Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

指向性受信の導入による MAC レベルブロードキャスト特性の改善手法

竹川 恭平[1]　重安 哲也[1]

概要：代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 におけるブロードキャスト受信率を向上する手法としてユニキャストで RTS/CTS 交換をブロードキャスト前に実施する RTB 方式が提案されている．RTB 方式は，ブロードキャスト受信率は向上できるものの，常にユニキャスト RTS の宛先端末の周辺に位置する端末のみが優先的に保護されるため，受信端末間で受信率のばらつきが発生する．本稿ではこれを改善するために，RTB 方式に指向性アンテナを併用する RTB-DR を提案し，同方式の有効性について評価した結果を報告する．

キーワード：IEEE802.11，隠れ端末問題，RTS/CTS，ブロードキャスト，指向性受信

A New Method for Improving MAC-Level Broadcast Ratio by Directional Receiving

Kyohei Takegawa[1]　Tetsuya Shigeyasu[1]

Abstract: In order to improve broadcast receive ratio of IEEE802.11 which is widely used wireless LAN standard, RTB exchanging unicast RTS/CTS prior to broadcast, has been proposed. Although RTB can improve broadcast receive ratio effectively, variability of broadcast receive ratio becomes large among receivers due to unicast RTS/CTS only protects specific terminals. In this paper, we propose RTB-DR employs both RTB and directional receiving, and we report results of performance evaluations of the RTB-DR.

Keywords: IEEE802.11, Hidden Terminal Problem, RTS/CTS, Broadcast, Directional Receiving

1. はじめに

代表的な無線 LAN 規格である IEEE802.11 では，隠れ端末による干渉を抑制するために，RTS/CTS（Request To Send/Clear To Send）交換を規定している [1]．しかし，IEEE802.11 における RTS/CTS 交換は，ユニキャスト送信時では有効に機能するが，ブロードキャスト送信時は隠れ端末からの干渉によるパケット衝突を抑制できないためこれを使用できない．そのため，高トラフィック時に隠れ端末の影響によって受信率が大きく低下するという問題点が指摘されている [2]．

これまで，ブロードキャスト受信端末の中で，最も多くの隠れ端末と隣接している端末を選び出し，同端末に対しブロードキャストの開始前にユニキャストで RTS/CTS 交換を実施する RTB（RTS/CTS for Broadcast）方式を用いることで受信率を向上できることが報告されている [3]．しかし，同方式では隠れ端末と最も多く隣接している受信端末とその周辺端末を隠れ端末の干渉から守ることはできるものの，その他の隣接端末の状況は以前と変わらないため，ブロードキャストの平均受信率は向上するものの受信端末間で受信率のばらつきを生じさせてしまう危険性が高い．

本稿では，この問題を解決するため，受信端末に指向性アンテナを付与し，ブロードキャストパケットを指向性受信することによって，事前に RTS/CTS 交換を実施した端

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

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

末だけでなく，他の端末の受信率も併せて向上させることで端末間の受信率のばらつきを大きく改善する RTB-DR（RTB for Directional Receiving）方式を提案する．

以降，まず，RTB-DR の導入によってブロードキャスト受信率のばらつきが大きく改善することを述べる．次に，指向性アンテナを導入したブロードキャスト受信において，事前にどの端末とユニキャスト RTS/CTS 交換を行うかの選択が受信率の改善にどの程度影響するかを計算機シミュレーションにより評価し，RTB 方式と同様に隠れ端末と多く隣接する端末とユニキャスト RTS/CTS 交換を実施する方式が最も受信率を改善できることを明らかにする．

2. 既存方式

2.1 IEEE802.11DCF

2.1.1 IEEE802.11DCF の制御のしくみ

IEEE802.11DCF は，無線 LAN の代表規格である．IEEE802.11DCF のアクセス制御方式には CSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance）が用いられる．同方式では，新たに送信要求が生じた端末は無線チャネルの使用状況を監視し，周辺端末によってフレームの送信が行われていなければそのまま新たな送信を開始する．逆に，既に他の送信が行われていれば自端末は待機し，その送信が終了した後に新たな送信を開始する．このように，他の端末との同時送信を回避することで，フレームの衝突を防ぐことができる．

2.1.2 隠れ端末対策

IEEE802.11DCF では，隠れ端末問題を解決するために RTS/CTS 交換を規定している．これは，キャリアセンスが有効に機能しない場所に端末が存在する場合の衝突回避に有効な制御である．図 1 は，隠れ端末によるパケットの衝突を図示したものである．同図の送信端末 S_1，S_2 が受信端末 R に向かって送信を行おうとしている．このとき，送信端末 S_1，S_2 は送信前に他の端末が送信を開始していないかをキャリアセンスによって判別する．しかし，S_1，S_2 は互いのキャリアセンス範囲外に位置しているため，互いの送信を検知できない．このため，それぞれが受信端末 R に対してパケットを送信をしてしまい，R 上で衝突が発生する．

この問題を解決する方式である RTS/CTS 交換は，図 2 のように，送信端末 S_1 がデータを送信する前に相手先端末に RTS を送信する．これを受け取った受信端末 R_1 はデータ受信可能状態であれば CTS を返信する．S_1 は R_1 から CTS が返信されたことを確認し，データの送信を行う．このとき，RTS 及び CTS を漏れ聞いた周辺端末 S_2，R_2 は送信を一定時間待機する．このようにして RTS/CTS 交換は隠れ端末の送信を抑制し，パケット衝突を防ぐことができる．

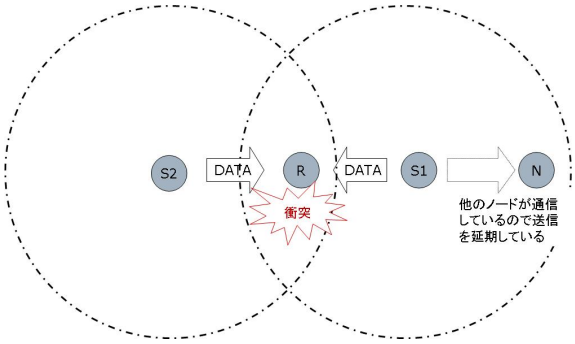


図 1 隠れ端末問題によるパケットの衝突

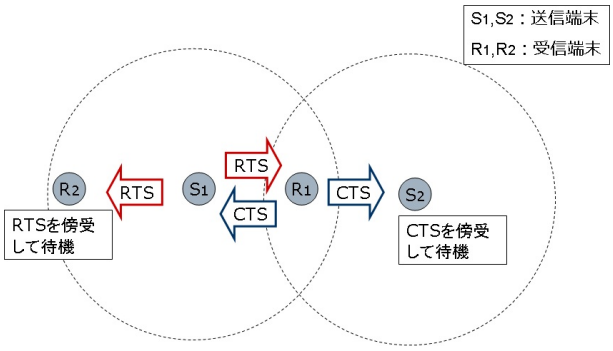


図 2 RTS/CTS 交換

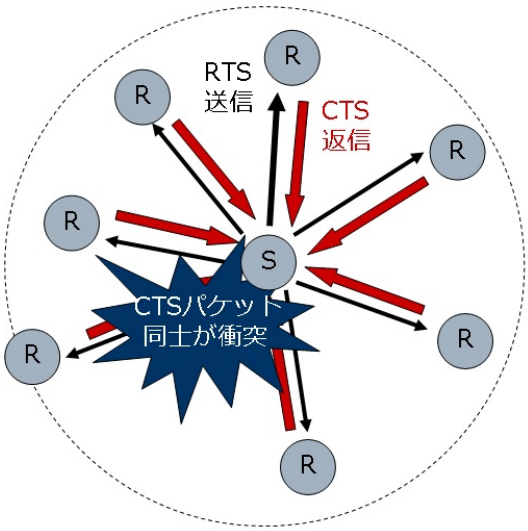


図 3 ブロードキャスト通信における RTS/CTS の問題点

2.1.3 IEEE802.11DCF の問題点

前述のように IEEE802.11DCF における RTS/CTS 交換は，ユニキャストでは隠れ端末を抑制できるが，図 3 のように，不特定多数の受信端末に対して一度に送信を行うブロードキャストにおいて同時に RTS/CTS 交換を用いると，全ての受信端末が同時に CTS を返信してしまうため，送信側で CTS 同士の衝突を発生させてしまうため RTS/CTS 交換が成立しない．

2.2 RTB 方式

ブロードキャスト時にも隠れ端末の送信を抑制する方式

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

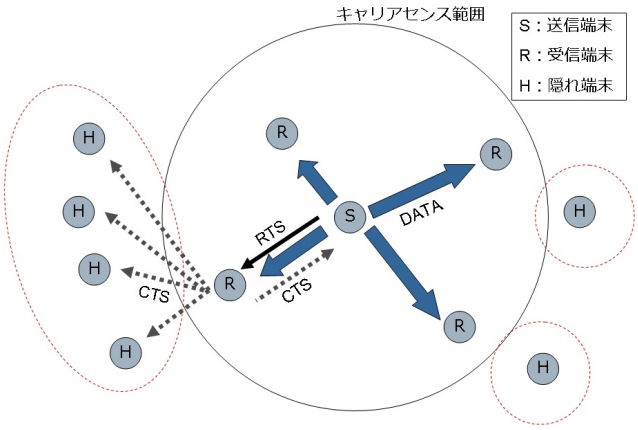


図 4 RTB 方式

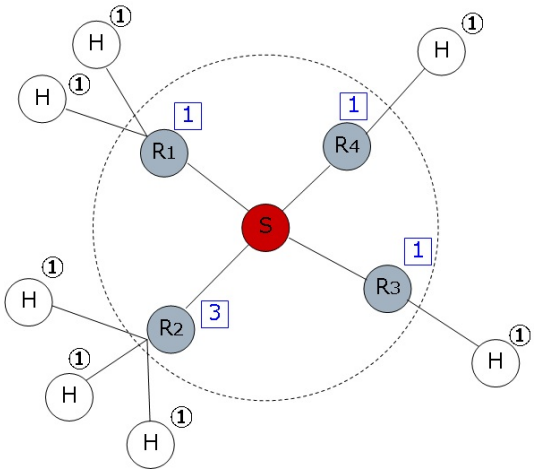


図 5 危険度減少ポイント

として RTB（RTS/CTS for Broadcast）方式が提案されている [3].

2.2.1 RTB 方式での送信制御 [3]

RTB 方式は，図 4 に示すように，RTS/CTS 交換をする前に，ブロードキャスト端末が自身から 2hop 先までの端末との隣接状況を調査し，ブロードキャスト受信端末ごとに隠れ端末との接続個数を算出する．そして，危険度減少ポイントと呼ぶ，どの隣接端末と RTS/CTS 交換をすれば最も多くの隠れ端末の送信を抑制できるかを示す値を計算する．

危険度減少ポイントの算出方法を図 5 に示す．まず，送信端末 S の送信範囲内にある各受信端末がそれぞれ，いくつの端末と隣接しているかを調べる．各受信端末と隣接している端末が送信端末 S の隠れ端末であれば，危険度の値を増やす．なお，図中の端末 H の右上の丸囲みの数字は危険度を示している．そして，各受信端末と接続する隠れ端末の危険度の合計を各受信端末の危険度減少ポイント（周囲の受信端末 R の右上の枠囲みの数字）とし，その数値が最大になる受信端末を RTS の宛先端末とする．図では端末 R_2 が最も危険度減少ポイントが高いため，R_2 と RTS/CTS 交換を行う．これを行うことで，単一の端末とのみ RTS/CTS 交換を実施するにも関わらず，ブロードキャスト受信率は大きく向上する．

2.2.2 RTB 方式の問題点

RTB 方式は，隠れ端末と多く隣接している端末に対してユニキャスト RTS/CTS 交換を行うことで受信率を改善する方式であるが，問題点も存在する．図 6 のように，RTB 方式は送信端末 S の送信範囲のうち，受信端末 R_1 を事前の RTS/CTS 交換によって守ることができるが，それ以外の端末 R_2，R_3，R_4 を隠れ端末の干渉から守ることはできない．そのため，RTB 方式では，IEEE802.11DCF と比べて平均受信率は向上するが，R_1，R_2，R_3，R_4 の各受信端末間の受信率にはばらつきが発生する．

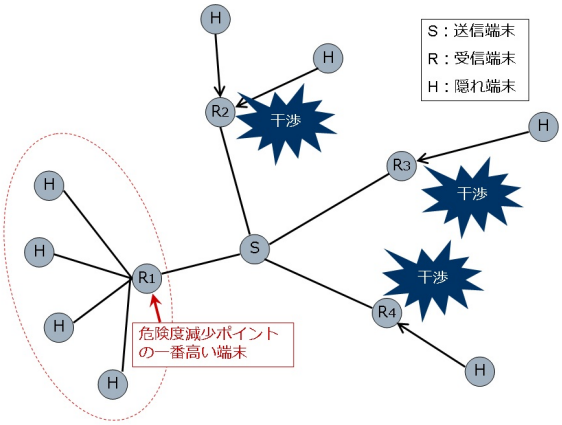


図 6 RTB 方式の問題点

3. RTB-DR

RTB 方式における受信率のばらつきを解決するために，以下で RTB-DR 方式を提案する．

3.1 RTB-DR の動作

RTB-DR 方式では，ブロードキャスト受信の際に指向性アンテナを用いる．想定する指向性アンテナの構成を図 7 に示す．指向性アンテナは，円を分割した複数のアレイによって構成されている．各アレイは独立して指向性受信をするかどうかを切り替えることができ，指向性受信がオフになっている状態でアレイに対して干渉パケットが到来しても，アンテナはパケットの受信を行わない．

RTB-DR 方式は，RTB 方式と同じく危険度を最も減少させる端末に対し事前にユニキャスト RTS/CTS 交換を行うが，全ての受信端末は RTS を傍受することによりブロードキャストパケットを指向性受信する．図 8 に，送信制御の流れを示す．指向性アンテナを導入した各端末は，同アンテナはアイドル状態の時には全方向に受信が可能な無指向状態になっているが，RTS を受信（傍受）すると CTS

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

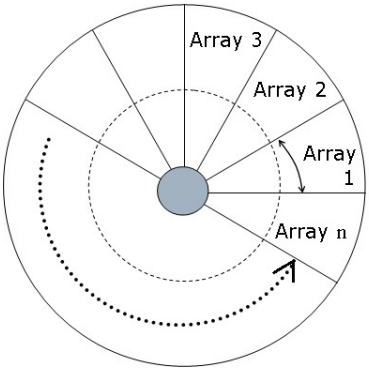


図 7 アンテナモデル

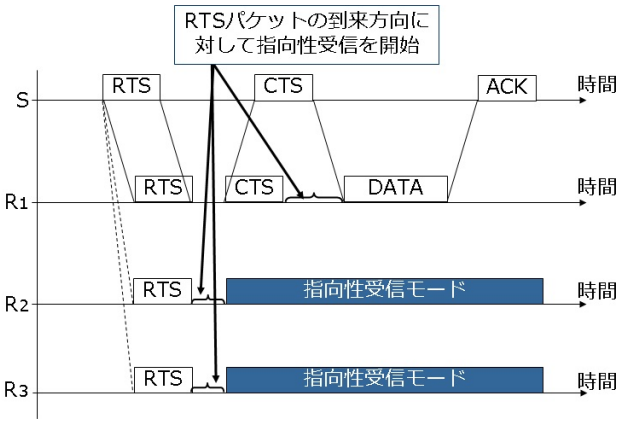


図 8 RTB-DR の送信制御

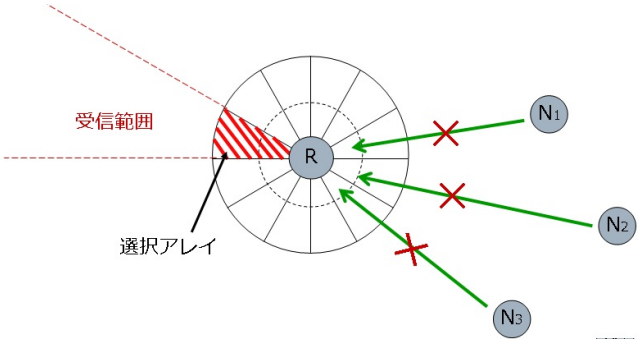


図 9 指向性受信

の返信後に RTS パケットの到来方向のアレイのみを用いてブロードキャストパケットを受信する．RTS を傍受した端末も同様に指向性受信を開始する．このとき，図 9 のように，選択したアレイ以外の方向から送信された干渉パケットの影響は排除される．

3.2 RTB-DR 方式の利点

RTB-DR 方式の導入により期待される効果は次の 2 点である．前者は，事前のユニキャスト RTS の宛先とならなかった他の受信端末も隠れ端末による干渉から守ることができる点である．図 10 に示すように，RTB-DR 方式では RTS を受信した端末は適切な方向のみのアレイを選択できる．そのため，図の受信端末 R_1，R_2，R_3，R_4 のうち，

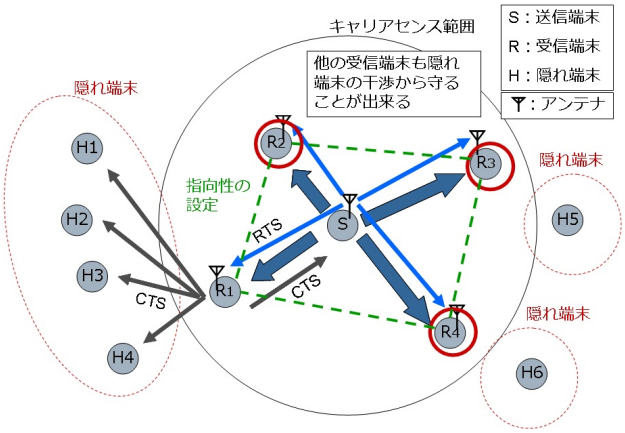


図 10 RTB-DR による隠れ端末問題の解決

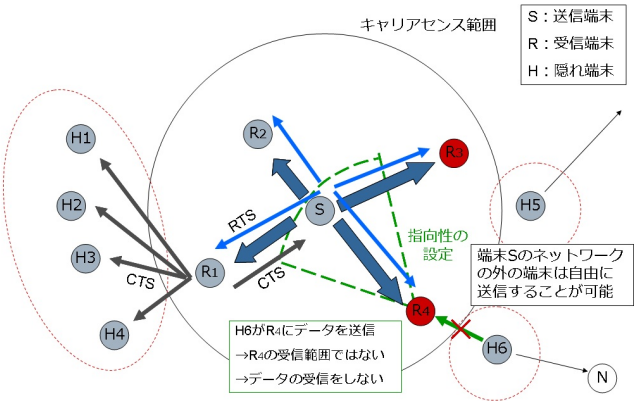


図 11 RTB-DR による利用効率の改善

最も多くの隠れ端末と隣接している R_1 が RTS/CTS 交換によって隠れ端末から守られると同時に他の受信端末は，指向性受信によって隠れ端末による干渉を防ぐことができる．このようにして，全ての受信端末を隠れ端末問題から守ることができる．

後者の利点は，ネットワーク全体のスループットを向上できる点である．図 11 では，端末 S の隠れ端末である端末 H_6 が端末 N に対して送信を開始する状況を示している．RTB 方式では，RTS 及び CTS を漏れ聞いた端末は送信を一定時間待機するため，図の端末 H_6 は RTB 方式であれば隣接端末 R_4 からの CTS を漏れ聞いて送信を待機してしまい，送信端末のネットワーク外の通信にもかかわらず，送信が行われない．しかし，RTB-DR 方式では，送信端末の範囲内にある受信端末は指向性受信を開始するため，指向性を向けた方向以外からのパケットの干渉は遮断するため，受信を待機する必要はない．図の端末 H_6 は RTB-DR 方式では送信を待機するようにはなっていないため，送信端末 S の送信範囲外であれば自由に送信を行うことができる．以上のように，指向性受信を導入することにより同時並行送信数を増加させスループットを向上できる．

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

表 1　シミュレーション諸元

Parameter	Value
Data Rate	11Mbps
Communication Range	100m
Arrival Process	Poisson Arrival
Number of Arrays	12
Simulation Field	400m × 400m

4. 提案方式の有用性評価

提案方式の有効性を評価するために，50 端末から構成されるネットワークにおいてブロードキャスト受信率および受信率の分散を計算機シミュレーションにより算出した．同評価では IEEE802.11DCF，RTB 方式の 2 方式を比較として用いた．

表 1 にシミュレーション諸元を示す[*1]．

4.1 ブロードキャスト受信率分散特性

ブロードキャスト受信率の分散特性を図 12 に示す．分散値は低い値であるほど，端末間の受信率のばらつきが小さいことを示す．図 12 から，IEEE802.11DCF と RTB 方式はトラフィックが高くなっていくにつれてばらつきが大きく変動している．また，高トラフィック時では，RTB 方式が IEEE802.11DCF よりも受信率のばらつきの変動が大きくなっているが，これは，トラフィックが低い状況であれば RTS/CTS を行うことで一度に隠れ端末からの干渉を抑えることができる端末とそうでない端末が存在していたため，RTB 方式が有効であったが，トラフィックが高くなると，どの隣接端末も危険度が高く，ある端末に対して RTS/CTS を行ってもそれ以外の端末と隣接している隠れ端末からの干渉を抑えることができないため，この部分でのばらつきの値が変わっていると考えられる，

しかし，指向性受信を導入した RTB-DR 方式では比較的ばらつきは小さいまま値が推移している．これは，RTB 方式では危険度の最も高い端末のみとユニキャスト RTS/CTS 交換をするため，隠れ端末の干渉から守られない端末が存在するが，RTB-DR 方式では，危険度が低いために事前に RTS/CTS 交換の際の RTS の宛先とならなかった全ての端末も指向性受信によって隠れ端末からの干渉から守られるためであると考えられる．

4.2 ブロードキャスト受信率特性

図 13 に各方式のブロードキャスト受信率の特性を示す．同結果より，隣接端末のうち危険度の高い端末とユニキャスト RTS/CTS 交換を行う RTB 方式と RTB-DR 方式は，IEEE802.11DCF よりも高い受信率を達成できることが確認できる．さらに RTB-DR 方式は，高トラフィック時においても受信率の低下が少なく，指向性アンテナを導入したことによる隠れ端末からの干渉の抑制が効果的に機能していることがそれぞれ確認できる．

[*1] IEEE802.11b の規格に従っている．

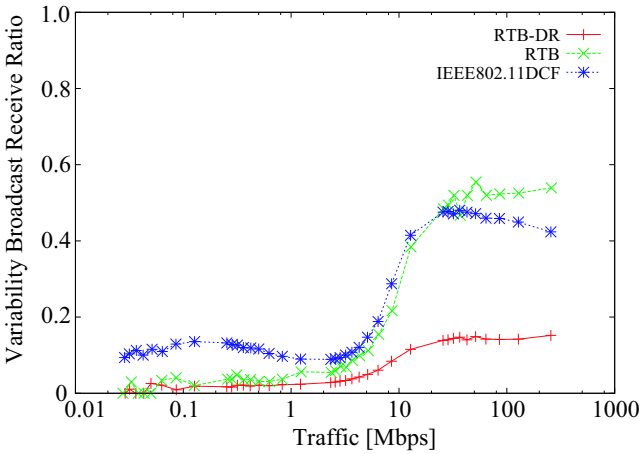


図 12　ブロードキャスト受信率分散特性

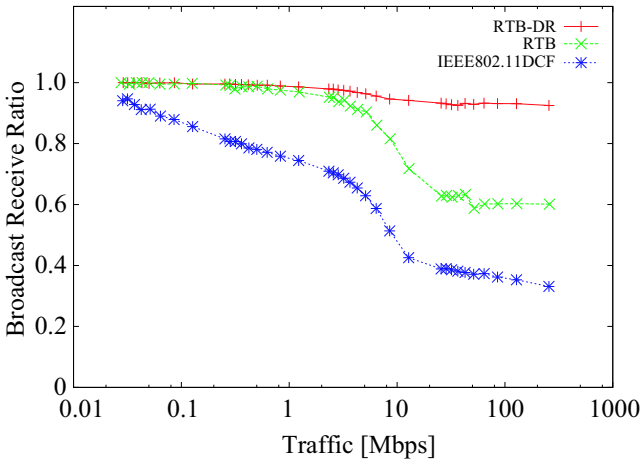


図 13　ブロードキャスト受信率特性

5. RTS/CTS 交換の宛先端末の選択

ここまで，指向性受信を導入した RTB-DR 方式は導入しない他の方式に比べ，受信率のばらつき及び受信率の向上にどの程度影響するかを計算機シミュレーションによって示した．提案方式では指向性受信を導入することにより受信率のばらつきが改善されたことは既に述べたとおりであるが，以下では，RTB-DR 方式における受信率のばらつきの改善の要因が指向性受信の導入のみによるものであるかどうかについて，計算機シミュレーションを用いて確かめた．

5.1 計算機シミュレーション

指向性受信方式における RTS/CTS 端末の決定方法の比較として，ここでは提案方式 RTB-DR と，隣接端末のうちからランダムに RTS の宛先端末を指定する方式，隣接端末のうちから順番に RTS の宛先端末を決めるラウンド

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

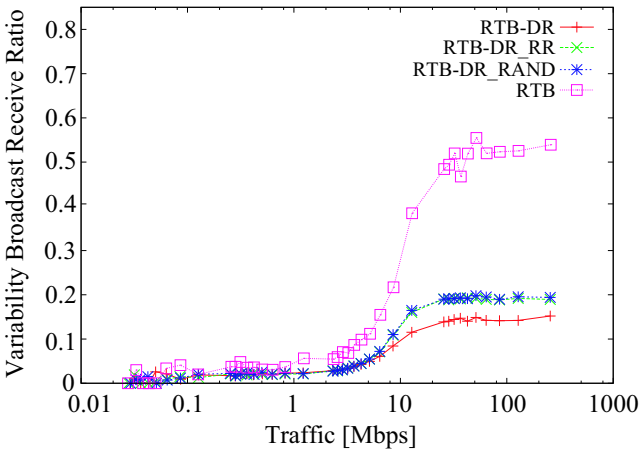


図 14 RTS/CTS 交換の宛先を変えた場合の受信率分散特性

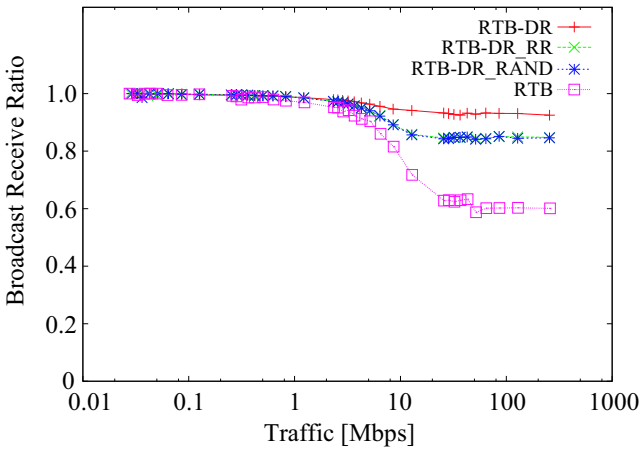


図 15 RTS/CTS 交換の宛先を変えた場合の受信率特性

ロビン方式および RTB 方式の 4 方式で比較し，それぞれのブロードキャスト受信率および受信率の分散を計算機シミュレーションにより算出した．シミュレーション諸元については表 1 の通りとした．

5.2 RTS/CTS 交換の方法を変えた場合の受信率分散特性

RTS の宛先選択方法の違いとブロードキャスト受信率の分散特性を図 14 に示す．図 14 では，指向性受信を導入した RTB-DR，RTB-DR_RR，RTB-DR_RAND の 3 方式は，導入しない RTB 方式に比べてどれも受信率のばらつきが低く抑えられていることが確認できる．

また，指向性受信を導入した 3 方式についても，ラウンドロビン指定の RTB-DR_RR，ランダム指定の RTB-DR_RAND の 2 つはほぼ同じ程度の受信率のばらつきを示すのに対して，RTB-DR はこれら 2 方式と比べ最も受信率のばらつきを低く抑えることができている．これによって，隠れ端末と最も多く隣接している端末に対して RTS/CTS 交換を行うことが，受信率のばらつきの改善に寄与していることがわかる．これは，ラウンドロビン方式，ランダム方式では，RTS/CTS 交換をした端末が隠れ端末と隣接しておらず，RTS/CTS 交換による隠れ端末の抑制ができない場合があるのに比べ，RTB-DR による決定方法は RTS/CTS 交換をする端末を常に最も多くの隠れ端末と接続している端末に指定することができるためであると考えられる．

5.3 RTS/CTS 交換の宛先を変えた場合の受信率特性

図 15 に RTS の宛先端末の決定方法を変えた場合のブロードキャスト受信率の特性を示す．図 14 と同様に，指向性受信を導入することで，RTB 方式に比べて高い受信率を維持することができている．さらに，指向性アンテナを導入することに加えて，隠れ端末と最も隣接している端末を RTS/CTS 交換先に指定する RTB-DR 方式は，高トラフィック時であっても受信率の低下は見られない．この理由として，RTB-DR 方式では，隠れ端末と一番多く接続している端末を必ず選択するため，隠れ端末からの干渉を RTS/CTS 交換した端末だけでなく，全ての端末を守ることが可能となるため，RTB-DR 方式は受信率の低下がほとんど見られなかったと考えられる．

6. おわりに

本稿では，ブロードキャスト時における受信率のばらつきを抑えるための方式として，RTB 方式に指向性アンテナを付与した RTB-DR 方式を提案した．計算機シミュレーションの結果から，RTB-DR 方式を用いることでブロードキャスト送信時での端末間における受信率のばらつきを小さく抑えられることを明らかにした．さらに RTB-DR 方式は，RTB 方式に比べてトラフィックの変動に対しても受信率が高い安定性を有することも併せて明らかにした．

次に，指向性受信を導入するだけではなく，RTB-DR 方式における RTS/CTS 交換をする端末の決定方法の違いが受信率にどのように影響するかについても，RTB-DR 方式が宛先端末をランダムやネットワーク中の隣接端末から順番に選んだ場合と比べて受信率のばらつきを低く抑えることができることも明らかにし，受信率の改善には RTS/CTS 交換をする端末の決定方法も影響を及ぼしていることを示した．

今後，複数ブロードキャストドメインが相互に干渉しあう状況下においても，指向性受信方式が隠れ端末からの干渉を低減し，ブロードキャスト受信率のばらつきを低減させる方法についても検討するつもりである．

参考文献

[1] Brian P.Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, Prescott T.Sakai:*IEEE802.11WirelessLocalAreaNetworks* (1997).
[2] 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

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-DPS-152 No.12
Vol.2012-GN-85 No.12
Vol.2012-EIP-57 No.12
2012/9/13

会研究報告 (2007).
[3] 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 (2008).

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan