すべての CTS Reply 端末に対し、その ID の小さい順に代理端末の選定を行う。以下では、送信端末 x から 1hop, 2hop の距離にある端末の集合をそれぞれ、 S_x , T_x とするとともに、送信端末 x の CTS Reply 端末の集合を C_x とする。また、選定した代理端末の集合を P_x とする。

- (I) $P_x = \phi$ とする。
- (II) 送信端末 x の CTS Reply 端末の中から代理端末の選定を行っていない端末を 1 つ取り出し、これを端末 $y \in C_x$ とする。
- (III) 集合 $U = S_x - C_x - P_x$ を構成する。

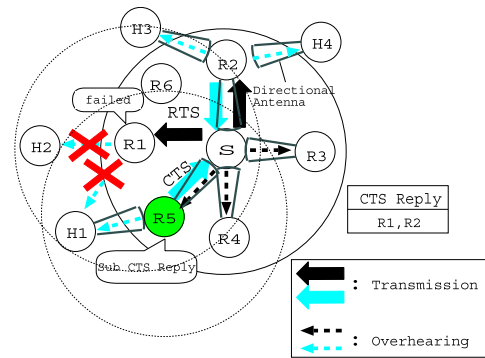


図 6 SCR 機能を適用した DTHB の動作概要

Fig. 6 Transmission procedure of SCR.

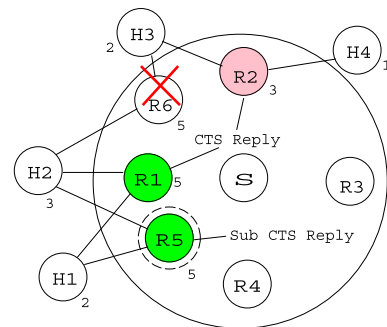


図 7 SCR における代理端末の選定例

Fig. 7 Selection of proxy relay terminal on SCR.

- (IV) 集合 $V = (C_x - \{y\}) + P_x$ を構成する。
- (V) 集合 $W = \{u \in U | \forall v \in V \text{ に対し, } u \text{ と } v \text{ が隣接しておらず, かつ, } u \text{ ならびに } v \text{ のどちらもとも隣接するような } t \in T_x \text{ が存在しない}\}$ を構成する。
- (VI) W に含まれる y の代理端末候補のうち、危険度減少値が最大の端末が 1 つであればその端末を、複数存在していればそれらの中で最も距離が近い端末を y の代理端末 $w \in W$ とする*1。ここで、 W が空集合ならば、その端末 y の代理端末は設定しない。
- (VII) $P_x = P_x \cup \{w\}$ とし、まだ、代理端末を計算していない CTS Reply 端末が C_x に残っていれば、手順 (II) に戻って手続きを続行する。

図 7 に図 6 と同じトポロジにおける選定例を示す。ここで、1hop 先端末と 2hop 先端末に示す数字は、それぞれ危険度減少値、危険度である。また、色付きの端末は CTS Reply 端末と代理端末のペアを示しており、破線で囲まれた端末がそうでない同色の端末の代理端末であることを示している。R1 の隣接端末である R6 は他の CTS Reply 端末である R2 と隣接しているため、選定候補から除外される。結果、R1 の代理端末は R5 となる。R2 に着目した場合には、同様に R6 は選定候補から除外されるため、R2 の

*1 あらかじめ、受信強度の測定などの方法により各端末は隣接端末との距離を調査済みであるとするが、調査できない場合には対象となる端末の中からランダムに 1 つを選択しても性能に大きな影響は与えない。

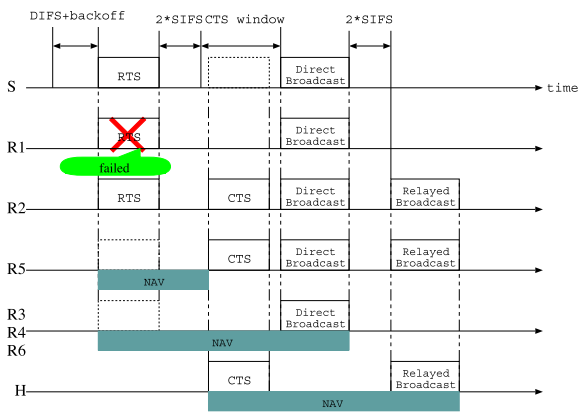


図 8 SCR 機能を適用した DTHB のチャンネルアクセス手順
 Fig. 8 Channel access sequence on SCR.

代理端末は設定されないこととなる。

次に、図 6、図 8 に示すように CTS Reply 端末である R1 が RTS の受信に失敗したと仮定する。端末 R1 の代理端末である R5 は RTS を正しく受信した場合は、その直後からキャリアセンスを開始する。ここで、端末 R1 から CTS が返信されていることを検知できなかった場合、端末 R5 は端末 R1 が RTS の受信に失敗したと判断し、自身が代理端末として CTS を返信する。

さらに、CTS Window 期間後に送信される、ブロードキャストを端末 R5 が正しく受信した場合は、端末 R5 が端末 R1 の代わりに 2hop 先端末に向けて中継ブロードキャストを行う。ここで、端末 R1 が仮にブロードキャストの受信に成功したとしても、2hop 先端末上での衝突を避けるために中継ブロードキャストを行うのは必ず、実際に CTS を返信した端末 R5 とする。しかし、CTS Reply 端末および代理端末が双方とも RTS の受信に失敗した場合は、CTS を返信していなくても中継ブロードキャストを CTS Reply 端末が実施してもよいこととする。これは、送信端末からのブロードキャストを受信後、CTS Reply 端末はキャリアセンスを開始し、代理端末から中継ブロードキャストが実施されていることを検知できなかった場合に実施する。

4. DTHB の性能評価

本章では、3 章で取り上げた DTHB の特性評価の結果について述べる。評価に用いたシミュレーション諸元を表 1 に示す。また、図 9 に示すように、シミュレーションフィールドの中心に配置する端末をブロードキャスト送信端末とする。

さて、性能評価においては、文献 [5], [8] と同じく C++ を用いて開発したイベントドリブン型のシミュレータを使用した。本評価では、文献 [5], [8], [13] と同様に、無線チャンネルにおけるフェージングおよび雑音に起因する送受信の失敗は発生しないと仮定し、パケットの送受信の失敗はパケットどうしの衝突によってのみ発生するものとした。こ

表 1 シミュレーション諸元
 Table 1 Simulation parameters.

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

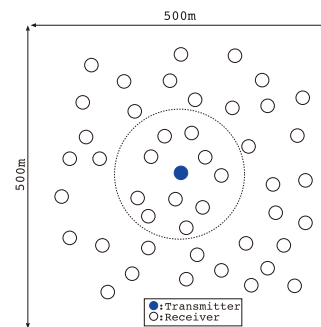


図 9 シミュレーションフィールド
 Fig. 9 Simulation field.

こで、干渉モデルには、通信可能距離と干渉距離が同じとなる single disk model を用いた。なお、以降の性能評価において特に指定がない限りは、ブロードキャストならびにユニキャストともに Payload は 512 Byte とした。

4.1 ブロードキャスト実施割合

図 10 に送信端末が送信権を獲得したもののうち、実際にブロードキャストを開始できた割合をブロードキャスト実施割合で評価した結果を示す。

本評価では送信するトラフィック全体に対して、受信成功した割合を評価する。評価において、トラフィックは MAC レベルにおけるオフロードとした。具体的には、ブロードキャスト送信端末ならびにその他のすべての端末において、指数分布に従ってランダムに発生させた送信要求の総和をトラフィックとした。ここで、ブロードキャスト送信端末に発生した送信要求はすべてブロードキャストとして処理した。対して、その他のすべての端末に送信要求が発生した場合には、その端末に隣接する端末の中からランダムに選択した 1 端末に対してユニキャストで DATA を送信させることで、ブロードキャストに対する

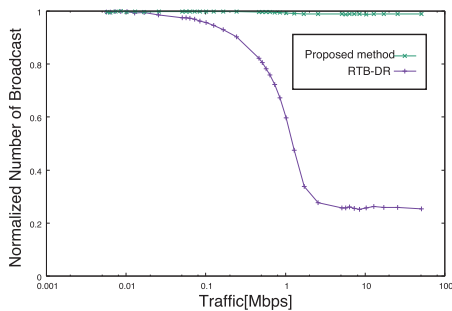


図 10 ブロードキャスト実施割合

Fig. 10 Characteristics of broadcast executing ratio.

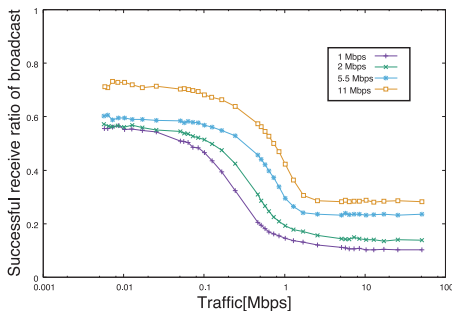


図 11 伝送レートによる受信率の変化

Fig. 11 Characteristics of successful broadcast receive ratio on varying transmission rate.

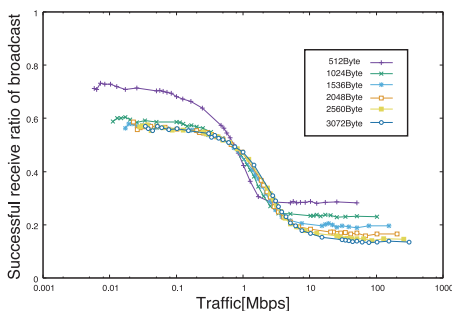


図 12 パケットサイズによる受信率の変化

Fig. 12 Characteristics of successful broadcast receive ratio on varying packet length.

干渉源とした。

ここでは、DTHB ならびに RTB-DR の総ブロードキャスト回数を RTS の送信回数で割った値を示している。同図に示す結果より、RTB-DR では、トラフィックが増加するに従って、干渉源となる周辺端末が送信を行うことによって CTS の返信が得られなくなるため、ブロードキャストを開始する割合が急激に低下するが、提案方式である DTHB では送信権を獲得した場合はほぼ必ずブロードキャストが開始できていることが確認できる。

4.2 ブロードキャスト受信率

4.2.1 伝送レートとパケットサイズの変化

図 11, 図 12 に伝送レートとパケットサイズをそれぞれ変化させた場合の DTHB の受信率の変化を示す。こ

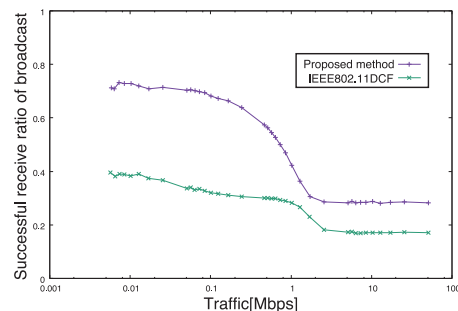


図 13 ネットワーク全体の受信率特性

Fig. 13 Characteristics of successful broadcast receive ratio.

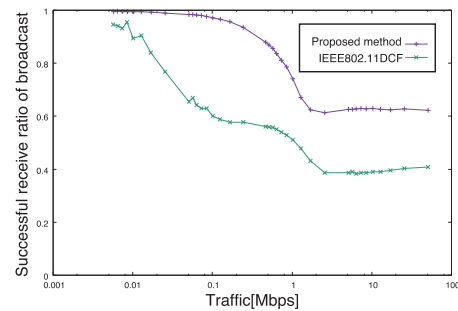


図 14 1hop 先端末の受信率特性

Fig. 14 Characteristics of successful broadcast receive ratio of 1hop terminals.

では、単位時間あたりの受信率 R を次式で算出する。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n recv_i}{nS} \quad (1)$$

ここで、 n は送信端末から 2hop 以内のすべての端末数とする。また、単位時間あたりの送信端末のブロードキャスト送信回数を S 、端末 i の成功受信数を $recv_i$ とする。

まず、図 11, 図 12 のどちらの図においてもトラフィック負荷が高くなることによって干渉源となる端末との間でパケット衝突が発生するために、受信成功率が低下していることが分かる。

次に、図 11 から、DTHB では伝送レートの高速化にともない受信率も向上していることが分かる。これは、高い伝送レートでは 1 パケットあたりの送信時間が短くなるために衝突確率が低下したためであると考えられる。また、図 12 からは、パケットサイズを増加させると受信率が低下することも確認できる。これは、パケットサイズの増加にともない 1 パケットあたりの送信時間が増加し、衝突確率が高くなったためであると考えられる。

4.2.2 IEEE802.11DCF との性能比較

図 13, 図 14, 図 15 にトラフィック負荷に対する受信端末全体, 1hop 先の受信端末のみ, 2hop 先の受信端末のみの受信率の特性をそれぞれ示す。これらの図では、DTHB の比較手法として IEEE802.11DCF を用いている。ここで、IEEE802.11DCF として示した結果は、1hop 先端末が送信端末のブロードキャストを受信後、キャリアセンスの

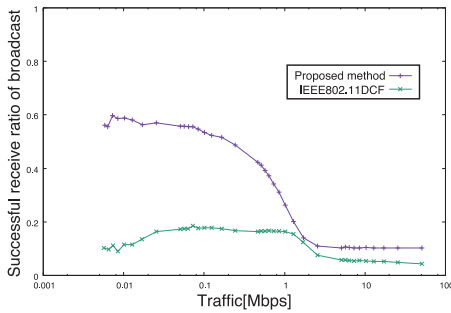


図 15 2hop 先端末の受信率特性

Fig. 15 Characteristics of successful broadcast receive ratio of 2hop terminals.

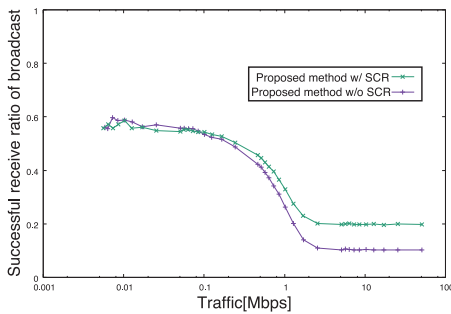


図 16 SCR 機能を適用した DTHB の 2hop 端末の受信率

Fig. 16 Characteristics of successful broadcast receive ratio of 2hop terminals by SCR.

後にあらためてブロードキャストを実施した場合の結果となっている。

これらの図より、どの結果においてもトラフィックが 0.5 Mbps を超えたあたりから受信率が低下しているが、特に、2hop 先端末の受信率が大きく低下していることが確認できる。これはトラフィックの増加とともに送信端末からの RTS の受信（傍受）に失敗する端末が増えることで、ブロードキャストに対する指向性受信を設定できなくなったこと、ならびに、CTS Reply 端末からの中継ブロードキャスト数が大きく減少したことなどが理由として考えられる。

そして、受信率の低下は 5 Mbps 以上のトラフィックではほぼ横ばいとなる。これは、ネットワーク中の各端末への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、実際のチャンネル上でのパケット伝送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。

4.2.3 SCR 機能の効果の評価

図 16 に DTHB における SCR の適用有無と 2hop 先のブロードキャスト受信率の関係性を評価した結果を示す。同図より、低トラフィック時においては、両手法の間にはほとんど差は見られないが、トラフィックの増加とともに SCR を適用することによって受信率が向上していることが分かる。これは、トラフィックが増加することによって、DTHB の CTS Reply 端末が中継ブロードキャストに

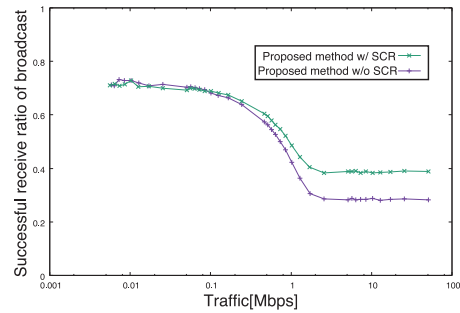


図 17 SCR 機能を適用した DTHB のネットワーク全体の受信率

Fig. 17 Characteristics of successful broadcast receive ratio of all receivers by SCR.

失敗しているのに対して、DTHB に SCR を適用することによって、代理端末による中継ブロードキャストが実施されたため、2hop 先端末の受信率が向上したためであると考えられる。

また、ネットワーク全体の受信率を示した図 17 においても、SCR の適用によって受信率が向上していることが確認できる。

5. おわりに

本論文では、送信端末から 2hop 以内の範囲に MAC Level で短時間にブロードキャストを行う DTHB を提案した。また、DTHB における高トラフィック時の 2hop 先端末の受信率低下を改善するために中継を担当する CTS Reply 端末の代理端末を導入する SCR 機能もあわせて提案した。

シミュレーションを用いた性能評価の結果から、DTHB は既存の IEEE802.11 と比べて高い公正性とブロードキャスト受信率を達成できること、ならびに、高トラフィック時にも獲得した送信権を無駄にせずにブロードキャストを開始することも明らかにした。さらに、SCR の評価結果からは、高トラフィック時に CTS Reply 端末の代理端末を導入することで、2hop 先端末の受信率向上に対して一定の効果が得られることを確認した。

今後は、高トラフィック時のさらなる受信率向上に向けて検討を進めるとともに、ブロードキャスト配信範囲を 2hop 先に限定せず、任意のホップ数までの中継ブロードキャストを MAC Level で実現できるプロトコルに向けた改良を行うつもりである。

参考文献

- [1] 佐藤 正, 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和: モバイル・アドホックネットワークにおけるフラディング方式, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, No.11, pp.31-38 (2001).
- [2] 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, Vol.105, No.627, pp.165-168 (2006).
- [3] 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, Vol.107, No.192, pp.25-30 (2007).

[4] 策力木格, 大坐島智, 加藤聡彦: 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, Vol.110, No.198, pp.37-42 (2010).

[5] 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, pp.453-465 (2010).

[6] Shigeyasu, T., Matsuno, H. and Morinaga, N.: A Broadcasting Method for Suppressing Hidden Terminals Effect on IEEE802.11DCF, *Proc. Intelligent Vehicular Communication Systems (IVCS)*, pp.1-5 (2009).

[7] Shigeyasu, T., Matsuno, H. and Morinaga, N.: A New Method for Improving MAC Level Broadcast Receive Ratio Using 2-Phase RTS/CTS Handshakes Sequence, *Proc. International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS 2009)*, pp.580-585 (2009).

[8] 重安哲也, 竹川恭平: 端末間のパケット受信成功率のばらつき軽減を目的とした衝突回避型 MAC レベルブロードキャストプロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.2, pp.639-648 (2014).

[9] Kurian, N. and Priya, B.: EMBHMAC: An efficient multihop broadcast based hybrid MAC protocol for wireless sensor networks, *Proc. Computer Communication and Systems 2014*, pp.233-238 (2014).

[10] Yang, M., Xu, Y. and Xu, K.: MAC layer broadcast algorithm in Ad Hoc networks with directional antennas, *Proc. 14th Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2011)*, pp.1-5 (2011).

[11] Sheu, S., Tsai, Y. and Chen, J.: A Highly Reliable Broadcast Scheme for IEEE802.11 Multi-hop Ad-hoc Networks, *Proc. IEEE ICC 2002*, New York, Vol.1, pp.610-615 (2002).

[12] Chen, J. and Huang, M.: A Broadcast Engagement ACK Mechanism for Reliable Broadcast Transmission in Mobile Ad Hoc Networks, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E88-B, No.9 (2005).

[13] 宇都宮依子, 萬代雅希, 笹瀬 巖: 無線アドホックネットワークにおいて NACK 及び指向性アンテナによるブロードキャストデータ再送信を用いた MAC プロトコル, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-B, No.2, pp.144-158 (2004).

[14] Tang, K. and Gerla, M.: Random access MAC for efficient broadcast support in ad hoc networks, *Wireless Communications and Networking Conference 2000, WCNC 2000*, Vol.1, pp.454-459, IEEE (2000).

[15] Tang, K. and Gerla, M.: MAC reliable broadcast in ad hoc networks, *Proc. IEEE MILCOM 2001*, Vol.2, pp.1008-1013 (2001).

[16] Chen, X., Tsaur, L.F., Refai, H.H. and Ma, X.: Fighting against access collision and hidden node problem in broadcast scheme of wireless ad hoc networks, *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp.258-262 (2013).

[17] Korakis, T., Jakallari, G. and Tassiula, L.: CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.7, No.2, pp.145-155 (2008).

[18] Feng, J., Ren, P. and Yan, S.: A deafness free MAC protocol for ad hoc networks using directional antennas, *Proc. IEEE ICIEA 2009*, Xi'an, P.R. China, pp.449-454 (2009).

[19] Ko, Y., Shankarkumar, V. and Vaidya, N.: Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in

Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, Vol.1, pp.13-21 (2000).

[20] Choudhury, R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *Proc. ACM MobiCom 2002*, pp.59-70 (2002).

[21] Takai, M., Martin, J., Ren, A. and Bagrodia, R.: Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. 3rd ACM MobiHoc 2002*, pp.183-193 (2002).

[22] Nasipuri, A., Li, K. and Sappidi, U.: Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas, *Proc. IEEE ICCCN 2002*, pp.620-626 (2002).



國安 哲郎 (学生会員)

平成 28 年 3 月県立広島大学経営情報学科卒業。現在, 同大学大学院総合学術研究科情報マネジメント専攻在学中。無線ネットワークに関する研究に従事。



重安 哲也 (正会員)

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。広島国際大学助手を経て, 現在, 県立広島大学経営情報学部准教授。主に, 無線通信プロトコルに関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。本会シニア

会員。