

平成25年度 修士論文

邦文題目

ストロングビジートーンを用いた  
無線LANアクセス制御方式の提案と評価

英文題目

**Proposal of Wireless LAN Access Control  
Methods using Strong Busy Tone  
and its Evaluation**

情報工学専攻専攻  
(学籍番号: 123430003)

伊藤 智洋

提出日: 平成26年1月31日

名城大学大学院理工学研究科

## 内容要旨

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が採用されているがパケットの衝突を完全に防止することはできない。本論文では、ストロングビジートーン(以下SBT:Strong Busy Tone)と呼ぶ特殊な制御信号を用いてパケット衝突を大幅に削減する2つの方式を提案する。さらにスロットタイムを短縮することによりスループットを向上させる方式を提案する。1つ目の方式であるSBT-RC方式では、RTS/CTSにSBTを付加することにより衝突を防ずる。2つ目の方式であるSBT-D方式では、RTS/CTSを用いずDATAにSBTを付加して衝突を防止する。SBT-RCを用いることにより、RTS/CTSと比較し衝突数を最大で1/10以下まで削減させることが可能であり、トラフィックが増加した状態においてもスループットの値を最大で約3倍まで向上できる。2つ目の方式であるSBT-D方式では、RTS/CTSと比較し衝突数を最大で1/7以下まで削減し、トラフィックが増加した状態ではスループットの値を最大で約10倍まで向上できる。2つの方式はともに、衝突を大幅に削減することによりネットワーク全体のスループットを向上させることが可能であり、RTS/CTSと比較しSBT-RCでは最大で1.2倍、SBT-Dでは最大で2倍まで向上できる。さらに、スロットタイムの値を短縮することによりSBT-RC、SBT-Dともにスループットを約1.2倍まで向上できる。

# 目次

|     |                 |    |
|-----|-----------------|----|
| 第1章 | はじめに            | 1  |
| 第2章 | 既存技術とその課題       | 3  |
| 2.1 | RTS/CTSによる方式の課題 | 3  |
| 2.2 | PLCPに起因する課題     | 3  |
| 2.3 | ビジートーン          | 5  |
| 第3章 | 提案方式            | 7  |
| 3.1 | SBTの導入          | 7  |
| 3.2 | SBT-RC          | 7  |
| 3.3 | SBT-D           | 8  |
| 3.4 | スロットタイムの短縮      | 9  |
| 第4章 | シミュレーション        | 11 |
| 4.1 | シミュレーションパラメータ   | 11 |
| 4.2 | シミュレーション環境      | 11 |
| 4.3 | シミュレーション結果      | 12 |
| 第5章 | まとめ             | 18 |
|     | 謝辞              | 19 |
|     | 参考文献            | 20 |
|     | 研究業績            | 22 |
| 付録A | RTS/CTS方式       | 23 |
| 付録B | SBTの送信          | 24 |

# 第1章 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伴い、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LANの構築が可能である。中でも、端末同士で直接通信を行うことができるアドホックネットワーク [1] [2] は、災害などでインフラが途絶した時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 (Request to Send) / CTS (Clear 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、送受信端末近隣の端末の送信を待機させ衝突を軽減することができる。しかし、RTS/CTS はパケット交換により制御する方式であるため制御に一定の時間を要する。そのため、トラフィックの増加とともに衝突の防止が困難となるという課題がある。また、RTS/CTS 交換時に RTS 同士の衝突などが発生すると、周辺端末が待機状態のままになってしまうさらし端末問題が発生する。

隠れ端末問題を解決するための手法としてビジートーンを用いた方式が提案されていたことがある [5]~ [7]。ビジートーンは単一周波数の制御信号で、これにより周辺の端末の通信を抑制し衝突を防止する。[5] [6] は、RTS/CTS と DATA の送信時に同時にビジートーンを送信することにより隠れ端末問題を防止する方式である。また、[7] は、CTS を用いず RTS にビジートーンを同時に送信することにより衝突を防止する。単一周波数の制御信号であるビジートーンを用いることにより瞬時に近隣の端末を制御することにより衝突を防止している。また、ビジートーンは衝突防止以外にも用いられている [8]~ [11]。[8]~ [11] は、通信時に発生する干渉の影響をビジートーンを用いることにより防止する方式である。干渉の発生する範囲を予めビジートーンにより制御しておくことにより、通信への影響を防止しており、[11] では制御範囲を可変にすることにより通信効率を向上させている。しかし、ほとんどが方式提案にとどまっており、シミュレーションなどによる効果は実証されていない。その後、RTS/CTS が規定されて以降は衝突防止を目的としたビジートーンの研究は下火となっている。

本論文では、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) [12]~ [13] と呼ぶ新たな制御信号を用いて、隠れ端末問題とさらし端末問題を同時に防止する方法を提案する。SBT とは、ビジートーンの電波到達範囲を拡大した特殊な制御信号で、周辺端末を広範囲に渡って制御する。単一周波数の電波であるため電力消費が少ない。また、瞬時に周辺端末を制御することが可能である。

本論文では、SBT を用いた方式として SBT-RC, SBT-D の 2 つの方式を提案する。SBT-RC (SBT-RTS/CTS) とは、SBT を RTS/CTS の送信時に同時に送信することにより、遠隔にある端末を制御する。RTS/CTS のパケット交換時に予め SBT により周辺端末を制御されているため衝突を防止できる。SBT-RC は既存の端末と共存できる。

SBT-D (SBT-DATA) とは、RTS/CTS を用いずに DATA パケットと同時に SBT を送信する方式である。SBT-D は RTS/CTS の交換によるオーバーヘッドを無くすことができ、スルー

プットをさらに向上させることができる。ただし、SBT-Dは全ての端末がこの機能を備えている必要がある。

次に、SBTを用いることにより、バックオフの待機時間 [14] を演算する際に用いられるスロットタイム (以下  $\Delta t$ ) の値を短縮する方式を提案する。従来のバックオフ時間に関する研究として素数スロットタイム [15] と CW (Contention Window) の操作によるスループット向上の研究 [16] [17] がある。素数スロットタイムでは、スロットタイムの値を素数に設定することで乱数の演算において 2 の倍数になった場合に衝突が発生するのを防いでいる。CW に関する様々な研究は行われているが、 $\Delta t$  を短縮する方式は研究されていない。

これに対し、本研究では SBT の特性を活かし、 $\Delta t$  の値を短縮することにより、送信端末の待ち時間を減少でき、スループットをさらに向上させる。

SBT は広範囲に渡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りえる。そこで ns-2 (Network Simulator2) を用いてシミュレーション評価を行い、既存の RTS/CTS を用いた方式と SBT-RC, SBT-D の 2 つの方式、さらには  $\Delta t$  を短縮した方式をそれぞれ比較した。その結果、提案方式はいずれも衝突が大幅に防止され、その効果が送信抑制効果を上回ることがわかった。

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の説明を行う。4 章はシミュレーションの結果及び考察について、最後に 5 章でまとめを行う。

## 第2章 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 2.1, 図 2.2 に示す。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。図 2.1 では、端末 A と端末 C がほぼ同時に端末 B に対して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 同士の衝突が発生すると CTS が返信されないため、端末 A, C ともに再度 RTS の送信から始める必要がある。ただし、このやりとりにより、DATA を再度送信してしまうことは避けることができる。端末 D は RTS を受信するため NAV 状態に入りさらに端末状態となる。2.2 でも述べるように RTS/CTS のやりとりにかかる時間は無視できない程大きく、これもスループット低下の要因となっている。

図 2.2 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 のやりとり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 CTS の応答がないため、RTS を再送信する。一方、端末 A は端末 B からの CTS を受信しているため端末 B に対して DATA の送信を始める。端末 C は端末 D の RTS に 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 は再送信が必要となる。この現象は、DATA を無駄に送信してしまうと言う点で、スループット低下の原因となる。

これらの課題は RTS/CTS がパケットによる交換であるために所定の時間を必要とすることが原因である。

### 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 PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) のオーバーヘッドが挙げられる。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、図 2.3 に示すように IEEE802.11 MAC ヘッダの前に付加され、PLCP プリアンブルと PLCP ヘッダから構成されている。PLCP プリアンブル部分には受信装置が同期を確立するために必要な情報が記載されており、PLCP ヘッダ部分には 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 54Mbps であるが、PLCP 部分は全ての端末が受信できるよう 2Mbps と定義されている。このため、MAC フレームより 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 などにも付加される。表 2.1 に IEEE802.11g における一連のシーケンスの所要時間を示す。表 2.1 からわかるように RTS, CTS, ACK はいずれも MAC フレーム本体部分が  $3\mu\text{s}$  程度であるのに対し、PLCP 部分に  $26\mu\text{s}$  もの時間を要する。RTS/CTS の MAC フレーム構造は短く定義されているもののパケット全体の送信時間は大きいことがわかる。そのた

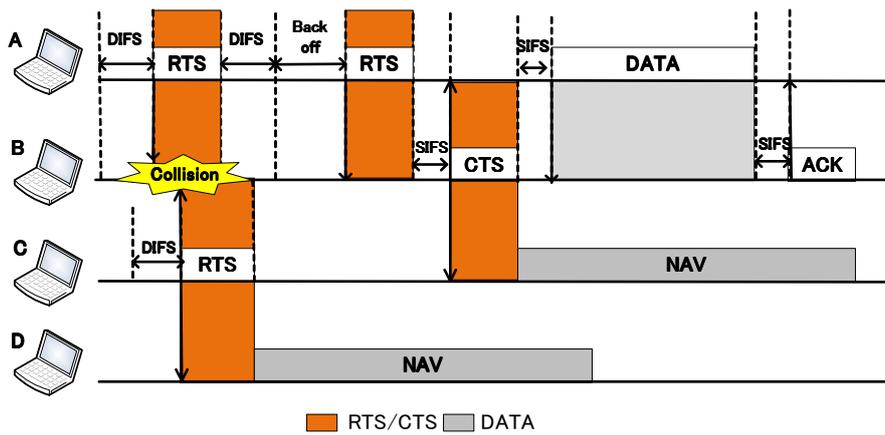


図 2.1 RTS/CTS の課題 1

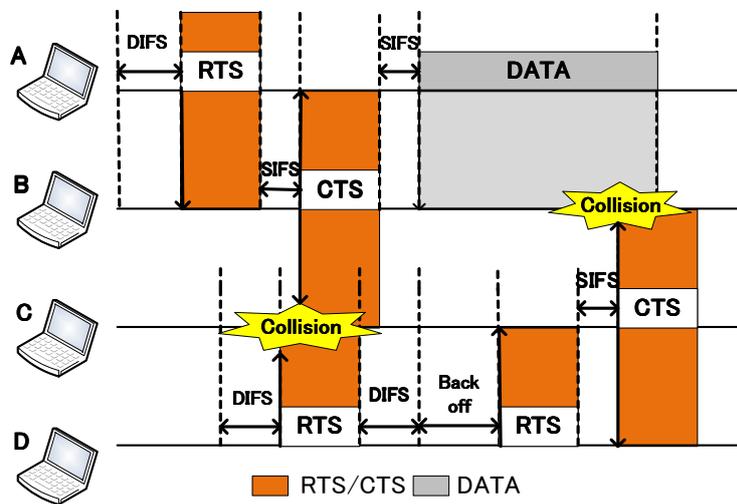


図 2.2 RTS/CTS の課題 2

|                   |       |            |               |         |
|-------------------|-------|------------|---------------|---------|
| ロングプリアンブル: 144bit | 48bit | 最大1532byte |               |         |
| ショートプリアンブル: 72bit |       | PLCPヘッダ    | IEEE802.11ヘッダ | DATA    |
| 物理ヘッダ             |       | PLCPプリアンブル | FCS           | MACフレーム |

図 2.3 PLCP のフォーマット

め RTS/CTS のやりとりがオーバーヘッドになるとともに、隠れ端末同士が同時に送信し衝突する可能性が高くなっている。

表 2.1 各シーケンスに要する時間

| IEEE802.11g | 時間 ( $\mu$ s) |          |
|-------------|---------------|----------|
|             | PLCP          | 本体       |
| DIFS        |               | 34       |
| Backoff     |               | 135~9207 |
| RTS         | 26            | 3        |
| SIFS        |               | 16       |
| CTS         | 26            | 3        |
| DATA (MAX長) | 26            | 227      |
| ACK         | 26            | 3        |

## 2.3 ビジートーン

ビジートーンを用いて周辺端末を制御することにより、スループットを改善する技術が提案されている [5]~ [7]。[5] [6] は、RTS/CTS や DATA にビジートーンを付加する方式である。RTS, CTS と同時にビジートーンを送信することにより、RTS/CTS の課題を解決している。DATA 部分にもビジートーンを付加し、RTS 部分で衝突が発生しても DATA 部分における衝突を防止している。[7] は、CTS を無くしビジートーンを RTS に付加する方式である。ビジートーンを用いることにより瞬時に近隣端末を制御し、隠れ端末問題による衝突を防止している。図 2.4 にビジートーンを用いた方式の動作を示す。端末 A から端末 B に通信を行う状態を示している。端末 A と端末 B は RTS/CTS を送信する際に、同時にビジートーンを送信する。その後、端末 A は DATA 送信時に同時にビジートーンを送信する。ビジートーンにより近隣端末は通信を抑制されており、端末 C において衝突が発生したとしても図 2.2 のように DATA 送信時の衝突を防止できる。しかし、従来のビジートーン技術は近隣端末しか制御できないため、遠隔の端末の影響による図 2.1 のような衝突や端末 C における衝突などは防止できない。また、ほとんどが方式提案にとどまっており、シミュレーションなどによる効果は実証されていない。[6] ではシミュレータは独自のものを利用したものとなっている。ビジートーンが提案された後、RTS/CTS が規定されて以降は衝突防止を目的としたビジートーンの研究は下火となっている。

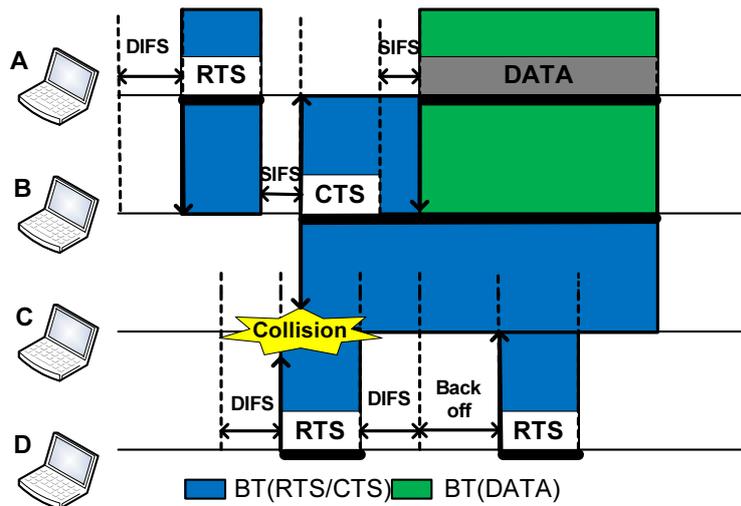


図 2.4 既存ビジートーンによる課題の解決

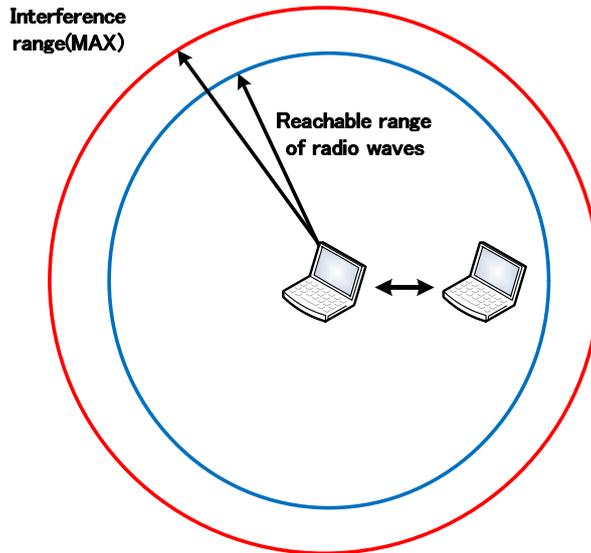


図 2.5 ビジートーンによる干渉防止技術

衝突防止以外の目的にビジートーンを用いた方式も提案されている [8]~ [11]. [8]~ [11] は、通信時に発生する干渉の範囲に合わせてビジートーンの送信範囲を調節することで干渉の影響を防止することが可能となる. 図 2.5 に示すように、無線通信は通信時に干渉が発生し、この干渉する範囲は通信距離に比例して拡大する. 端末は周辺にキャリアが確認されないため通信を開始するが、周辺端末の干渉により通信にエラーが発生する. そこで、図 2.5 に示す通信開始時に干渉する最大の範囲に対してビジートーンを送信することにより、周辺の端末を抑制する. その後、単位時間ごとにエラーが発生しなければ範囲を狭め、発生すれば範囲を拡大することにより、干渉による影響を防止することができる.

## 第3章 提案方式

### 3.1 SBT の導入

本研究は、ビジートーンの新しいアプローチとして、SBT を用いたアクセス制御方式を提案する。SBT はビジートーンの電波到達範囲を拡大することにより、遠隔の端末を瞬時に制御できる。そのため、RTS/CTS において課題を解決することができ、さらし端末問題も同時に解決することができる。SBT を受け取った端末は通信を開始することができない。しかし、既に通信中である場合は SBT を無視し通信を継続するため、不要に通信を停止させることはない。

本論文では、SBT を用いた方式として、SBT-RC と SBT-D の2つの方式を提案する。

### 3.2 SBT-RC

SBT-RC は、RTS/CTS を送信する際に SBT を同時に送信することにより、RTS/CTS 交換時は SBT により周辺端末が制御されるため衝突を防止できる。

RTS/CTS を用いた場合、図 2.2 に示すように1つの通信に対して衝突に影響がある最大範囲は3ホップ先までとなる。そこで、SBT-RC では RTS 送信時に SBT を通常の3倍まで電波到達範囲を拡大し、CTS 送信時には SBT を通常の2倍まで電波到達範囲を拡大することにより、衝突に影響を及ぼす端末を全て制御する。RTS/CTS を用いたまま SBT を追加する方式であり、既存の端末が含まれる状況においても運用することが可能である。

図 3.1 に SBT-RC を導入した場合の動作を示す。端末 A は RTS 送信と同時に、端末 D まで到達するよう SBT の電波到達範囲を3倍に拡大し送信する。次に端末 B は CTS 送信と同時に、端末 D に到達するよう SBT の電波到達範囲を2倍に拡大し送信する。端末 D は SBT を受信している間、RTS を送信できない。この方法により図 2.1, 図 2.2 に示すようなパケットの衝突を防ぐことができる。図 3.1 では、SBT による送信抑制が終了した直後に、端末 D が RTS 送信を行った例を示している。端末 C は既に NAV 状態に入っているため CTS を返信せず、端末 A の送信は正常に終了することができる。このとき端末 D の送信する SBT が端末 A にも到達するが、端末 A は送信中であるため SBT を無視し、データ送信に影響を与えることはない。SBT により周辺端末が事前に制御されているため、パケット衝突を大幅に削減できる。

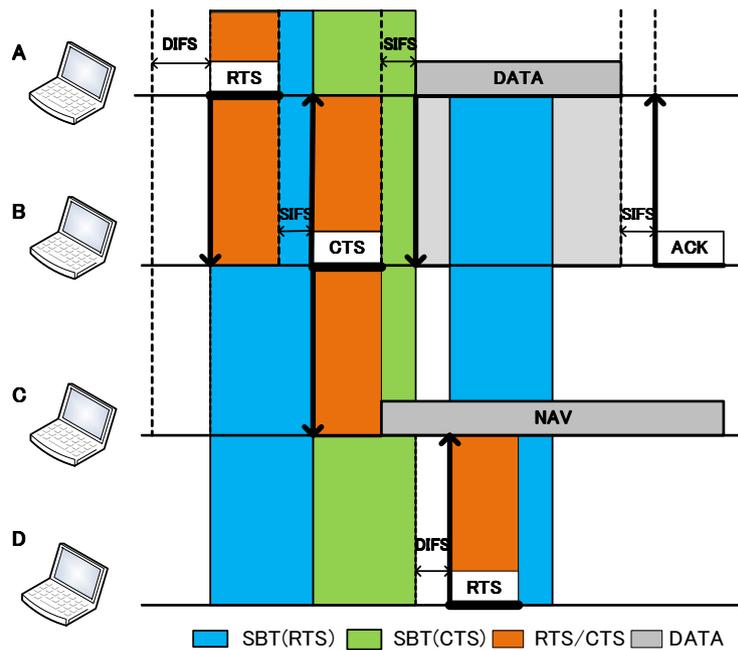


図 3.1 SBT-RC の動作

### 3.3 SBT-D

SBT-Dは、RTS/CTSを無くしDATAパケットと同時にSBTを送信することにより、RTS/CTSのオーバーヘッドを無くし通信時間を短縮する方式である。SBT-Dにおいては、RTS/CTSを用いないためSBT-RCとは1つの通信が衝突した際に影響を及ぼす最大範囲が異なる。具体的にはDATAを送信する場合において、衝突が発生する最大範囲は2ホップ先までとなる。そこでDATAと同時に送信するSBTは通常の電波到達範囲の2倍に拡大したものを送信する。RTS/CTSを排除しているため、既存の端末が含まれる場合通信を行うことができず、運用するためには全ての端末がSBT-Dの機能を持つ必要があり、実用には標準化する必要がある。

図3.2にSBT-Dの動作を示す。端末AはDATA送信と同時に、端末Cまで到達するようSBTの電波到達範囲を2倍に拡大し送信する。次に端末BはDATAを受信したと同時に、隣接端末に向けSBTを送信する。端末CはSBTを受信している間、送信できない。この間に端末Dが送信を開始したとしても、端末CはSBTにより制御されているためDATAの受信は行わない。SBTを用いることにより、RTS/CTSによる通信予約を行わなくとも瞬時に通信に影響のある端末を制御することが可能である。

受信側が受信と同時にSBTを送信する理由は以下のとおりである。送信側のみがSBTを送信すると、送受信間に障害物が存在した場合、障害物により隠れ端末を制御できないことがある。例えば、図3.3に示すように端末Aと端末Cの間に障害物が存在すると、端末AがSBTを送信しても端末Cに到達しない。そのため、端末Cが送信すると端末Bにおいて衝突が発生してしまう。そこで、受信側の端末Bが端末AからDATAを受け取ると同時にSBTを送信することにより、端末Cが送信できなくなるよう制御する。ただし、この受信側が送信するSBTの到達範囲は1ホップ分で十分である。このような対策を取ることで、障害物が存在しても隠れ端末問題を防止することが可能となる。

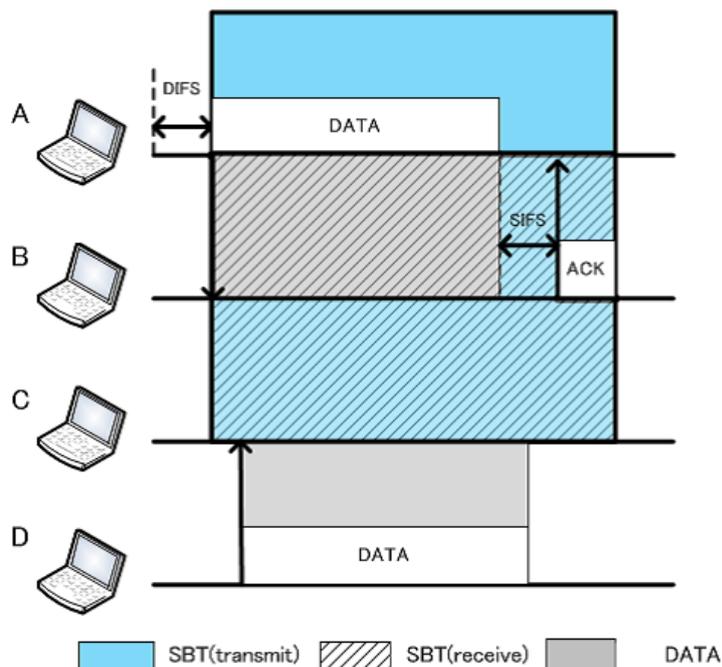


図 3.2 SBT-D の動作

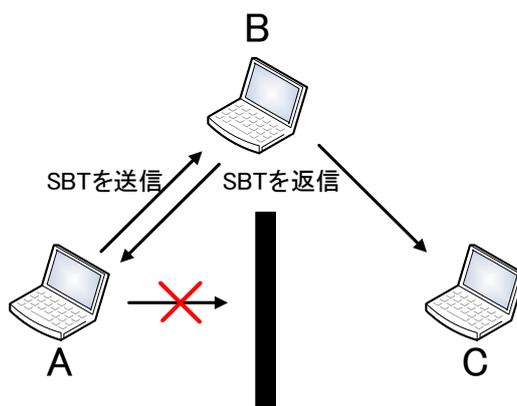


図 3.3 障害物の対策

### 3.4 スロットタイムの短縮

SBT を用いた場合、バックオフなど待機時間の算出に用いられるスロットタイム（以下  $\Delta t$ ）の値を短縮することが可能となる。

まず、バックオフ時間は  $CW$  (Contention Window) の範囲内で発生した乱数の値と  $\Delta t$  をかけたものが適用され、以下の式で算出される。

$$Backoff = random \times \Delta t$$

IEEE802.11g では、 $CW$  は最少が 15、最大が 1023、 $\Delta t$  は  $9\mu s$  と規定されている。乱数値は、 $[0, CW]$  の範囲の一様な分布から生成されたランダムな整数値である。 $CW$  は、最小値が  $CW_{min}$  と最大値が  $CW_{max}$  の値の範囲内の整数で、 $CW_{min} \leq CW \leq CW_{max}$  となり、 $CW = (CW_{min} + 1)$

$\times 2^{n-1}$  ( $n$  は再送回数  $\geq 0$ ) の指数関数で  $CW$  の範囲は増加し、設定した  $CW_{max}$  に達したときはあらかじめパラメータで決められた最大再送回数  $M$  回となるまで  $CW$  の範囲を広げず  $CW_{max}$  のままとして、 $M$  回再送に失敗したフレームを破棄する。しかし、乱数の演算において 2 台のノードが同一乱数を生成した場合再度衝突を繰り返してしまう。

次に、 $\Delta t$  の値  $9\mu s$  は以下のように設定されている。

$$\Delta t = CCATime + AirPropagationTime \\ + RxTxTurnaroundTime + MACProcessingDelay$$

- CCATime : 端末の状態判定時間 ( $4\mu s$ )
- AirPropagationTime : 伝搬時間 ( $1\mu s$ )
- RxTxTurnaroundTime : 送受信状態切り替え時間 ( $2\mu s$ )
- MACProcessingDelay : MAC の処理時間 ( $2\mu s$ )

これらの値は、送信される情報がパケットであることが前提で決定されている。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は、端末が送信状態か受信状態かを判定する時間である。SBTを用いることにより送信を行う端末以外は送信が抑えられることから、送信端末以外は受信状態と判断できるためこの値は省略することができる。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。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。そのため、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の処理時間である。SBTを用いた場合、SBTは情報を一切含まない電波であることから、MAC処理時間は非常に少ないものであり、省略することができる。以上のことから、SBTを用いた制御方式においてはSBTの伝搬時間(AirPropagationTime)と端末の送受信状態を切り替えるための時間(RxTxTurnaroundTime)のみ考慮すればよい。

伝搬時間は端末間距離を 100m とすると約  $0.3\mu s$  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(300m)へSBTが到達するまでの時間を $\Delta t$ として定義することができる。提案方式では、AirPropagationTimeの値を余裕をみて $1\mu s$ とする。従って、提案方式 $\Delta t$ の値をAirPropagationTimeとRxTxTurnaroundTimeを合わせた $3\mu s$ まで短縮することができる。

## 第4章 シミュレーション

SBTを適用すると、衝突を減少させることはできるが広範囲に渡って周辺端末の送信を抑制するため、スループットを低下させる要因にもなりうる。そこで、ns-2によりSBT-RC、SBT-Dの各方式及び $\Delta t$ の短縮による効果を検証した。

### 4.1 シミュレーションパラメータ

本論文では提案方式ごとに以下の5つのCaseを定め比較を行った。

- Case1 : RTS/CTS
- Case2 : SBT-RC
- Case3 : SBT-D
- Case4 : SBT-RC with shortening slot time
- Case5 : SBT-D with shortening slot time

表4.1に計測環境のパラメータ、表4.2にTCP通信とUDP通信のパラメータを示す。パケット到達範囲は100mとし、SBT-RCの到達範囲はRTS送信時は300m、CTS送信時は200mとした。またSBT-Dの到達範囲は200mとした。TCPの通信タイプはFTP通信とし、パケットサイズは1000Byteとした。UDPはVoIP (Voice over Internet Protocol)を想定し、パケットサイズは200ByteのCBR (Constant Bit Rate)、パケット発生率は64Kbpsとした。

### 4.2 シミュレーション環境

図4.1にシミュレーション環境を示す。各端末は1ホップ先の端末までの電波が届くように90m間隔でメッシュ状に37台の端末を配置した。測定用端末として、送信端末を端末12、宛先端末を端末32として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TCP通信を開始する。この時はTCPセッションが1本確立されているだけである。その後5秒毎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。

表 4.1 全体のパラメータ

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| 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            |
| SBT (DATA) 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 4.2 端末のパラメータ

|        |                |      |
|--------|----------------|------|
| TCP 通信 | 通信タイプ          | FTP  |
|        | パケットサイズ (Byte) | 1000 |
| UDP 通信 | 通信タイプ          | CBR  |
|        | パケットサイズ (Byte) | 200  |
|        | パケット発生率 (Kbps) | 64   |

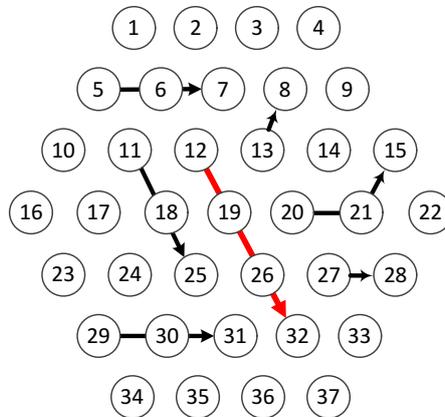


図 4.1 シミュレーション環境

### 4.3 シミュレーション結果

シミュレーションは以下の比較を行う。RTS/CTS と SBT-RC の比較, RTS/CTS と SBT-D の比較, RTS/CTS と  $\Delta t$  を短縮した SBT-RC, SBT-D の比較を行う。

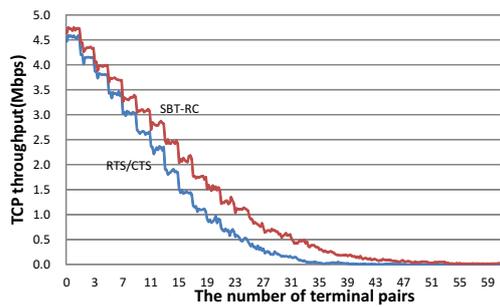


図 4.2 SBT-RC の TCP スループット推移

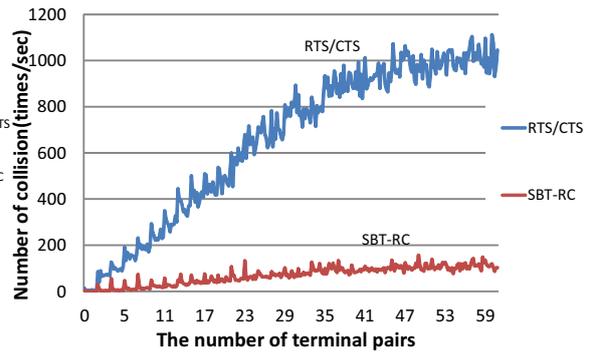


図 4.3 SBT-RC の衝突防止効果

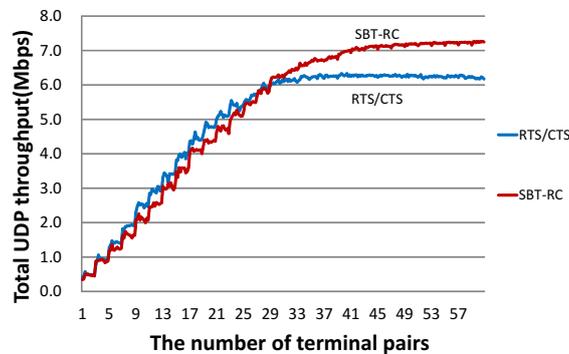


図 4.4 SBT-RC の UDP 総スループット

### 4.3.1 SBT-RC の評価結果

SBT-RC を用いた場合におけるシミュレーションの結果を図 4.2, 図 4.3, 図 4.4 に示す。各図の横軸は全て背景負荷端末のペア数となっている。図 4.2 の縦軸は測定端末の TCP スループットを示す。図 4.3 の縦軸は 1 秒間に発生する衝突回数を示す。図 4.4 の縦軸は背景負荷端末の総スループットを示す。

図 4.2 から確認できるように、従来の RTS/CTS および提案方式の SBT-RC とともに背景負荷端末の増加に伴いスループットが低下していることがわかる。しかし、SBT-RC を用いた場合スループットの低下を抑えられており、高負荷状態において最大で 3 倍以上にスループットを向上していることがわかる。次に図 4.3 を確認すると、SBT-RC を用いることにより大幅に衝突が防止されていることがわかる。この結果から、SBT-RC を用いることにより大幅に衝突を防止することが可能となり、負荷が大きい状態においても高いスループットの値を維持することが可能になることがわかる。

図 4.4 を確認すると、SBT-RC を用いることにより背景負荷端末のスループットも向上していることがわかる。RTS/CTS の場合、背景負荷端末のペア数が 37 になった時点においてスループットの上昇が止まっている。これに対し、SBT-RC を用いた場合はその後もスループットの上昇し続けている。この点から、SBT-RC を用いることによりネットワーク全体の上限が向上していることがわかる。

以上の結果から、SBT-RC を用いることにより大幅にパケット衝突が防止され、ネットワー

ク全体のスループットを向上させることが可能であることがわかる。

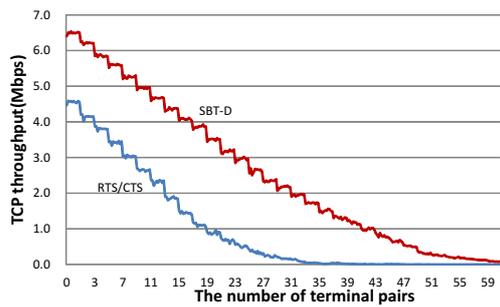


図 4.5 SBT-D の TCP スループット推移

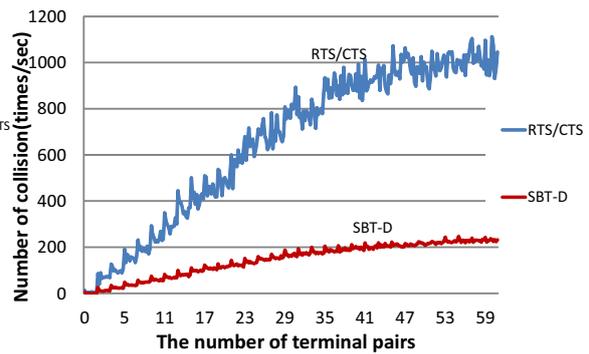


図 4.6 SBT-D の衝突防止効果

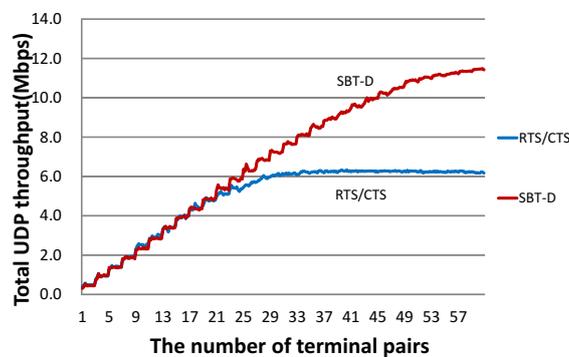


図 4.7 SBT-D の UDP 総スループット

### 4.3.2 SBT-D の評価結果

SBT-D を用いた場合におけるシミュレーションの結果を図 4.5, 図 4.6, 図 4.7 に示す. 各図の横軸は全て背景負荷端末のペア数となっている. 図 4.5 の縦軸は測定端末の TCP スループットを示す. 図 4.6 の縦軸は 1 秒間に発生する衝突回数を示す. 図 4.7 の縦軸は背景負荷端末の総スループットを示す.

図 4.5 から確認できるように, SBT-D を用いた場合 RTS/CTS と比較し大幅にスループットが向上していることがわかる. これは, RTS/CTS のオーバーヘッドが無くなったことにより, 送信時間が大幅に短縮され通信数が飛躍的に増えたためである.

図 4.6 を確認すると, SBT-D を用いた場合においても大幅に衝突数が削減されていることがわかる. この結果から, SBT のみの制御においても高い衝突防止効果が得られることがわかる.

図 4.7 を確認すると, SBT を用いることによりスループットの上限が向上していることがわかる. この結果から, SBT-D はネットワーク全体のスループット向上にも効果を発揮することがわかる. 特に, スループットの最大値を比較すると 1.7 倍以上まで向上していることより, SBT-D によるスループット向上の効果は大きいことがわかる. [18]~ [21] など他の隠れ端末防止を目的とした技術では状況により 2 倍近い数値まで向上するのに対し, SBT-D においては背景負荷の増加した状態においては RTS/CTS よりも非常に高い値を示しており最大で 10 倍以上の値を示すなど大幅な向上を見込める. 以上の結果から, DATA 送信時

に SBT を同時に送信することにより周辺端末の制御が可能であり，SBT-D を導入することにより送信時間を短縮し大幅にスループットを向上させることが可能であることがわかる。

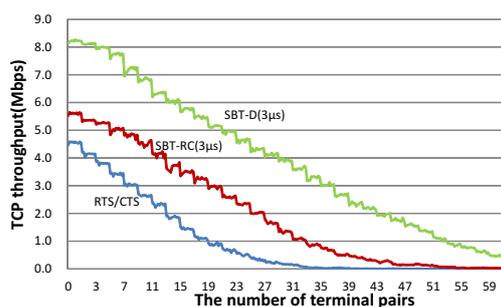


図 4.8 TCP スループット推移の比較 ( $\Delta t = 3\mu s$ )

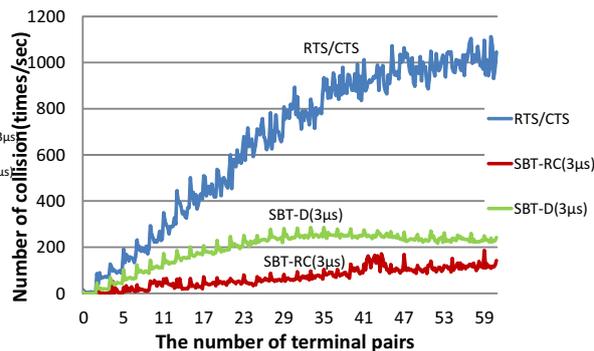


図 4.9 衝突防止効果の比較 ( $\Delta t = 3\mu s$ )

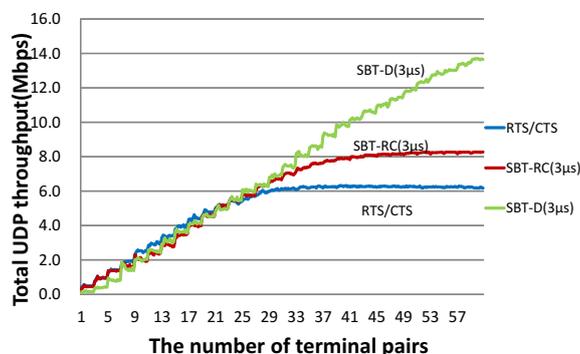


図 4.10 UDP 総スループットの比較 ( $\Delta t = 3\mu s$ )

### 4.3.3 $\Delta t$ 短縮の評価結果

$\Delta t$  短縮を用いた場合におけるシミュレーションの結果を図 4.8, 図 4.9, 図 4.10 に示す。各図の横軸は全て背景負荷端末のペア数となっている。図 4.8 の縦軸は測定端末の TCP スループットを示す。図 4.9 の縦軸は 1 秒間に発生する衝突回数を示す。図 4.10 の縦軸は背景負荷端末の総スループットを示す。

図 4.8 を確認すると、SBT-RC, SBT-D ともに  $\Delta t$  の値を短縮することによりスループットが更に向上していることがわかる。この結果は、 $\Delta t$  の値を短縮することにより待機時間が短縮され、単位時間ごとに発生する通信量が増加するためである。次に図 4.9 を確認すると、 $\Delta t$  の値を短縮した状態においても SBT を用いることにより大幅に衝突を削減することが可能であることがわかる。次に図 4.9 を確認すると、SBT-RC, SBT-D ともに通信の限界が向上していることが確認できる。特に SBT-D においては既存の 2 倍以上までスループットが向上しており非常に効果が高いことがわかる。以上の結果から、SBT を用いることにより衝突が大幅に削減されている状態においては、通信に要する時間を短縮することによりスループットを向上することが可能であることがわかる。

## 第5章 まとめ

無線 LAN 技術の課題となる隠れ端末問題を防止するために、SBT を用いた方式とし 2 つの方式を提案した。1 つ目は、RTS/CTS に SBT を付加することにより、RTS/CTS の課題を解決し、大幅に衝突を防止する SBT-RC 方式。2 つ目はデータパケットに SBT を付加し、RTS/CTS を削除することにより大幅にスループットを向上させる SBT-D 方式である。さらに、SBT の特徴を活かし  $\Delta t$  の値を短縮することにより更なるスループットを向上させる方式を提案した。

シミュレーションを行うことにより、SBT による衝突防止効果は非常に大きく、トラフィックが増加した状態において最大で RTS/CTS 方式の約 1/10 以下まで衝突数を減少させることが可能であることを確認した。また、SBT-D の効果を確認することにより、衝突が防止された状態においては通信に要する時間を短縮することにより更なるスループットの向上が可能であることがわかり、SBT-D に対応した機能を端末に持たせることが可能であれば大幅に通信性能を向上させることが可能であることを確認した。

さらに、SBT の特徴を活かし  $\Delta t$  の値を短縮することにより更なるスループットの値を向上できることを確認した。SBT-RC、SBT-D 双方においてスループットの向上が確認されており、SBT を用いた状態において通信待ち時間の短縮の効果は非常に大きいことを確認した。

以上の結果から、SBT を用いることにより衝突を大幅に削減することが可能であり、さらに通信の待ちの時間も短縮可能であることから従来の RTS/CTS に比べて大幅にスループットを向上させることが可能であることを示した。

## 謝辞

本研究に関して、多大なる御指導と御教授を受け賜りました、指導教官の名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻 渡邊晃教授に心より厚く御礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり、有益なご助言や至らないところを指摘して頂きました。副査の名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻 中野倫明教授に深く感謝致します。

本論文を作成するにあたり、有益なご助言や至らないところを指摘して頂きました。副査の名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻 旭健作助教に深く感謝致します。

本論文を作成するにあたり、有益なご助言や至らないところを指摘して頂きました。副査の名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻 鈴木秀和助教に深く感謝致します。

本論文を作成するにあたり、本研究を行うにあたり、数々の有益な御助言な御討論を賜りました、渡邊研究室の諸氏に感謝致します。

本研究は平成 24 年度名城大学大学院生研究助成を受けたものである。ここに記して感謝致します。

## 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, J89-B(6), 811-823, 2006-06-01
- [2] 蓮池和夫, ソンプラカシュ バンディオパダイ, 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, J85-B(12), 2007-2014, 2002-12-01
- [3] Athanasia Tsertou, David I. Laurenson: Revisiting the Hidden Terminal Problem in a CSMA/CA Wireless Network, IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 7, NO. 7, JULY 2008
- [4] IEEE Std 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).
- [5] 萬代雅希, 笹瀬巖: 無線アドホックネットワークにおけるビジートーン信号を用いたメディアアクセス制御プロトコルの特性解析, 電子情報通信学会技術研究報告, CS, 通信方式 101(54), 7-12, 2001-05-11
- [6] 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 47(9), 2815-2829, 2006-09-15
- [7] Abdullah, A.A.: Enhanced Busy-Tone-Assisted MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks, Vehicular Technology Conference Fall(VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd
- [8] Zygmunt J. Haas, Jing Deng.: Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA), A New Medium Access Control for Packet Radio Networks, IEEE ICUPC' 98, Vol.2, pp.973-977 (1998)
- [9] Zygmunt J. Haas, Jing Deng.: 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)
- [10] Supeng leng, Liren Zhang, Yifan Chen: IEEE 802.11 MAC Protocol Enhanced by Busy Tones, Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on
- [11] Ke Liu, Supeng Leng, Huirong Fu, Longjiang Li: A Novel Dual Busy Tone Aided MAC Protocol for Multi-hop Wireless Networks, Dependable, Autonomic and Secure Computing, 2009. DASC '09. Eighth IEEE International Conference on
- [12] 後藤秀暢, 渡邊晃: アドホックネットワークのスループットを向上させるストロングビジートーンの提案, IPSJ SIG Technical Report, 情報処理学会研究報告, 2011-MBL-57, Vol.2011, No.26, pp.1-8, Mar.2011.
- [13] 森一養, 渡邊晃, 後藤秀暢: 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におけるメディアアクセス方式の提案, 全国大会講演論文集, 2011(1), 151-153, 2011-03-02
- [14] 守倉正博, 久保田周二: 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス, December.2004.
- [15] 井之丸雄太, 田邊造, 川端信吾, 松江英明: 素数スロット時間とキュー制御を用いた最大遅延保証, 信学技報, IEICE Technical Report, RCS2006-241, March.2007.

- [16] 加藤秀明, 船曳信生, 中西透: 無線メッシュネットワークでのコンテンツウィンドウサイズ操作時のスループット測定結果, 信学技報, IEICE Technical Report, RCS2007-115, December.2007.
- [17] 笠原浩平, 梅林健太, 神谷幸宏, 鈴木康夫: チャンネル占有率情報に着目した最少 CW サイズ制御による周波数共用技術, 信学技報, IEICE Technical Report, SR2008-72, January.2009.
- [18] 速水直, 小南大智, 菅野正嗣, 村田正幸, 島内孝明: 受信端末型無線マルチホップネットワークにおける制御パケットの衝突回避による性能向上, 信学技報, IEICE Technical Report, IN2010-191, March.2011.
- [19] 眞田耕輔, 関屋大雄, 小室信喜, 阪田史郎: 無線アドホックネットワークにおけるフレーム破棄を考慮した解析, 信学技報, IEICE Technical Report, NLP2011-31, June.2011.
- [20] 新津佳幸, 小川知将, 平栗健史: 無線 LAN における隠れ端末環境の公平制御に関する検討, 信学技報, IEICE Technical Report, CS2011-24, July.2011.
- [21] 山本健人, 稲井寛: 無線 LAN におけるランダム長信号を用いた隠れ端末問題解決法の改良, 信学技報, IEICE Technical Report, RCS2011-102 November.2011.

# 研究業績

## 学術論文

なし

## 国際会議

1. Tomohiro Ito, Kensaku Asahi, Hidekazu Suzuki, Akira Watanabe, “Researches and Evaluation of Strong Busy Tone that Improves the Performance of Ad-hoc Networks”, The Seventh International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, Jan.2014.

## 研究会・大会等

1. 伊藤智洋, 旭健作, 渡邊晃, “アドホックネットワークのスループットを向上するストロングビジートンの提案と評価”, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, Sep.2011.
2. 伊藤智洋, 旭健作, 渡邊晃, “アドホックネットワークにおけるストロングビジートンの導入とバックオフアルゴリズム修正の提案”, 情報処理学会第 74 回全国大会講演論文集, Mar.2012.
3. 伊藤智洋, 旭健作, 渡邊晃, “アドホックネットワークにおけるストロングビジートンの導入とバックオフアルゴリズム修正の検討と評価”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム論文集, Vol.2012, No.1, pp.1973-1980, Jul.2012.
4. 伊藤智洋, 鈴木秀和, 旭健作, 渡邊晃, “アドホックネットワークにおけるストロングビジートンの導入とその拡張方式の検討と評価”, IEICE AN 研究会 2012, Vol.112, No.241, pp.101-106, Oct.2012.
5. 伊藤智洋, 鈴木秀和, 旭健作, 渡邊晃, “アドホックネットワークにおけるストロングビジートンを用いたアクセス制御方式の検討と評価”, 情報学ワークショップ 2012 (WiNF2012) 論文集, WiNF2012, Vol.2012, pp.197-200, Dec.2012.
6. 伊藤智洋, 旭健作, 鈴木秀和, 渡邊晃, “アドホックネットワークの性能を向上させるストロングビジートン導入の検討と評価”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, Vol.2013, No.1, pp.1754-1760, Jul.2013.
7. 伊藤智洋, 鈴木秀和, 旭健作, 渡邊晃, “ストロングビジートンを用いたアクセス制御方式の検討と評価”, 情報処理学会研究報告, 2013-MBL-68, pp.1-6, Nov.2013.

## 付録A RTS/CTS方式

RTS/CTS方式の動作を図に示す。図においてノードAの電波は隣接ノードであるノードBに対しては届くが、ノードCには届かないものとする。一方、ノードCは隣接ノードであるノードBに対しては届くがノードAには届かないものとする。この時、ノードAとノードCは隠れ端末の関係にある。

ノードAはデータ送信前にDIFS(Distributed Coordination Function Interframe Space)時間だけキャリアがないことを検出すると送信を予約するためにRTSをノードBに送信する。ノードBはSIFS(Short Interframe Space)時間後にノードAに予約の許可としてCTSを送信する。CTSを受信したノードAはSIFS時間後にデータを送信する。ノードBはデータ受信完了後、SIFS時間後にACKを返信して通信を完了する。

ここで、ノードBが送信したCTSは送信ノードから遠隔にあるノードCを受信することができる。RTSにはデータの送信にかかる予定期間が記載されており、これがCTSに転記されてノードCに届く。周辺端末はRTS/CTSを監視しており、これらを検出すると一連のシーケンスが終了するまでの所定の期間だけ送信を禁止する。この期間のことをNAV(Network Allocation Vector)と呼ぶ。このようにノードCに仮想的なキャリア検出状態を作ることにより送信の衝突を回避することができる。

ただし、衝突が発生し再送状態に入った場合、キャリアの検出を行う待機時間がDIFSとバックオフ時間待つことになる。

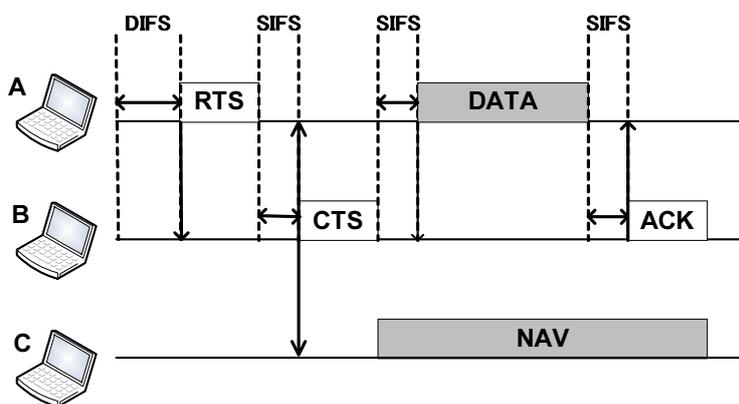


図 A.1 RTS/CTS の動作

## 付録B SBTの送信

SBTの送信には、他の通信と衝突しないように使用する周波数帯域はガードバンドを利用している。

ガードバンドとは、通常通信を行う際に隣接する周波数帯域を使用すると通信時に発生するノイズの影響で双方の通信に劣化や破損が生じる。そのため、通信を行う際に2つの通信チャンネルの間に使用しない周波数帯を置いて影響を受けないようにしている。

そこで、SBTは上記のガードバンドを利用することで他の通信と衝突しないように周波数帯域を変えて送信されている。