

平成23年度 卒業論文

邦文題目

アドホックネットワークにおける
ストロングビジートーンの導入と
バックオフアルゴリズム修正の提案

英文題目

**Introdaction of Strong Busy Tone and
proposal fixed back-off algoritm in Ad-hoc
Network**

情報工学科 渡邊研究室
(学籍番号: 080430011)

伊藤 智洋

提出日: 平成24年2月9日

名城大学理工学部

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方式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。本稿では、ストロングビジートーン (Strong Busy Tone) と呼ぶ特殊な制御信号を用い、さらにCSMA/CAのバックオフアルゴリズムを修正することにより衝突回数を減少させる方法について提案する。

Abstract

IEEE802.11 adopts a RTS/CTS method to solve "Hidden Terminal Problem" of the ad hoc network. However, RTS/CTS in itself is easy to occur. By this report, I suggest a method to solve the problem of the RTS/CTS method by introduction of Strong Busy Tone and how to reduce the number of collisions by modifying the backoff algorithm of CSMA/CA

目次

第1章	はじめに	2
第2章	既存技術	3
2.1	RTS/CTS方式の課題	3
第3章	提案方式	5
3.1	SBTの導入	5
3.2	バックオフアルゴリズムの修正	7
第4章	シミュレーション	8
4.1	シミュレーション環境	8
4.2	性能比較	9
第5章	まとめ	11
	謝辞	13
	参考文献	14
付録A	RTS/CTS方式	15
付録B	SBTの送信	16

第1章 はじめに

ユビキタス社会に向け無線 LAN 技術が急速に普及が進んでいる。無線 LAN の利点は配線工事が不要、ノードの移動や設置が容易、また端末設置の自由度が高く容易に LAN の構築が可能である。

無線 LAN のネットワーク形態にはインフラストラクチャモードとアドホックモードがある。インフラストラクチャモードは有線で接続されたアクセスポイントを介して通信を行う形態で外部ネットワークとの接続が可能となっている。一方で、アドホックモードは無線 LAN ノード同士が直接通信を行う形態で、直接電波が届かない端末との通信は他の端末を経由することで、容易にマルチホップ通信を実現することが可能である。また、一時的なネットワークを構築したり、災害時にインフラが破壊された場所で、通信環境を迅速に回復することが出来る。しかし、無線通信には不可避の問題として隠れ端末問題が存在する。

隠れ端末問題とは、2つの互いに電波の到達範囲外にいる送信ノードが、同じ受信ノードに情報を送信すると、データの衝突が発生する問題である。IEEE802.11 では、隠れ端末問題の対策として RTS(Request to Send)/CTS(Clear to Send)方式が標準規格として採用されているが、RTS/CTS方式では課題が完全には解決されていない。RTS/CTS方式では、近隣の端末に対し RTS や CTS を受信させることで仮想的なキャリア検出状態になり、一定期間通信を控えさせることにより衝突を防止する。しかし、RTS/CTS方式ではトラフィック負荷が増加するにつれ RTS、CTS とデータの衝突が発生することは避けられない。その理由として、RTS/CTS が一種のパケットであり、一連のシーケンスの実行に所定の時間が必要となるためそれ自体で衝突が発生しやすく、無駄な送信、通信待機時間の増加が発生しスループットが大幅に低下する。従って、RTS/CTS方式のみでは隠れ端末問題を完全に解決することは不可能である。

上記の課題を解決するために、単一周波数の電波であるビジートーンを用いた技術が提案されているが完全に上記の課題を解決できてはいない。

そこで、本稿ではストロングビジートーン (SBT:Strong Busy Tone) [1] [2] と呼ぶ特殊な制御信号を用い、周辺端末を制御することで隠れ端末同士の同時送信を防止し、スループットの低下を防止する。さらに CSMA/CA のバックオフアルゴリズムを修正することにより衝突回数を減少させる方法について提案する。

以下、2章では RTS/CTS の課題について、3章では提案方式についてそれぞれ説明を行う。4章ではバックオフアルゴリズムの修正についての検討結果を述べる。最後に5章でまとめを行う。

第2章 既存技術

2.1 RTS/CTS 方式の課題

RTS/CTS 方式の課題の例を図 2.1 に示す。ノード A とノード C は隠れ端末の関係にあり、ノード A からノード B に送信が行われる。図 2 では、ノード A とノード B が RTS/CTS 交換のやり取りをしている間に、3 ホップ先のノード D が RTS を送信した状態を示している。

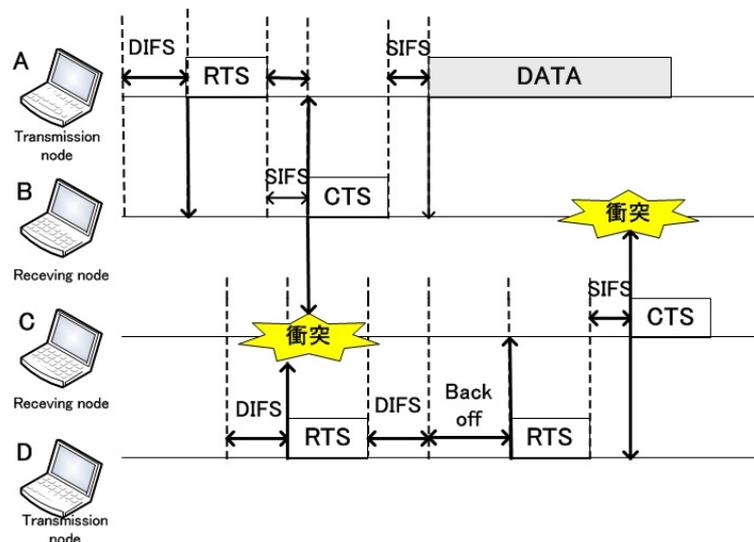


図 2.1 RTS/CTS の課題

ノード A が送信した RTS に対して、ノード B は CTS を返信して送信を許可する。ここで、RTS/CTS のやりとりの間にさらに遠隔にあるノード D が RTS を送信すると、ノード B が送信した CTS とノード C の部分で衝突する。ノード D は CTS の応答がないため、RTS を再送信する。一方、ノード A はノード B からの CTS を受信すると、ノード C で衝突が発生していることに気が付かずノード B に対してデータ送信を始める。ノード C はノード D からの RTS に応答して CTS を送信するため、ノード A のデータと衝突する。これにより、ノード A は再送信が必要となり、スループット低下の原因となる。

この課題は RTS/CTS がパケット交換であるためにある程度の時間を必要とし、衝突が発生しやすいことに起因している。

上記の問題は以下に述べる PLCP(physical layer convergence protocol) について考慮されおらず、正しい結果が出されていないと思われる。

PLCP とは、電波環境の変異によって速度を低速に切り替える際に必要な情報が定義されている。PLCP は、PLCP プリアンブルと PLCP ヘッダで構成されている。PLCP のパケットフォーマットを図 2.2 に示す。



図 2.2 PLCP のフォーマット

プリアンブル部分に受信信号の同期、ヘッダ部分に伝送速度やパケット長などデータ通信速度識別に用いる情報が記載されている。PLCP は全ての端末が受信できるよう最低速度で送信される。そのため、RTS/CTS のパケットは PLCP 部分の送信に時間がかかり周辺端末の制御に少なくない時間が必要となる。

表 2.1 に各シーケンスにかかる時間を、図 2.3 に各シーケンスを示す。

表 2.1 各シーケンスの使用時間

IEEE802.11g		時間 (μ s)
DIFS		34
Backoff		135 ~ 9207
RTS	PLCP	26
	本体	3
SIFS		10
CTS	PLCP	26
	本体	3
DATA	PLCP	26
	本体 (MAX)	227
ACK	PLCP	26
	本体	3

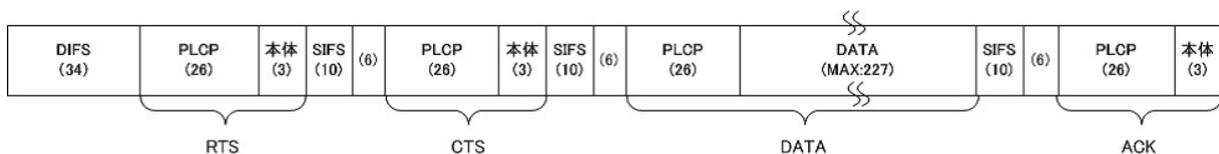


図 2.3 各シーケンスの状態

表 2.1、図 2.3 に示すように、RTS/CTS 共に本体部分の送信時間は短いですが PLCP 部分のオーバーヘッドが大きく衝突の可能性が大きいことが分かる。また IEEE802.11g では SIFS の時間が 10 μ s だが、11a の規格と揃えるために 6 μ s の間何もしない時間があり、実際は 16 μ s となっている。

第3章 提案方式

3.1 SBTの導入

上記課題を解決するためにストロングビジートーン(以下 SBT)を導入する。ビジートーンとは、単一の周波数の電波で、送信ノードが通信中であることを周囲に伝える制御信号である。また、ビジートーンは単一周波数の狭帯域信号であり、小さな送信電力でも広範囲において受信可能であるため、それによる電力消費の増加は小さい。また、複数の装置が同時にビジートーンを発生させたとしても、単一周波数であるため周辺の装置はこれを検知することができる。

ビジートーンを用いた技術 [5] として、FPDBT プロトコルでは送信時に発生するノイズの範囲が伝達範囲よりも広範囲になった場合、ノイズの発生する最大範囲に対してビジートーンを送信し周辺端末を制御する。VPDBT プロトコルでは、ノイズの発生する範囲をビジートーンで調査する。ビジートーンを送信している間に、衝突が発生するとビジートーンの送信範囲を拡大し、衝突が発生しないとビジートーンの送信範囲を縮小することで帯域の占有を防いでいる。ADBT プロトコルでは、二つのチャンネルでビジートーンの送信範囲を変化させ、より帯域の占有を防いでいる。各々のプロトコルはビジートーンの到達範囲を拡大し、晒し端末問題を解決することはできるが、図 2.1 にあるような3ホップ先の端末による衝突は防ぐことができない。また、既存のビジートーンを用いた技術はプリアンプルについて考慮していないことから図 3.1、図 3.2 に示すように衝突が発生してしまう。

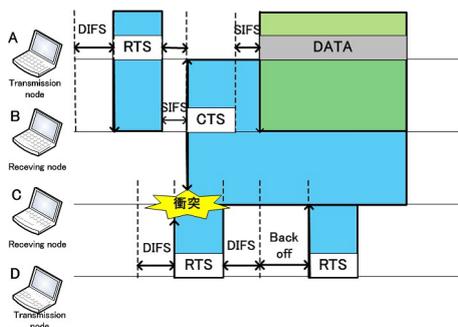


図 3.1 既存ビジートーンの動作 1

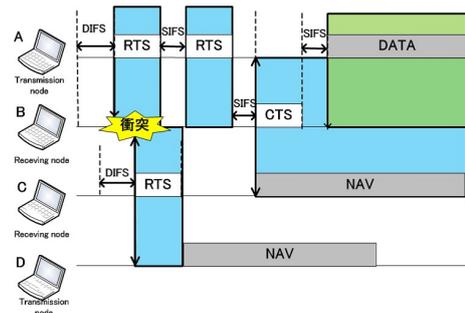


図 3.2 既存ビジートーンの動作 2

そこで、SBT では電波の到達範囲を拡大して周辺端末を制御する。SBT の到達範囲は、RTS 送信時には通常の通信範囲の 3 倍、CTS 送信時には 2 倍の距離に拡大した SBT を同時に送信する。各ノードは SBT を検出した場合、新たな通信を開始するのを控える。また、通信中に SBT を検出した場合、SBT を無視して通信を継続する。

図 3.3 と図 3.4 に SBT の動作を、図 3.5 に SBT 適用時のシーケンスを示す。図 3.3 に示すように RTS 送信時には通常電波到達範囲の 3 倍に拡大された SBT3 が送信される。ま

た図 3.4 に示すように CTS 送信時には 2 倍に拡大された SBT2 が送信される。

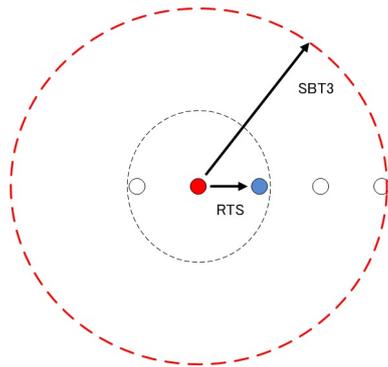


図 3.3 RTS の場合

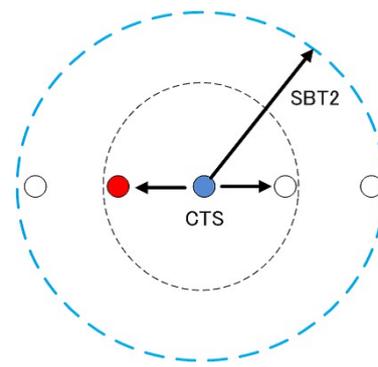


図 3.4 CTS の場合

図 3.5 では、ノード A が RTS を送信するのと同時に 3 倍に拡大した SBT3 が RTS と SIFS の時間の間送信される。RTS を受け取ったノード B は CTS を送信するの同時に 2 倍に拡大した SBT2 が CTS と SIFS の時間の間送信される。この間、ノード C とノード D は SBT を検出しており通信を控える。そのため、ノード C は CTS を受信して NAV が発生しており、SBT の送信終了後にノード D が RTS を送信してもノード C は待機中なので CTS を返さず衝突は発生しない。図 2.2 において RTS/CTS 方式ではノード D が制御されないため衝突が発生した。しかし、提案方式ではノード D まで SBT が届き、ノード D が制御されるため図 2.2 のような衝突は発生しない。これにより、パケット同士の衝突を大幅に軽減できる。

この際、図 3.5 に示すようにノード D が RTS 送信中に SBT3 を送信しており、ノード A とノード B が SBT を検出するが送信中であるため、SBT の検出を無視して通信は継続される。

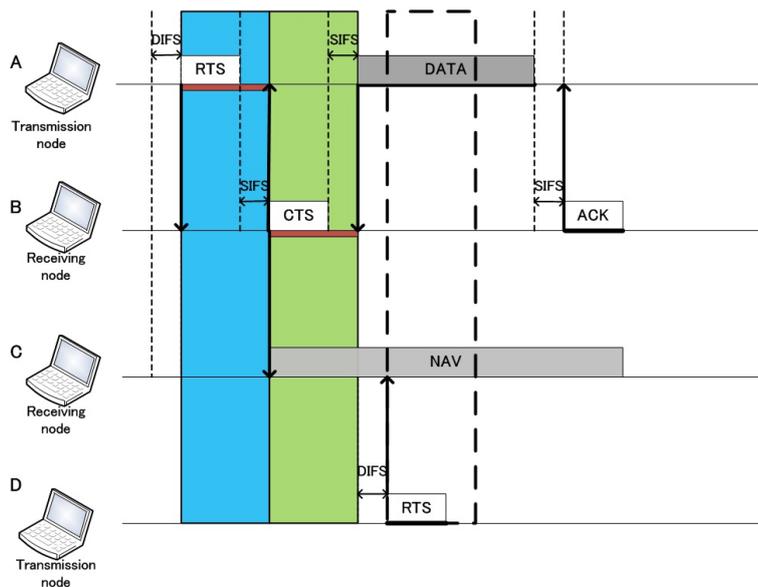


図 3.5 SBT の動作

3.2 バックオフアルゴリズムの修正

SBTによりパケットの衝突は大幅に軽減するものの完全になくすことはできない。衝突時のバックオフ時間の演算において2台のノードが同一乱数を生成すると再度衝突を繰り返す。そこで、バックオフ時間におけるアルゴリズムを修正することで再送時におけるパケット衝突をさらに軽減する。

バックオフ時間はスロットタイム(以下 t)とCW(Contension Window) [6]の範囲内で発生した乱数の値をかけたものが適用される。

IEEE802.11gでは t の値は9.0 μ s、CWは最少が15、最大が1023となっており、以下のように設定されている。

t の値は最少サイズフレームが端末間を往復するのにかかる時間であり、キャリアが往復するまでの時間は512bitなのでスロットタイムは512bit秒となっている。また、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CWminと最大値がCWmaxの値の範囲内の整数で、CWmin CWmaxとなり、 $CW=(CWmin+1) \times 2^{n-1}$ (n は再送回数 > 0)の指数関数でCWの範囲は増加し、設定したCWmax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CWmax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。

バックオフ時間の関連研究として素数スロット時間 [3]とCW操作によるスループット向上の研究 [4]がある。素数スロット時間では、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操作によるスループット向上の研究では、CWサイズを小さくすることで優先的に動作させるAPを設けることでスループットの向上を目的にしている。しかし、無線通信の規格であるCSMA/CAの t とCWの値は有線通信の規格であるCSMA/CDと同じくキャリアの往復にかかる時間で演算されており、無線通信においては t の値を長く取りすぎているという課題があり、上記の方式では、衝突を軽減しスループットを向上させる効果があるが、上記に示すように t の値が無線通信において適した値ではなく無駄に待機時間が長くなっている問題について考慮されていない。

無線通信では、有線通信のように通信中に衝突が発生しキャリアが衝突したとしても検知することはできない。有線通信では、キャリアが往復する時間を待機し衝突が発生した場合それを検知し、通信を停止することができる。再送の際は、送信端末は衝突によって欠損した部分だけを送信すればよい。それに対し、無線通信では送信の途中で衝突が発生しても検知することが出来ず、Timeoutになるまで待機する。そのため送信の際は、送信端末はキャリアを全て送りなおす必要がある。上記の様に、無線通信ではキャリアが往復することによる利点無くオーバーヘッドが大きくなる要因となっている。よって、無線通信ではキャリアの往復ではなく、キャリアが端末に到達するまでの時間が適している。

そこで、本稿ではSBTが3ホップ先の端末まで到達する時間を t と設定する。電波到達距離を100mとすると、3ホップ先のノード(300m)にSBTが届く時間は最長0.9 μ sである。すなわち約0.9 μ sで周辺端末が制御することが可能なため、 t を1.0 μ sと設定することができる。

t の値を小さくしたことから、CWを相対的に大きくでき、同じ乱数を発生する確率を小さくできる。このことから、衝突発生確率をさらに軽減することが可能となる。

第4章 シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

SBT およびバックオフアルゴリズム修正による効果を ns-2 [7] によるシミュレーションを行い測定した。シミュレーション環境を以下の表 4.1 と表 4.2 及び図 4.1 に示す。

表 4.1 シミュレーションパラメータ 1

アドホックネットワーク	
台数	37 台
電波到達範囲	100(m)
SBT3 電波到達範囲	300(m)
SBT2 電波到達範囲	200(m)
端末間距離	90(m)
フィールド	1000 × 1000(m)
伝搬方式	TwoRayGround
アンテナタイプ	OmniAntenna
ルーティングプロトコル	AODV
計測時間	430(s)
802.11g	
無線帯域	54(Mbps)

表 4.2 シミュレーションパラメータ 2

スループット測定端末	
台数	2 台
通信タイプ	FTP
トランスポートプロトコル	TCP
パケットサイズ	1000(Byte)
背景負荷発生端末	
台数	2 ~ 80 台
通信タイプ	CBR
トランスポートプロトコル	UDP
パケットサイズ	200(Byte)
パケット発生率	0.064

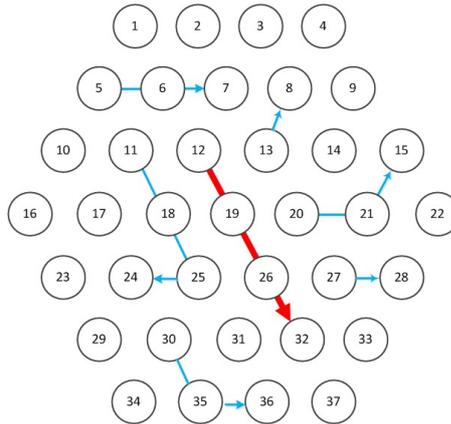


図 4.1 ネットワーク構成

t の値は $1.0 \mu s$ 、CW の値は最少が 127、最大が 8121 と設定する。各端末は 1 ホップ先の端末までの電波が届くように 90m 間隔で設置する。TCP スループット測定用の端末として、送信端末を 12、宛先端末を 32 とする。端末 11 は端末 19、26 を中継して通信を行う。背景負荷は VoIP (Voice over Internet Protocok) を想定し、パケットサイズ 200Byte、パケット発生率は 0.064Mbps の CBR(Constant Bit Rate) とした。背景負荷端末は、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 通信を行う。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 10 秒毎にランダムに選択された 2 台の端末間で UDP セッションが確立され、背景負荷を徐々に増やしていく。このときに対象の TCP スループットがどのように変化するかを測定した。

4.2 性能比較

4.2.1 SBT

図 4.2 に SBT を導入したシミュレーションの結果を示す。横軸はシミュレーション時間、縦軸はターゲット端末間の TCP スループットである。今回の結果は、20 回分のシミュレーションで得られた結果の平均値である。

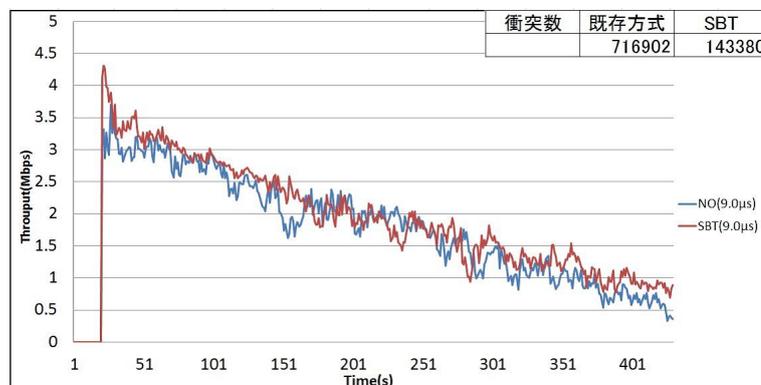


図 4.2 シミュレーション結果 1

UDPセッション数が増えるごとにTCPスループットが低下していくことが分かる。これは、UDPの通信量が増加することでネットワークのトラフィックが増大し、TCPの通信可能帯域が狭まっていくためである。

SBTを導入することで、トラフィックが増大した状態においてパケット衝突減少したことにより、既存方式の約2倍のスループット向上が見られる。また衝突数も既存方式の約1/5倍に軽減されている。

4.2.2 バックオフアルゴリズム

SBTを導入し、バックオフアルゴリズム修正を行った状態で上記と同様のシミュレーションを行った。図4.3にバックオフアルゴリズム修正を行ったシミュレーションの結果を示す。

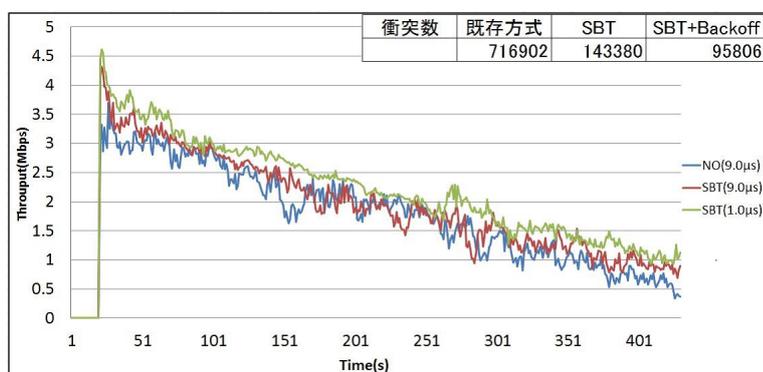


図 4.3 シミュレーション結果 2

バックオフアルゴリズムを修正することにより、衝突の発生確率が減少したことでSBTを適用しただけのものよりもトラフィックが増大した状態においてよりスループットの減少率を抑えられていることが分かる。提案方式を用いることで、トラフィックが増大するにつれスループットは既存方式の約3倍、衝突数を約1/9倍にすることができる。

ここで、TCPセッション確率時において、バックオフアルゴリズムを修正したものが他方式よりもスループットが高い値を示すのは、 t の値を小さくすることにより1つのシーケンスにかかる時間が短縮されるためである。通信開始時の待機時間であるDIFSは、 $SIFS + t + t$ の値で決定される。通常のDIFSはSIFSが16、 t が9.0 μs であることから34 μs となる。提案方式のDIFSの値は、 t の値が1.0 μs であることから18 μs と1/2近く小さくなっている。そのため、1秒間における通信量が増加するためスループットが高い値を示している。

第5章 まとめ

RTS/CTS 方式における課題を解決するために、SBT を導入しバックオフ時間修正により大幅に衝突削減するアルゴリズムの方式を提案した。この方法により、隠れ端末同士の RTS の衝突によるスループットの低下を未然に防ぐことが可能となる。SBT の機能、バックオフアルゴリズムを修正し、提案方式の有用性を確認した。今後は、RTS/CTS を用いず、全て SBT でアクセス制御を行う方式、ブロードキャストにおける SBT による端末制御方式について検討していく予定である。

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。副査の旭健作助教に深く感謝致します。

最後に、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。

参考文献

- [1] 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ーンの提案
情報処理学会研究報告, Vol.2011-MBL-057 Mar.2011.
著者: 後藤秀暢、渡邊晃
- [2] アドホックネットワークの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(DICOMO2010)シンポジウム論文集, Vol.2010, No.1, pp.593-597, Jul.2010.
著者: 後藤秀暢、渡邊晃
- [3] Maximum Delay Guarantee Using Queue Control and Prime Slot Time for LANs
信学技報, IEICE Technical Report, RCS2006-241, March.2007.
著者: Takahiro INOMARU, Nari TANABE, Shingo KAWABATA, Hideaki MATSUE
- [4] Throughput Measurements under Various Contention Window Sizes in Wireless Mesh Networks
信学技報, IEICE Technical Report, RCS2007-115, December.2007.
著者: Hideaki KATO, Nobuo FUNABIKI, and Toru NAKANISHI
- [5] A MAC Protocol Using Busy Tone in Wireless Networks of Ad Hoc Nodes with Heterogeneous Power Capabilities
情報処理学会論文誌 Vol.47 No.9 Sep. 2006
著者: TOSHIHIDE FUJIWARA, HIROO SEKIYA, MASAKI BANDAI, JIANMING LU, TAKASHI YAHAGI
- [6] 802.11 高速無線 LAN 教科書
著者: 守倉正博、久保田周二
- [7] ns-2 によるネットワークシミュレーション
著者: 銭飛

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。

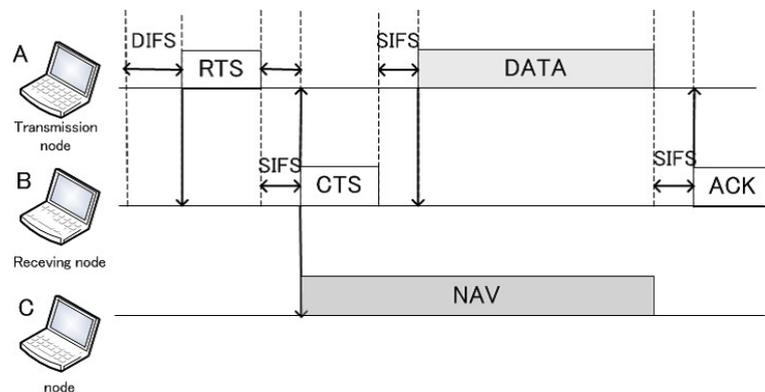


図 A.1 RTS/CTS の動作

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。