

ストロングビジートーンを用いたアドホックネットワークのアクセス制御方式SBT-RCの提案と評価

伊藤 智洋¹ 旭 健作¹ 鈴木 秀和¹ 渡邊 晃^{1,a)}

受付日 2015年3月26日, 採録日 2015年10月2日

概要: アドホックネットワークの隠れ端末問題を解決するために, IEEE802.11 では RTS/CTS による方式が採用されている. しかし, この方式はパケット交換により実現するため, RTS とうしの衝突を防止することができない. また, タイミングによっては DATA パケットと CTS の衝突などが発生し, DATA パケットの再送が必要となる. 本論文では, ストロングビジートーン (以下 SBT) と呼ぶ特殊な制御信号を用いて周辺の端末の送信を抑制することにより, パケット衝突を大幅に削減し, スループットを向上させる方式 SBT-RC (SBT with RTS/CTS) を提案する. また, SBT を適用すると, CSMA/CA のバックオフ演算時間の要素となるスロットタイムを短縮することができ, さらなるスループット向上を実現できる. ネットワークシミュレータにより RTS/CTS による方式と提案方式を比較し, 提案方式の効果を確認したので報告する.

キーワード: アドホックネットワーク, ビジートーン, 隠れ端末問題

Proposal of Wireless LAN Access Control Method Using Strong Busy Tone and Its Evaluation

TOMOHIRO ITO¹ KENSAKU ASAH¹ HIDEKAZU SUZUKI¹ AKIRA WATANABE^{1,a)}

Received: March 26, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: In order to solve the hidden terminal problem in ad-hoc networks, the method using RTS/CTS is adopted in IEEE802.11. However, this method cannot solve the problem completely, because RTS and CTS are packets themselves, and collision between RTSs is inevitable. Also, collision between DATA and CTS can occur in certain timings, it is needed to retransmit DATA packets. In this paper, so-called Strong Busy Tone (SBT in short), that reports the busy state of the sending terminal, is introduced. It suppresses transmission of terminals in the vicinity, and decreases the number of collision dramatically. Moreover, slot time of back-off algorithm in CSMA/CA can be shortened if SBT is adopted. We have evaluated the proposed method by the use of network simulator and it is confirmed that the throughput is improved.

Keywords: adhoc-network, busy tone, hidden terminal problem

1. はじめに

タブレット端末, スマートフォンなどのモバイル端末の普及や新たな無線規格の開発にともない, 無線 LAN 技術の普及が急速に進んでいる. 無線 LAN は配線工事が不要であり, 端末の移動が可能であることから, 容易にネット

ワークの構築が可能である. 中でも, ネットワークインフラを必要としないアドホックネットワーク [1], [2] は, 災害発生時にネットワークインフラが破壊されたときや, イベント会場など急激に通信トラフィックが増加したときに利用できるネットワークとして注目されている. しかし, アドホックネットワークは隠れ端末問題による影響が大きく, トラフィックの増加により大幅にスループットが低下することが知られている [3]. IEEE802.11 [4] では, 隠れ端末問題の対策として RTS/CTS (Request To Send/Clear

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

a) wtnbakr@meijo-u.ac.jp

To Send) による方式が採用されている。RTS/CTS を用いることにより、受信端末近隣の端末を NAV (Network Allocation Vector) 状態に移行させ、衝突の発生を軽減させることができる。しかし、RTS/CTS はそれ自体がパケットであり、送信端末が送信したいという意思が隠れ端末まで伝わるのに所定の時間を要する。そのため、複数の隠れ端末が同時に RTS を送信して衝突を発生させる可能性がある。また、RTS/CTS の交換を行っている最中に、隠れ端末の関係にある端末よりもさらに遠方に位置する端末が RTS の送信を開始すると、NAV 状態が正しく設定されないうまま DATA 送信が開始されてしまい、DATA 自体が衝突により破壊される場合がある。RTS/CTS は MAC フレーム自体のフォーマットは短い、先頭に PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) ヘッダが必ず付与されるため、RTS と CTS の交換に要する時間が非常に大きく衝突が頻発する。このように、RTS/CTS による方式は、様々な課題をかかえており、アドホックネットワークの隠れ端末問題を解決しているとはいえない。

上記のような課題を解決するための手法としてビジートーン (以下 BT) を用いた方式が提案されている。BT とは単一の周波数の信号で、周辺端末にビジー状態をいち早く伝えることができるという特徴がある。DBTMA (Dual Busy tone Multiple Access) [5], VPDBT (Variable Power Dual Busy Tones) [6], ADBT (Asymmetric Dual Busy Tones) [7] は、受信側の端末が DATA を受信中に BT を送信し続ける。受信端末の周辺端末は BT を検出している間は送信を控えることにより隠れ端末問題を防止する。BT には NAV の概念がなく、BT そのものにより送信を抑制するため、NAV が不当に生成されることがないという利点がある。しかし、これらの方式は RTS に含まれる情報をもとに制御を開始するため、RTS どうしの衝突を防止することはできないという課題がある。EBTMA (Enhanced Busy-Tone-Assisted MAC Protocol) [8] は、上記方式とは異なり、RTS どうしの衝突を防止するための方式で、RTS とともに BT を通常のパケットより 2 倍の距離に到達するように送信する。これは BT が瞬時に遠隔地までビジー状態を伝えることができる利点を利用した方法である。電波到達範囲を変えることは電力消費に影響を与えるので、一般には望ましくない。しかし、電力消費は帯域幅に比例するものであり、BT のような狭帯域の信号は電力がもともと小さいので、このように到達範囲を広げても電力消費が問題になることはない。この方式は RTS どうしの衝突防止に一定の効果があるが、文献 [5], [6], [7] で解決していた受信端末周辺の端末の通信を確実に防止することができない。文献 [9] では、別の BT の活用方法として、異なる電波強度を持つ端末が混在する環境を想定し、2 種類の BT により周辺端末の送信を抑制する方式が提案されている。しかし、この方式は RTS どうしの衝突を防止できないと

いう課題がある。

本論文では、周辺端末を即時に制御できるビジートーンの特徴に着目し、ストロングビジートーン (以下 SBT: Strong Busy Tone) と呼ぶ新たな制御信号を導入する。SBT とは、BT の電波到達範囲を大幅に拡大した制御信号で、周辺端末を広範囲にわたって制御する。BT は情報を持たないため、瞬時に周辺端末を制御することが可能である。提案方式では、RTS に付随した SBT を通常のパケットより 3 倍の距離まで到達させる。次に、CTS に付随した SBT を 2 倍の距離まで到達させる。この方法により、RTS どうしの衝突を防止できるうえ、NAV が高い確率で正しく設定される。ただし、電波が相手端末に到達するまでのわずかの時間内に同時に送信を開始した場合は衝突を避けられない。RTS と CTS 双方に SBT を付与することから、この方式を SBT-RC と呼ぶ。SBT-RC は、RTS/CTS と併用するため、一般端末との共存が可能である。ここでいう一般端末とは、802.11 規格に準拠しており、RTS/CTS を実行し、BT を送信や受信できない端末のことである。

次に、本論文では SBT を用いることにより可能となるさらなる提案を行う。CSMA/CA では、衝突発生時にパケットを再送するまでのバックオフ待機時間はスロットタイム (以下 Δt) と乱数により求められる。 Δt は規格により定められた固定値と定義されており、一般には変更することができない。しかし、SBT を適用したシステムにおいては、 Δt 値の根拠を見直すことによりこの値を縮小することができる。 Δt が小さければ、待機時間が相対的に短くなるため、システムの伝送効率が向上する。

SBT は広範囲にわたって無条件に周辺端末の送信を抑えることになるため、システムとしてスループットを下げる要因にもなるという懸念がある。そこで ns-2 (Network Simulator2) を用いてシミュレーション評価を行い、SBT の適用効果を確認した。その結果、SBT の衝突防止によるプラス効果は、SBT の送信抑制によるマイナス効果を上回ることが分かった。さらに、SBT 導入により可能になった Δt の縮小が、スループットの向上に大きく貢献することが分かった。

以下、2 章では既存方式とその課題について、3 章では提案方式について、4 章ではシミュレーションの結果についての説明を行う。最後に 5 章でまとめを行う。

2. 既存技術とその課題

2.1 RTS/CTS による方式の課題

RTS/CTS による方式の課題の例を図 1, 図 2 に示す。以後、図 1 に示す課題を課題 1, 図 2 に示す課題を課題 2 と記述する。端末 A, B, C, D はお互いに電波が 1 ホップ分届く位置にあるものとする。端末 A と端末 C は隠れ端末の関係にあり、端末 A から端末 B に送信が行われている。ここで、DIFS (Distributed coordination function InterFrame

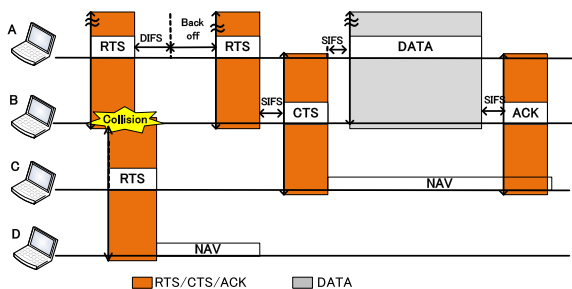


図 1 RTS/CTS の課題 1
Fig. 1 Issue of RTS/CTS 1.

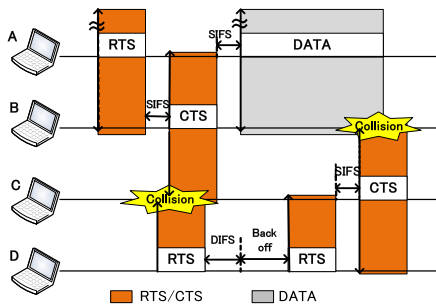


図 2 RTS/CTS の課題 2
Fig. 2 Issue of RTS/CTS 2.

Space) はビジー状態のチャネルから信号が検出されなくなり、アイドル状態に移行したと判断されるまでの時間、SIFS (Short InterFrame Space) はフレーム送信間隔における最短の待ち時間である。図 1 では、端末 A と端末 C がほぼ同時に送信を開始しており、RTS の衝突が発生する様子を示している。RTS/CTS のやりとりには所定の時間を要するため、このような現象は避けられない。RTS どちらの衝突が発生すると、CTS が応答されないため、端末 A、端末 C とともに再度 RTS の送信から始める必要があり、スループット低下の要因となる。ただし、RTS/CTS の交換を最初に行うことにより、長い DATA パケットを無駄に送信することは避けることができる。なお、端末 D は RTS 受信により NAV 状態に陥るが、続けて DATA が送られてこないで、NAV 状態を解除する。

図 2 では、端末 A が送信した RTS に対して、端末 B は CTS を返信して送信を許可している。ここで、RTS/CTS の交換の間に、さらに遠隔にある端末 D が RTS を送信すると、端末 B の CTS と端末 D の RTS が端末 C の部分で衝突する。端末 D は端末 C からの CTS 応答がないため、RTS を再送信する。一方、端末 A は端末 B からの CTS を受信しているので端末 B に対して DATA の送信を始める。端末 C は端末 D の RTS の再送に対して CTS を返信するため、端末 A の DATA と端末 C の CTS が衝突する。これにより、端末 A は DATA の再送信が必要となる。この現象は、長い DATA パケットを無駄に送信してしまう可能性があるという点で、スループット低下の原因となる。RTS/CTS による方式では、最大 2 ホップ先の端末まで制

項目 (バイト)	時間 (μS)
DIFS	28
PLCP (15)	20
RTS 本体 (20)	3.0
SIFS	10
PLCP (15)	20
CTS 本体 (14)	2.1
SIFS	10
PLCP (15)	20
DATA 本体 (74~2,312)	11.0~342.5
SIFS	10
PLCP (15)	20
ACK 本体 (14)	2.1
合計時間	156.2~487.7

図 3 802.11g における 1 パケット送信時間
Fig. 3 Time required to send 1 packet in 802.11g.

御できるが、アドホックネットワークにおけるスループット低下の要因を解決するには、3 ホップ先の端末まで送信を抑制する必要があることが分かる。

これらの課題は RTS/CTS がパケットによる交換であることが大きな原因である。次に述べるように、RTS/CTS のやりとりにかかる時間は PLCP を考慮すると非常に大きく、衝突が発生しやすい理由となっている。

2.2 PLCP に起因する課題

RTS/CTS のやりとりにかかる時間は無視できない程大きい。その要因として、RTS/CTS がパケットであるため、PLCP ヘッダの付加が必須であることがあげられる。PLCP は、無線通信でパケットを送信する際に必須となる物理ヘッダで、IEEE802.11MAC ヘッダの前に付加される。PLCP ヘッダには、受信装置が同期を確立するために必要な情報や MAC フレームの速度に係る情報が記載されている。IEEE802.11g を例にとると、MAC フレーム部分の通信最大速度は 54 Mbps であるが、PLCP 部分はすべての端末が受信できるよう 6 Mbps と定義されている。このため、MAC フレームの部分より PLCP 部分の方がはるかに長い時間を要する場合がある。PLCP は DATA だけでなく、RTS, CTS, ACK にも必ず付加される。

図 3 に 802.11g を例にとって、1 パケットを送信するために要する時間を示す。RTS の MAC フレームサイズは 20 バイトと、最小限の情報で定義されており、54 Mbps で送信されると 3 μ秒で終了する。しかし、PLCP の 15 バイト (ショートプリアンプルの場合) が 6 Mbps で送信されるため、20 μ秒がこれに付加される。すなわち、図 1 の端末 A と端末 B が 23 μ秒 (3 μ秒 + 20 μ秒) 以内の間に同時に送信を行うと、RTS の一部が衝突し再送が必要になる。このように、パケットの衝突を議論する場合には、RTS と CTS に付加される PLCP を無視することはできない。ちなみに、DATA 部分の最短パケットをたとえば TCP の ACK パケットと仮定すると、フレームサイズは 74 バイ

トであり、54Mbpsで送信すると11μ秒で終了する。しかし、このパケットを1個送信するために、図3に示す合計時間156.2μ秒が必要である。アドホックネットワークにおけるRTS/CTSの交換、およびACKによるオーバーヘッドがいかに大きいか分かる。このうちPLCPが占める時間は80μ秒(図3のハッチング部分)である。

2.3 ビジートーンの技術

隠れ端末課題を解決するための手法としてBTを用いた方式がいくつか提案されている。ここでは既存のBT技術を概観する。BTは周辺の端末に即座にビジー状態を伝達させるための制御信号である。BTは情報をいっさい含まない狭帯域の電波である。そのため、チャンネル間のガードバンド帯などの帯域を使うことができる。

図4に代表的なBTの技術であるDBTMA[5]のシーケンスを示す。DBTMAでは、異なる周波数からなる2種類のBT(以下BTt, BTr)を使用する。送信端末はRTSとともにBTtを送信する。受信端末はBTtに対してBTrで応答する。送信端末はBTrを受信すると、DATAの送信を開始する。受信端末はDATAの受信が完了するまでBTrを送信し続ける。受信端末の近隣に存在する端末Cは、BTrを検出中は送信を行うことができない。図4では、端末DのRTSに対して端末CはBTrを受信中のため何も応答しない。端末Cからの応答がないため、端末DはRTSの再送を繰り返す。このため、RTS/CTSの課題2で示したようにDATAパケットが破壊され、DATAの再送が必要となるケースを防止できていることが分かる。BTtはBTrの送信開始タイミングを制御するためだけに使われている。図4において、端末Dでなく端末CがRTSを送信した場合においても、端末BにおいてRTSどうしが衝突してしまう。したがってBTtはRTSのキャリアと同等の役割しか果たしておらず、RTSどうしの衝突防止には貢献していない。DBTMAは、アクセス方式が異なるため一般端末との共存ができないという課題がある。

VPDBT[6]は、DBTMAの有用性を引き継ぎ、かつBT

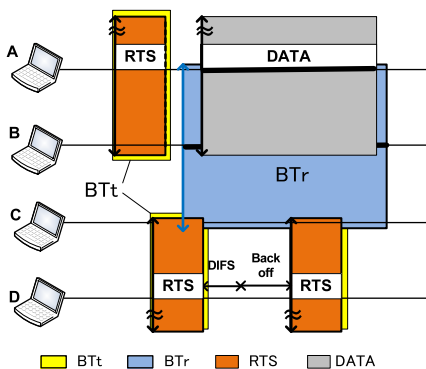


図4 DBTMAの動作
Fig. 4 Operation of DBTMA.

をノイズの干渉を抑えるためにも利用する。RTSおよびCTSと共にパケットの電波到達範囲よりノイズの影響がなくなる程度の範囲までBTを拡大して送信し、RTS/CTSの安定性を高めることができる。BTを隠れ端末問題だけでなく、ノイズの影響を考慮した点で評価できる。しかし、遠隔の端末をBTで制御するという発想には至っておらず、RTSどうしの衝突には対処できていない。

ADBT[7]は、VPDBTの効率を改善するため、CTSとACKをBTで代用する。この方式はVPDBTに比べて通信効率は向上するが、RTSどうしの衝突には対処していない。また、一般端末との共存ができないという課題がある。

EBTMA[8]は、これまでのBTの発想とは異なり、RTSどうしの衝突を防止することを目的としている。RTS送信と共に、BTを2倍の距離に到達するよう範囲を拡大して送信する。BTにより瞬時に隠れ端末の送信を抑制するため、RTSどうしの衝突解決に一定の効果があるが、データパケットを受信中にBTを送信するという考えはなく、課題2(DATAパケットの破壊)に対しては解決策を提示していない。

文献[9]では、送信範囲の異なる2種類の端末群が存在する環境において、BTを利用する方式が提案されている。2種類のBTとRTSの組合せで、大電力の端末と小電力の端末の状態を周辺に知らせ、隠れ端末をきめ細かく制御することを試みている。しかし、RTSどうしの衝突には対処していないことと、アクセス方式を大きく変更しているため、一般端末との共存ができない。

以上の研究を整理して比較したものを表1に示す。表1において、課題1は図1に示すRTSどうしの衝突、課題2は図2に示すDATAパケットの破壊に対処しているかどうかを示す。課題1に対処しているのはEBTMAのみである。他の方式は課題2には対応しているが、課題1に対応していない。DBTMA, ADBT, 文献[9]はアクセス方式を変更しているため、一般端末との共存ができない。

これら既存のBTの研究は、評価時にネットワークシミュレータを利用しておらず、またPLCPの影響を考慮していない。そのため、シミュレーション結果の妥当性に課題が残る。

表1 既存BT技術の比較

Table 1 Comparison of conventional BT technologies.

方式	課題1	課題2	互換性	文献番号
DBTMA	×	○	×	[5]
VPDBT	×	○	○	[6]
ADBT	×	○	×	[7]
EBTMA	△	×	○	[8]
文献[9]	×	○	×	[9]

2.4 CSMA/CA における待機時間

CSMA/CA における再送時のバックオフ待機時間 W はスループットに大きな影響を与える。そこで、現状の待機時間の演算方法と、その課題を示す。バックオフ待機時間の演算式は以下のとおりである。

$$W = r[0, CW] * \Delta t$$

ここで r は 0 から CW (Contention Window) の範囲の一樣な分布から生成された乱数である。

Δt はスロットタイムで、IEEE802.11g の場合は $9\mu s$ と規定されている。 CW は、最小値 CW_{min} と最大値 CW_{max} の範囲内の整数で、 $CW_{max} = (CW_{min} + 1) * 2^n - 1$ で示される。ここで n は再送回数である。衝突の増加とともに待機時間を指数関数的に増加させ、さらなる衝突の増加を防止する。しかし、複数の端末が待機状態となったとき、それぞれの端末内で仮に同じ乱数を生成すると、再送時に再度衝突することは避けられない。待機時間をいかに減らすかが伝送効率を上げるために重要な課題である。

Backoff 待機時間の演算方法を工夫する方式として以下のようなものがある。EDCF (Enhanced Distributed Coordination Function) [10] は 802.11e で定義されたアクセス方式で、送信パケットに 4 種類の優先度を持たせ、優先度の高いパケットに対しては短いバックオフ時間を発生させる。CSMA-FBS (CSMA-Fixed Backoff-time Switching Method) [11] は、EDCF と類似しているが、相手リンクごとに優先度を持たせる。いずれも優先度の高い通信には効果があるが、システム全体の効率を上げることはできない。

一方、 Δt の値は厳密に定義された固定値である。 Δt の値を操作する研究は、筆者らの知る限り存在しない。しかし、SBT を適用することにより、 Δt の値を見直すことが可能である。

3. 提案方式

2 章で述べた課題を解決すべく、我々は BT の到達距離を拡大した制御信号を SBT (Strong Busy Tone) と名づけ、SBT を利用したアクセス方式を提案してきた [12]。本章では、SBT の動作詳細を述べる。さらに、SBT を適用することにより可能となる Δt の短縮について説明する。

3.1 SBT の導入

SBT は BT の電波到達範囲を拡大しているため、遠隔の端末を瞬時に制御することができる。一般に送信電力は、信号の帯域幅に比例するが、SBT は BT と同様に狭帯域であるため、距離を拡大しても電力消費が問題にならない点が大きな特徴である。提案方式の概要、およびルールは簡単で、以下のとおりである。

- RTS とともに SBT を 3 倍の距離まで到達するように送信する。

- SBT を検出した端末は、RTS から始まる一連の送信を開始してはいけない。
- すでにパケットを送信中、または受信中に SBT を受信した場合は、それを無視し送受信動作を継続する。

本提案方式は、RTS/CTS とともに SBT を送信することから SBT-RC 方式と呼ぶ。図 5 に SBT-RC の動作を示す。端末の位置関係はこれまでと同様で、端末 A が端末 B に対して送信を行う場合を示している。端末 A が RTS 送信とともに送信する SBT は端末 D まで届く。端末 B が CTS 送信とともに送信する SBT は、同様に端末 D まで届く。端末 C、端末 D は瞬時に送信が抑制されるため、図 1 および図 2 で示したような衝突が発生することが回避される。端末 C は確実に NAV 状態に入るため、端末 D からの RTS に対して CTS を返信して DATA パケットを破壊するようなことはない。すなわち、RTS/CTS による方式の課題 1、課題 2 とも解決されている。図 5 では、端末 D が端末 A の送信中に RTS を送信しており、それに付随する SBT が端末 A まで届く様子が示されている。端末 A は DATA 送信中であるため、SBT のルールによりこれを無視し、送信を完了させることができる。SBT-RC は RTS/CTS による方式で動作する一般端末と共存でき、段階的に導入することが可能である。

既存の RTS/CTS による方式によると、図 1 の端末 D の例のように、RTS/CTS が何らかの原因で不成功に終わったとき、RTS を受信してしまった一部の端末は、一時的に NAV 状態に陥る可能性がある。SBT-RC による制御では、遠隔の端末が送信を控えることにより衝突が防止されるため、RTS/CTS シーケンスが成功する確率が大きく向上し、端末が不当に NAV 状態に陥ることを防止することができる。

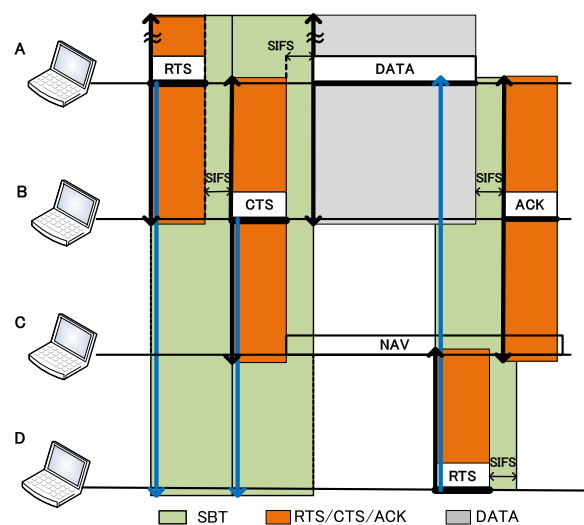


図 5 SBT-RC の動作
Fig. 5 Operation of SBT-RC.

SBT は単に送信中であるか否かを遠方に伝えるだけであるため、原理的には一定周波数の正弦波信号でもかまわない。本提案では、SBT をチャンネル間のガードバンドに配置し、未使用の OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) サブキャリアのうちの 1 本を無変調で使用することとする。データ通信ではサブキャリアを 52 本使うが、SBT では該当するサブキャリア 1 本の送信電力を、到達範囲を拡大するために増加させるが、キャリア数が少ないため低電力で済む。SBT のキャリアセンスレベルについては、SBT と無線 LAN フレームではサブキャリア数が異なり帯域幅も異なるため、IEEE802.11 規格で定められたキャリアセンスレベルとは異なる値を用いる必要がある。

3.2 スロットタイムの短縮

SBT を用いた場合、バックオフの演算に用いるスロットタイム Δt の値を短縮することができる。 Δt の値を 802.11g で規定された値より小さくすると、待機中の端末が異なる乱数を生成したにもかかわらず衝突する可能性が出る。逆にこれより大きくすると、待機時間が相対的に増加し伝送効率が落ちるため、適切な値を設定する必要がある。 Δt の内容は以下のとおりである。

$$\Delta t = \text{CCATime} + \text{AirPropagationTime} \\ + \text{RxTxTurnaroundTime} + \text{MACProcessingDelay}$$

- CCATime: チャンネルの使用状態判定時間 (4 μs)
- AirPropagationTime: 伝搬時間 (1 μs)
- RxTxTurnaroundTime: 送受信状態切り替え時間 (2 μs)
- MACProcessingDelay: MAC の処理時間 (2 μs)

これらの要素は、送信される情報がパケットであることが前提で定義されている。ここで、SBT を用いた制御を行うことを前提にすると、不要な項目を省くことが可能である。

CCATime (Clear Channel Assessment Time) は、物理層において無線媒体が使用中か否かを判定するための時間である。802.11g で CCATime として定義されている 4 μs は、PLCP プリアンブル部における同期および OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) シンボルの復調時間に 4 μs を要するところから来ている。この同期と復調には、PLCP プリアンブルの先頭部に配置された、シンボル長が 0.8 μs の OFDM ショートシンボルを複数用いて行うことを想定している。SBT は無線 LAN フレームとは独立した信号であるため、本来は独立に検出を行うことができるが、実装方法の 1 つとして SBT をサブキャリアの 1 つに割り当てた場合の検出について考える。この場合は、OFDM ショートシンボルにおけるキャリアの検出として考えることができる。ここで、SBT は無変調のキャリアであるため、復調する際に時間を要するシンボル同期

は必要とせず、SBT の検出は SBT 用のサブキャリアの有無のみを判定すればよい。このため、SBT を配置したサブキャリアのみを振幅復調することで短時間に検出することができる。このとき、確実に SBT サブキャリアを検出するために、マルチパス環境下での遅延波の影響を考慮し、GI (Guard Interval) 長である 0.8 μs は検出を遅延する必要がある。以上より、SBT の検出は 1.6 μs (シンボル長 0.8 μs + GI 長 0.8 μs) で可能である。スロットタイムの定義における時間のパラメータはすべて 1 μs 単位で設定されているため、CCATime を 2 μs と設定する。

AirPropagationTime は、送信されるデータの伝搬時間である。通信を行う上で必須であり、省略することはできない。信号の伝搬時間は端末間距離を 100 m とすると約 0.3 μs である。SBT による制御は最大で 3 ホップ先まで制御する必要があることから、3 ホップ先 (300 m) へ SBT が到達するまでの時間を伝搬時間として定義することができる。そこで SBT-RC では、AirPropagationTime を余裕をみて 1 μs とする。

RxTxTurnaroundTime は、送受信状態をハードウェア的に切り替えるために必要となる時間である。送信を行う際に状態を切り替えることは必須であるため省略することはできない。

MacProcessingDelay は、MAC ヘッダ中の宛先や duration フィールドなどを解釈し、それらに応じて受信すべき信号かどうか、どのくらいの時間 NAV を設定すべきかを Processing するためにかかる最大の時間である。SBT の場合はフレームの中身を解析する必要がなく、チャンネルの受信電力がある閾値以上ある場合にチャンネルを Busy と判断すればよい。この際には、MacProcessingDelay によらず、CCA 処理中にチャンネルが Busy と判断される。また、SBT には情報がないため、Processing にかかる時間は不要である。そのため、MacProcessingDelay は省略できる。

以上から、SBT-RC の Δt の値は、CCATime (2 μs)、AirPropagationTime (1 μs)、RxTxTurnaroundTime (2 μs) を足し合わせた 5 μs まで短縮することができる。

4. シミュレーション

SBT は衝突を減少させるために効果があるが、広範囲にわたって周辺端末の送信を抑制する。このため、スループットを低下させる要因にもなりうる。そこで、ネットワークシミュレータ ns-2 により SBT-RC の効果を検証した。また、SBT-RC を適用したうえで、 Δt の短縮がどの程度効果があるかを検証した。ns-2 は PLCP など正しく模擬しているため、結果の信頼性は高いと考えられる。また、802.11 では、DIFS = SIFS + $\Delta t \times 2$ と定義されており、 Δt により DIFS 値が変化するが、これも ns-2 は正しく模擬している。

4.1 シミュレーションパラメータ

比較対象は以下のとおりとし、すべての端末を下記の同一条件で動作させた。

- Case1: 既存の RTS/CTS による方式
- Case2: SBT-RC, Δt が $9\mu s$ のまま
- Case3: SBT-RC, Δt を $5\mu s$ に短縮

表 2 に測定環境のパラメータ, 表 3 に測定対象となる TCP と, 背景負荷となる UDP のパラメータを示す. 通常のパケットの到達範囲は 100m とし, SBT の到達範囲は RTS 送信時は 300m, CTS 送信時は 200m とした. TCP の通信タイプは FTP とし, パケットサイズは 1,000 Byte とした. UDP は VoIP (Voice over Internet Protocol) を想定し, パケットサイズは 200 Byte の CBR (Constant Bit Rate), データレートは 64 kbps とした. これは, 発生パケット数として, 50 パケット/秒に相当する.

4.2 シミュレーション環境

図 6 にシミュレーションフィールドの構成を示す. 各端末は 1 ホップ先の端末までの電波が確実に届くように 90m 間隔とし, メッシュ状に 37 台の端末を配置した. 測定用

表 2 測定環境のパラメータ

Table 2 Parameters of the measured environment.

アクセス方式	IEEE802.11g
SBT (RTS) 電波到達範囲 (m)	300
SBT (CTS) 電波到達範囲 (m)	200
フィールド (m)	300 × 300
伝搬方式	Two Ray Ground
アンテナタイプ	Omni Antenna
ルーティングプロトコル	AODV
計測時間 (s)	330
無線帯域 (Mbps)	54

表 3 TCP/UDP 通信のパラメータ

Table 3 Parameters of TCP/UDP communication.

TCP 通信	通信タイプ	FTP
	パケットサイズ (Byte)	1,000
UDP 通信	通信タイプ	CBR
	パケットサイズ (Byte)	200
	データレート (kbps)	64

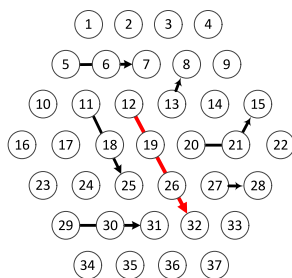


図 6 シミュレーションフィールドの構成
Fig. 6 Configuration of simulation field.

端末として, 送信元端末を端末 12, 宛先端末を端末 32 とし TCP 通信を行わせる. 背景負荷として, 端末 12 と端末 32 を除く 35 台の端末からランダムに送信元端末と宛先端末を選択し, UDP 通信を行わせる. シミュレーション開始から 20 秒後にまず TCP 通信だけを開始する. その後 5 秒ごとにランダムに選択された 2 台の端末間で UDP セッションを確立し, 背景負荷を徐々に増やしていく. このときに測定対象の TCP スループットがどのように変化するかを測定した. 背景負荷として発生させる UDP 通信は最大で 60 対の通信ペアが発生するものとした. シミュレーションは 20 回実施し, その平均を取った.

4.3 シミュレーション結果

図 7 に TCP スループットが変化する様子を示す. 横軸は背景負荷となる UDP ペア数であり, ペア数が大きいほど背景負荷が大きい状態を示す. 縦軸はターゲットとなる TCP 通信のスループットであり, 背景負荷が大きくなると, TCP のスループットが徐々に落ちて行くことが分かる. 時間とともに背景負荷のペア数が増えていくため, 横軸はシミュレーションの経過時間にも対応している. そのため, 背景負荷を増やすたびに TCP がその影響を受けてトラフィックが階段状に減少していく様子が見られる. 背景負荷となるペア端末はランダムに選択するため, 1 ホップの場合もあるし, 数ホップ経由する場合もある. そのため, シミュレーションごとに背景負荷の条件の違いによって結果が大きく変動する. しかし, 20 回の平均をとることにより図 7 に示すように概略の傾向を見ることが出来る.

図 7 によると, RTS/CTS による方式に比べ, SBT-RC は TCP のスループットが向上していることが分かる. RTS/CTS による方式では, 背景負荷がそれほど高くない段階で TCP 通信ができなくなる. SBT による方式では, 背景負荷が大きくなっても TCP 通信が可能であることが分かる. 次に, スロットタイムを小さくしたときの測定結果を見ると, 背景負荷が 0 のときにおいても RTS/CTS による方式に比べ 15% 程度のスループット改善が見られ, 背

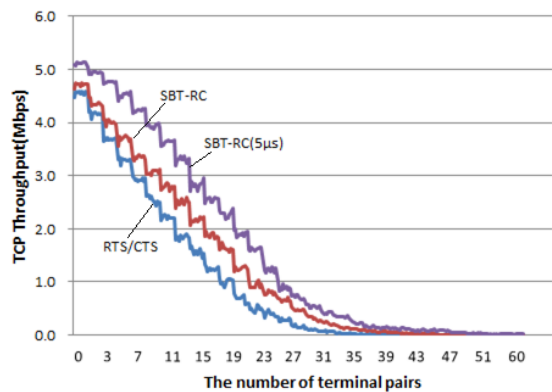


図 7 TCP スループットの推移
Fig. 7 Changes of TCP throughput.

景負荷が大きくなってもその効果が持続していることが分かる。

図 8 は背景負荷 UDP の総トラフィックの推移を示したものである。UDP 背景負荷がネットワーク上にどれだけ送信できるかを示したもので、ネットワーク全体のトラフィック限界に対応するものといえる。縦軸は UDP パケットが受信端末に到達した数を、UDP 合計トラフィックに換算したものである。背景負荷が増加していくと、UDP パケットが廃棄される比率が高くなる。縦軸が飽和した時点が、ネットワークそのものの限界であると思えることができる。図 8 によると、ネットワークの限界点は、SBT-RC の導入により、RTS/CTS による方式より約 18%改善されている。さらに、スロットタイムを小さくすることにより、RTS/CTS による方式より約 26%改善されていることが分かる。

図 9 は、1 秒間あたりの衝突回数の変化を示したものである。RTS/CTS による方式では、背景トラフィックの増加とともに、衝突回数が非常に大きくなっていることが分かるが、SBT-RC ではスロットタイムの大きさに関係なく大幅に衝突回数が減少していることが分かる。SBT-RC でも衝突が残っている理由は、複数の端末が送信待ち状態になったとき、同じ乱数を発生したときの衝突が避けられないためである。

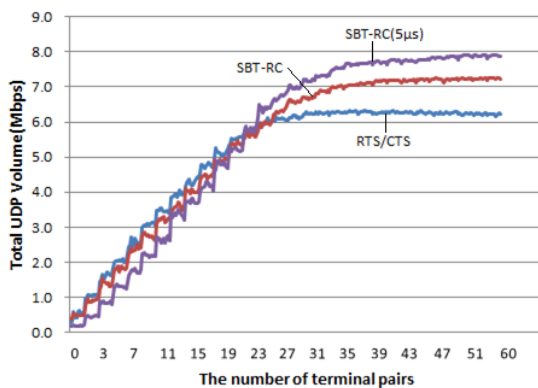


図 8 UDP 総トラフィックの推移
Fig. 8 Changes of total UDP traffic.

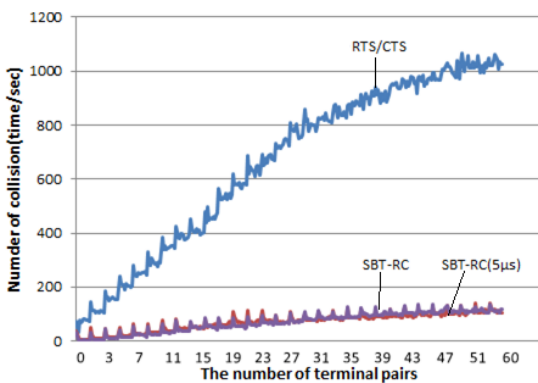


図 9 衝突回数の推移
Fig. 9 Changes of the number of collision.

以上の結果より、SBT の衝突防止によるプラス効果は、SBT の送信抑制によるマイナス効果を上回るといえる。さらに、バックオフ待機時間の短縮により、スループットを向上できることが分かった。

4.4 既存端末との共存についての考察

今回のシミュレーションでは、各ケースにおいて、すべての端末は同一の機能を持つものとし、SBT 適用端末と既存端末との共存は考慮しなかった。そこで本節では、提案方式の端末と既存端末が共存した場合の挙動について考察する。Case2 端末と既存端末とが共存した場合、既存端末は SBT を受信していても送信を開始してしまうため、既存端末が増えた分だけ衝突が増加し、全体のスループットは低下することが予想される。しかし、Case2 端末と既存端末は RTS/CTS を併用し、 Δt も同一であることから、通信機会の公平性には特に影響しないと考えられる。Case3 端末と既存端末とが共存した場合、全体のスループットが低下することは同様に想定されるが、Case3 端末は Δt の短縮により、同じ乱数を生成しても先に送信をすることになるため、既存端末に比べて送信権が与えられる機会が増加し、両者の間に不公平性が発生すると考えられる。ただし、ネットワーク全体のスループットは向上するので、既存端末のみに着目すると、今までと同様のスループットが出る可能性もある。今後は SBT 適用端末と既存端末が混在した環境でのシミュレーションを実施し、課題を明らかにする必要がある。Case3 端末との共存において、既存端末のスループットが大幅に低下するようであれば、利用用途によっては Case3 端末の適用を禁止するなどの考慮が必要になると思われる。

5. まとめ

アドホックネットワークでは、トラフィックが増加すると、隠れ端末問題の影響が大きく、スループットが大幅に低下することが知られていた。本論文では、BT の特徴に着目し、遠隔地まで瞬時に制御することができる SBT を導入して、この課題の解決を試みた。RTS および CTS に SBT を付加することにより、RTS/CTS の交換時に周辺の端末の送信を控えさせることにより、衝突を大幅に減少させることができる。また、SBT を導入することにより、バックオフ待機時間の演算要素となるスロットタイム Δt を小さくすることができることを示した。SBT は周辺端末の送信を抑制する性質もあるため、ネットワークシミュレータにより、その効果を検証した。その結果、SBT の衝突防止によるプラス効果は、SBT の送信抑制によるマイナス効果を上回ることが分かった。さらに、SBT の導入により可能になる Δt 縮小の効果が大きいことを確認した。今後は提案方式と一般端末が共存した場合のスループットを測定し、課題を明らかにする予定である。

参考文献

- [1] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, 電子情報通信学会論文誌 B, 通信, Vol.J89-B, No.6, pp.811-823 (2006).
- [2] 蓮池和夫, ソンプラカシユバンディオバダイ, 植田哲郎: アドホックネットワークの技術的課題, 電子情報通信学会論文誌 B, 通信, Vol.J85-B, No.12, pp.2007-2014 (2002).
- [3] Tsertou, A. and Laurenson, D.I.: Revisiting the Hidden Terminal Problem in a CSMA/CA Wireless Network, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.7, No.7 (2008).
- [4] IEEE 802.11TM WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS: The Working Group for WLAN Standards, available from <http://www.ieee802.org/11/>.
- [5] Haas, Z.J. and Deng, J.: Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)- A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks, *IEEE Trans. Communications*, Vol.50, No.6, pp.975-985 (2002).
- [6] Leng, S., Zhang, L. and Chen, Y.: IEEE 802.11 MAC Protocol Enhanced by Busy Tones, *IEEE International Conference on Communications*, Vol.5, pp.2969-2973 (2005).
- [7] Liu, K., Leng, S., Fu, H. and Li, L.: A Novel Dual Busy Tone Aided MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks, *8th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC '09)* (2009).
- [8] Abdullah, A.A., Cai, L. and Gebali, F.: Enhanced Busy-Tone-Assisted MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks, *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)* (2010).
- [9] 藤原敏秀, 関谷大雄, 萬代雅希, 呂 建明, 谷萩隆嗣: 送信範囲の異なる端末で構成される無線アドホックネットワークにおけるビジートーンを使用した MAC プロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.9, pp.2815-2829 (2006).
- [10] Choi, S., Prado, J., Shankar, A. and Manggold, N.S.: IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation, *IEEE International Conference on Communications (ICC '03)*, Vol.2, pp.1151-1156 (2003).
- [11] Tajima, S., Funabiki, N. and Higashino, T.: A proposal of Fixed Backoff-time Switching Method by Link Activation Rat for Wireless Mesh Networks, *International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS)*, Vol.2, pp.1151-1156 (2003).
- [12] 後藤秀暢, 伊藤将志, 渡邊 晃: アドホックネットワークのパケット衝突によるスループットの低下を防ぐ方式の検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム論文集, Vol.2009, No.1, pp.593-597 (2009).



伊藤 智洋 (正会員)

2012年名城大学理工学部情報工学科卒業。2014年同大学大学院理工学研究科情報工学専攻修了。同年株式会社NTTネオメイト入社。エンジニアリングセンタに所属。修士(工学)。



旭 健作 (正会員)

2001年名城大学理工学部電気電子工学科卒業。2003年同大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。2008年同大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程修了。同年名城大学理工学部助教, 現在に至る。博士(工学)。無線通信や音響に関する信号処理の研究に従事。2002年度情報処理学会東海支部学生論文奨励賞授賞, 2004年度電気関係学会東海支部連合大会奨励賞受賞。電子情報通信学会, 日本音響学会, IEEE各会員。



鈴木 秀和 (正会員)

2004年名城大学理工学部情報科学科卒業。2009年同大学大学院理工学研究科電気電子・情報・材料工学専攻博士後期課程修了。2008年日本学術振興会特別研究員。2010年名城大学理工学部助教。2015年より同大学理工学部准教授。ネットワークセキュリティ, モバイルネットワーク, ホームネットワーク等の研究に従事。博士(工学)。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。



渡邊 晃 (正会員)

1974年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1976年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機株式会社入社後, LANシステムの開発・設計に従事。1991年同社情報技術総合研究所に移籍し, ルータ, ネットワークセキュリティ等の研究に従事。2002年名城大学理工学部教授, 現在に至る。博士(工学)。電子情報通信学会, IEEE各会員。