

平成24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
ルゴリズムの修正の効果についての検討

英文題目

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

情報工学科 渡邊研究室

(学籍番号: 080425105)

鬼頭 充

提出日: 平成 25 年 02 月 13 日

名城大学理工学部

内容要旨

アドホックネットワークにおける通信では、隠れ端末問題が発生する。この問題を解決するために IEEE802.11 では RTS/CTS(Requet to send/Clear to send) 方式を使用している。しかし、パケットの衝突は完全には防ぐことができず、スループットが低下してしまう。本稿では、これを改善するためにストロングビジートーン (Strong Busy Tone) と呼ばれる制御信号を用いることと、CSMA/CA のバックオフアルゴリズムを修正することによりスループット向上に効果があるのかを確かめるためシミュレーションを行い結果について評価している。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	既存技術	3
2.1	RTS/CTS方式について	3
2.2	バックオフ時間について	7
第3章	スループット改造方式	8
3.1	SBTの使用	8
3.2	バックオフアルゴリズムの修正	9
第4章	評価	10
4.1	評価の方法	10
4.2	シミュレーション環境	10
4.3	シミュレーション条件	10
4.4	シミュレーション構成図	11
4.5	シミュレーション結果	13
第5章	まとめ	17
	謝辞	18
	参考文献	19
	研究業績	20

第1章 はじめに

無線 LAN 技術の普及が急速に進んでいる。無線 LAN の利点はノードの移動や設置が簡単、配線工事の必要がない、端末設置の自由度が高く簡単に LAN の構築出来る。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ネットワークがあり、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通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。アドホックネットワークは端末同士で相互に通信を行うことで簡単にマルチホップ通信を実現することができる。また、一時的なネットワークを構築したり、災害時に通信環境を迅速に回復することができる。しかし、アドホックネットワークは、隠れ端末問題 [1] の影響が大きく、トラフィックが増加すると大幅にスループットが減少してしまうことが知られている。

隠れ端末問題とは、互いに電波到達範囲外の 2 つのノードが同じノードに対して片方が通信中である時にもう片方が通信してしまうことによって、データの衝突が発生してしまうことである。IEEE802.11[2] では、隠れ端末問題に対して 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、隠れ端末問題を完全には解決することが出来ていない。RTS/CTS 方式では、近くの端末に対して RTS 信号や CTS 信号を受信させることにより、一定期間通信を控えさせることによりデータの衝突を防ぐものである。しかし、RTS/CTS 方式では、トラフィックが増加するにつれて RTS どうしや RTS と CTS、CTS とデータが衝突してしまう。これは、RTS、CTS が一種のパケットであることと、シーケンスの実行時に所定の時間が必要となるため衝突が発生しやすく、無駄な送信や無駄な待機時間が発生してしまうため大幅にスループットが低下してしまう。よって、RTS/CTS 方式のみでは隠れ端末問題を回避することが出来ない。

この問題を解決するために、我々の研究室ではストロングビジートーン (SBT:Strong Busy Tone)[3][4] と呼ばれる特殊な制御信号を用い、周辺端末を制御することによって隠れ端末問題を防ぎスループットの低下を防ぐ方式を提案している。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ってスループットのさらなる低下を防ぐ技術が方式が検討されている [4][7]。本稿では、その技術に対しての有用性を確かめるためにシミュレーションを多数の条件を用いて行い評価した結果、SBT を使用しバックオフアルゴリズムの t の修正を行ったものが、スループット向上に一番良い結果となった。このことより、SBT を使用しバックオフアルゴリズムを修正することはスループットを向上させることに繋がる。

以下、2 章では既存技術について、3 章ではスループット改造方式の説明を行う。4 章では、スループット改造方式に対してシミュレーションを行いそれに対して評価を行う。最後

に5章ではまとめを行う。

第2章 既存技術

2.1 RTS/CTS 方式について

RTS/CTS とは、Request to send/Clear to send の略でアドホックネットワークにおける互いに電波が届かない端末どうしが、同時に同じ端末にデータを送信してしまう時に衝突してしまう、隠れ端末問題を解決するために IEEE802.11 で採用されている方式である。RTS/CTS は CSMA/CA より、データ送信を行う前に送信予約を行うためのシーケンスである。すべてのノードがこのシーケンスを監視することによって、隠れ端末問題に対しても通信ノードの状態を知らせることができる。この、RTS/CTS 方式の動きの例をを図 2.1 に示す。

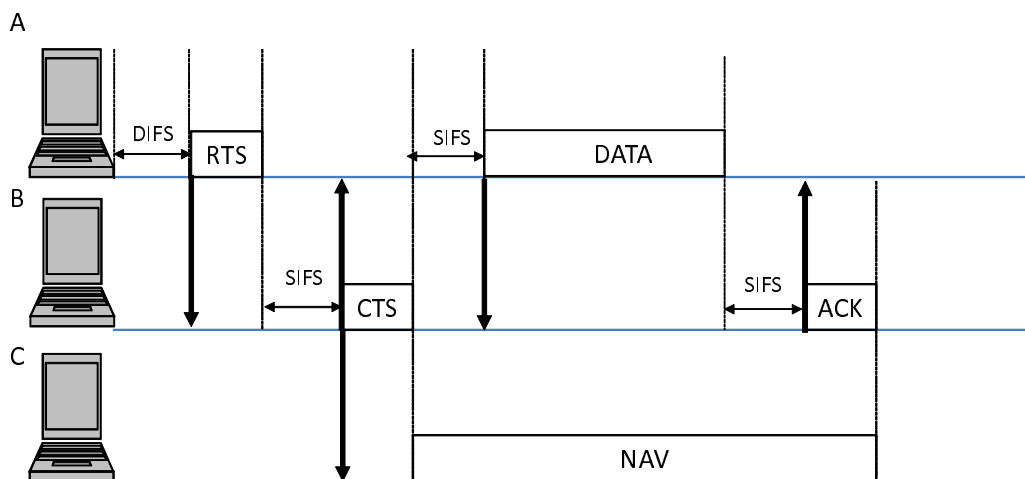


図 2.1 RTS/CTS 方式の動き

図 2.1 では、3 種類のノード (A~C) があり、A から B、B から C に対しては電波が届くが、A から C には電波が届かないものとし、A が B に対してデータを送信したいとする。この時に、RTS を B に対して送信する。B は C に対してデータ送信の許可をするため CTS を送信する。CTS を受信した C は B に対してデータを送信する。この時に、C は A が B と通信中かどうか分からないため、B に対してデータの送信をしたいとしても、A から送信された RTS は受信できないが、B から送信された CTS は受信できるため、これを受信して NAV 状態に入るため送信することはない。B は全てのデータを受信したら A に対して ACK を送信する。これが、RTS/CTS 方式の動きである。また、NAV 状態とは Network Allocation

Vector のことで、この状態中は送信を禁止する状態のことである。

2.1.1 RTS/CTS 方式の課題

RTS/CTS 方式の課題は、電波が届く範囲なのにデータを送りたいノードの状態を誤認してしまうため、データを送信できない状態になってしまうさらし端末問題と、隠れ端末問題を完全には解決できないことである。これは、RTS/CTS 自体が一種の packets であるため RTS どうしや RTS と CTS、CTS とデータが衝突するためである。RTS/CTS の課題の例を図 2.2、図 2.3 に示す。

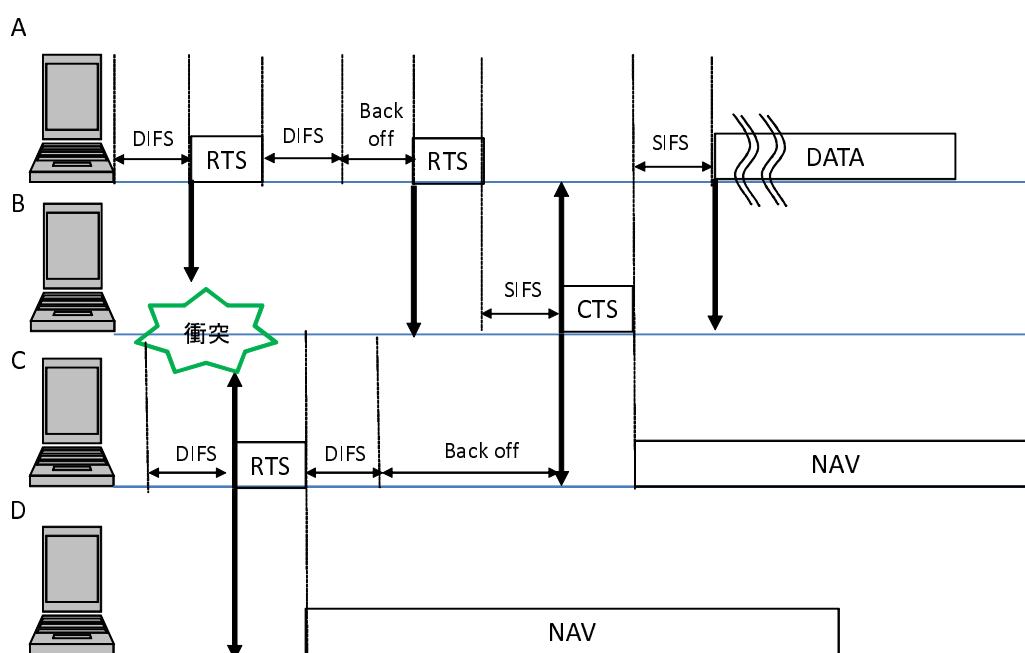


図 2.2 RTS/CTS 方式の課題 1

図 2.2 では、4 台のノード (A ~ D) があり、1 つ先の端末に対しては電波が届く (A から B、B から C など) が、2 つ先、3 つ先の端末に対しては電波が届かない (A から C など) ものとする。A が B に対してデータの送信を行いたい時、A は B に対して RTS を送信する。A が RTS を送信中に C がほぼ同時に、B に対してデータの送信を行いたとすると、C も B に対して RTS を送信する。この時、A から送信された RTS と C から送信された RTS が B で衝突してしまう。これによって、CTS が返信されない A は、再度 RTS を B に対して送信しなくてはならなくなる。これにより、無駄な時間が生じてしまう。また、この時 D は C が送信した RTS を受信するため、D は C が B に対してデータの送信が行われていると誤認してしまうため、C に対してデータの送信が可能であるのに、D は C に対してデータを送信できなくなってしまう (さらし端末問題)。

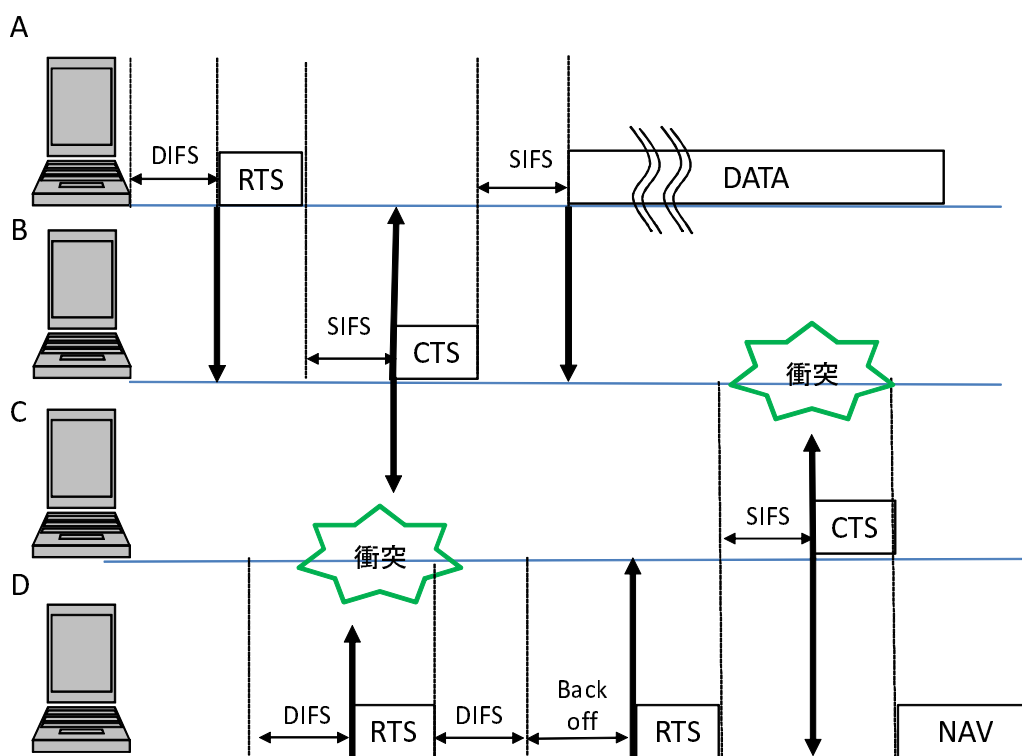


図 2.3 RTS/CTS 方式の課題 2

図 2.3 では、各条件については図 2.2 と同じであるとする。A が B に対してデータを送信を行いとすると、A は B に対して RTS を送信する。これを受け、CTS を送信する。この時に C は B からの CTS を受信するが、C が CTS を受信中に D が C に対してデータを送信を行うために RTS を送信したとすると、C で B からの CTS 信号と D の RTS が衝突してしまう。このため、RTS の再送が必要となり、スループットが低下してしまう。さらに、A は CTS を受信しているため、B に対してデータを送信する。その間に、D は RTS を送信したのに返信がないため、再度 RTS を C に対して送信する。C は CTS を送信するが、この時に、まだ A が B に対してデータを送信中であると、C からの CTS が B に送られるため、B で A からのデータと C からの CTS で衝突してしまう。このため、DATA の再送が必要のため、スループットが低下してしまう。このように、RST/CTS 方式には課題があるが、これは RTS/CTS がパケット交換であるために送信にある程度時間がかかってしまうため、衝突が発生しやすいことが問題である。そのため、通信の混雑具合によってはスループットが大幅に低下してしまう。

2.1.2 PLCP による問題

PLCP (Physical Convergence Protocol) とは、無線通信でパケットを送信する時に必ず必要となるヘッダ情報である。PLCP の構成は、PLCP プリアンブルと PLCP ヘッダである。PLCP

プリアンブル部分には受信装置が同期を行うために必要な情報が記載されている。PLCPヘッダ部分には MAC フレームの速度に関する情報が定義されている。PLCP の形式を図 2.4 に示す。

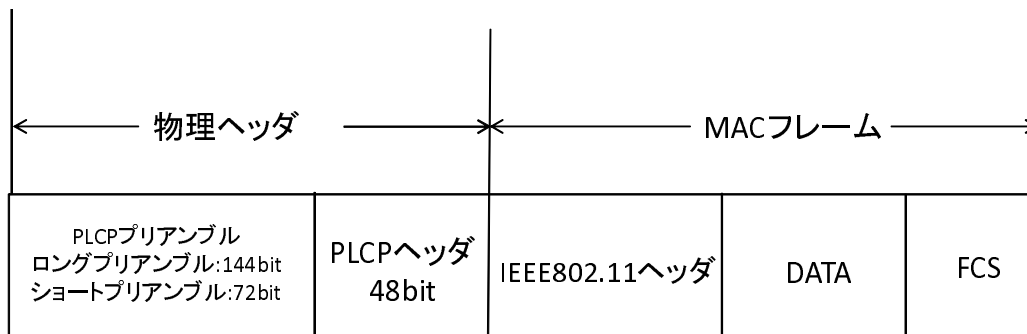


図 2.4 PLCP の形式

図 2.4 の PLCP プリアンブル、PLCP ヘッダをまとめて物理ヘッダといい、PLCP プリアンブルのロングプリアンブルは大きさが 144bit でショートプリアンブルの大きさは 72bit となっている。また、IEEE802.11 ヘッダと DATA、FCS は MAC フレームといい最大で 1532byte で転送速度は 54Mb/s となっている。IEEE802.11g では、MAC フレーム部分の通信最大速度は 54Mbps であるが、PLCP は全ての端末が受信できるように 2Mbps と定義されている。このため、PLCP の部分が MAC フレームよりもはるかに長い時間を必要とする場合がある。また、PLCP は RTS や CTS、ACK に対しても付けられる。表 2.1 に IEEE802.11g におけるシーケンスの所要時間を示す。

表 2.1 802.11g におけるシーケンスの所要時間

DIFS		34μs
Backoff		135 ~ 9207μs
RTS	PLCP	26μs
	本体	3μs
SIFS		10μs
CTS	PLCP	26μs
	本体	3μs
DATA	PLCP	26μs
	本体	227μs
ACK	PLCP	26μs
	本体	3μs

表 2.1 の DATA(本体)の値は最大ものとなっている。また、表からも分かるように RTS、CTS、ACK の本体部分は 3μs 程度となっているが、PLCP の部分は 26μs となっているため

送信時間が大きくなってしまっている。これより、RTS/CTSのMACフレーム部分は短く定義されているが、PLCPが長いこと結果的に多くの時間を必要としてしまっているため衝突の確率を高めている大きな原因となっている。

2.2 バックオフ時間について

CSMA/CAのバックオフアルゴリズムにおけるバックオフ時間は、スロットタイム(以下 t とする)とCWの範囲内で発生した乱数の値を以下の式で演算したものである。

$$Backoff = t \times \text{randam}(0.CW) \quad (2.1)$$

ここで、 $\text{randam}(0.CW)$ は0~CWの範囲内で生成されたランダムな整数値である。CWは、以下の式によって求められる。

$$CW = (CW_{min} + 1) \times 2^{n-1} \quad (2.2)$$

ここで、 CW_{min} とは、CWの最小値のことを表し、 CW_{max} (最大値)まで増加する。 n は再送回数のことである。これが所定の回数に達した時送信に失敗したとみなしフレームを破棄する。CWの範囲は指数関数的に増加するため、トラフィックが増加した時は送信を控えさらにトラフィックが増加することを防ぐことができる。しかし、複数のノードが同一乱数を生成することがあるので、衝突を完全に防ぐことはできない。

また、IEEE802.11では t の値は以下のように定義されている。

- CCAtime : 端末の状態判定時間 ($4.0\mu s$)
- Air PropagationTime : 伝搬時間 ($1.0\mu s$)
- RxTxTurnaroundTime : 送受信間往復時間 ($2.0\mu s$)
- MACProccesingDelay : MACの処理時間 ($2.0\mu s$)

CCAtimeは、相手端末の状態を判定する時間である。Air PropagationTimeは、相手端末にデータが伝搬されるまでの時間である。RxTxTurnaroundTimeは、端末の送信及び受信状態のスイッチに用いる時間である。MACProccesingDelayは、データに対して処理を行う時間である。

以上より、IEEE802.11では、 $9.0\mu s$ と定義されている。しかし、この中には無駄な時間があるため、スループットの低下に影響を与えている。

第3章 スループット改造方式

スループット改造方式では、RTS/CTS の問題を解決するために、ストロンビジートーン (SBT:Strong Busy Tone) と呼ぶ単一周波数の信号の導入とバックオフアルゴリズムの修正を行っている。

3.1 SBT の使用

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送信状況を瞬時に周辺端末に伝えることを目的としている。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、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知ることができる。

SBT の動作を図 3.1 に示す。

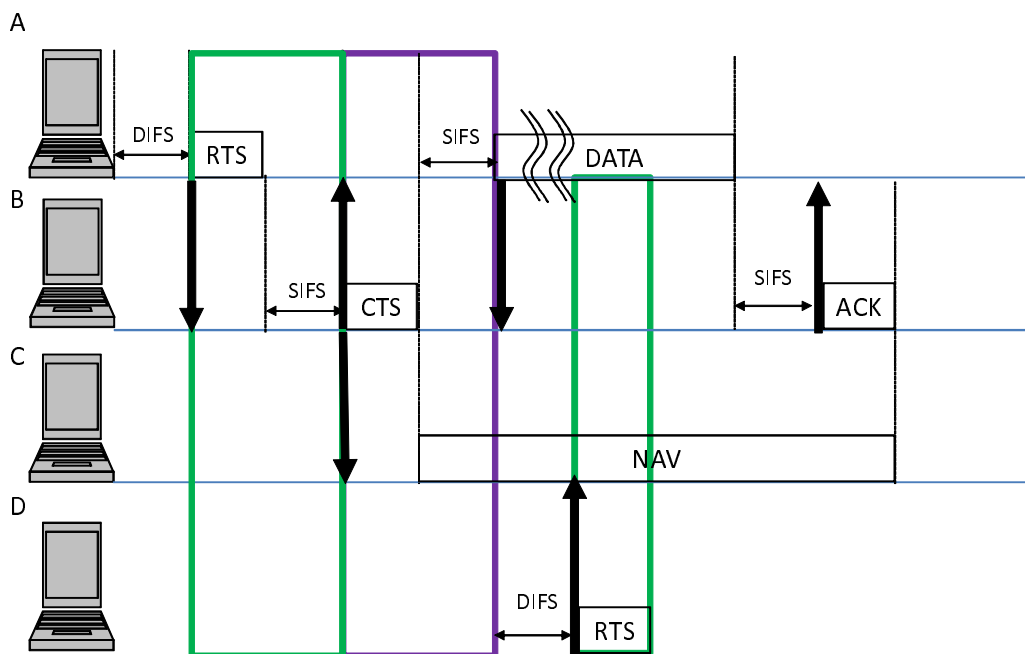


図 3.1 SBT の動作

図 3.1 では、A が RTS を送信する際に電波到達範囲の 3 倍の距離に SBT を送信する。これによって、A が B に対して RTS を送信すると同時に C、D はその状況を知るため A が RTS

を送信中に C が B に対して RTS を送信してしまうことがなくなるため図 2.2 のような衝突を回避することができる。また、D が C に対して RTS を送信することもなくなるため衝突を回避することができる。RTS を受信した B が CTS を送信する際に電波到達範囲の 2 倍の距離に SBT を送信する。これにより、C は CTS を受信している間に RTS を送信することがなくなり、D も C に対して RTS を送信することがなくなるため図 2.3 のような衝突を回避することができる。これによって、パケットどうしの衝突を大幅に軽減することができる。C が CTS を受信の終えた後に、D が C に対して RTS を送信したとしても C は既に待機状態に入っているため CTS を送信しない。この時、A と B も D からの SBT を受信するが通信をすでに行っているため無視して通信を継続する。

結果として、SBT は情報を持たない単一電波であるため、瞬時に制御することができ、RTS/CTS の交換に時間がかかるという問題を解決することができスループットの向上に繋がる。

3.2 バックオフアルゴリズムの修正

SBT を使用することにより、大幅に衝突を減らすことができるが、完全にはなくことはできない。衝突時のバックオフ時間の演算において複数のノードが同一乱数を生成すると再度衝突してしまう。そこで、バックオフ時間のアルゴリズムを修正することによりスループットを向上させる。

IEEE802.11g では、 t の値は $9.0\mu\text{s}$ と定義されているが、この値には、送信される情報がパケットであることが前提となっている。そのため、SBT を適用することにより不要なものを省くことができ、小さくすることができる。まず、無線通信では相手端末の状態を知ることができないため、端末の状態判定時間が不必要である。そのため、CCA Time は省略することができる。また、SBT はデータを含んでいないことから MACProcessingDelay は省略することができる。以上ことを踏まえると SBT を用いた制御方式には SBT の伝搬時間と送受信間往復時間のみを考慮すればいい。SBT の伝搬時間は、端末間距離を 100m とすると約 $0.3\mu\text{s}$ 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ので 3 ホップ先である 300m へ SBT をが到達する時間を考えればいいので、約 $0.9\mu\text{s}$ とすることができるが、提案方式では、余裕をもって $1.0\mu\text{s}$ としている。これと、端末の送信及び受信状態のスイッチに用いる時間であり、通信を行う際に必要な最低限な時間であり、実装側に依存した値となっている送受信間往復時間である $2.0\mu\text{s}$ を合わせて、 $3.0\mu\text{s}$ とすることができる。

第4章 評価

4.1 評価の方法

SBT を使用し、バックオフアルゴリズムの修正をしたことにより、どのような効果が出るのかを ns-2(Network Simulator2) を用いて、シミュレーションを行った。端末が規則正しく並べられており、測定端末を 2 台用意し、片方の端末から法一方の端末へ通信を行う。この時、通信方法は TCP 通信を使用している。また、背景俯瞰端末は、VoIP(Voice over Internet Protocol) を想定し、パケットサイズ 200Byte、パケット発生率は、0.064Mbps とした。背景負荷端末は、測定端末で使用しなかった端末を使用し、ランダムで 2 台を選択し、通信を行い、5 秒間隔で通信の量を増やしていく。この時、通信方法は UDP 通信を使用する。また、シミュレーションを開始してから 20 秒間は通信を行わない。20 秒後に TCP 通信を開始し、330 秒になったら終了している。そのため、最終的には UDP 通信は 60 個になる。詳しいフィールドの構成図は 4.2 シミュレーション環境で図を載せている。このシミュレーションの負荷による測定端末のスループットの変化をグラフ化し、評価している。

4.2 シミュレーション環境

全てのシミュレーションの共通のパラメータは表 4.1 のようになっている。

アドホックネットワーク	
電波到達範囲	100m
フィールド	1000 × 1000m
アクセス方式	IEEE802.11g

表 4.1 に示すように、アドホックネットワークを使用し、アクセス方式は、IEEE802.11g としている。また、電波到達範囲は 100m とし、SBT 使用時の到達範囲は電波到達範囲を 100m としているため、RTS 送信時は 300m、CTS 送信時は 200m としている。

4.3 シミュレーション条件

全てのシミュレーション条件は表 4.3 のようになっている。

表 4.2 シミュレーション条件

	t の値	CW の値	SBT
条件 1	9.0 μ s	15-1023	無
条件 2	9.0 μ s	15-1023	有
条件 3	3.0 μ s	15-1023	有
条件 4	3.0 μ s	45-3069	有

表 4.3 の条件 1 は、RTS/CTS による既存方式である。条件 2 は、条件 1 に SBT を使用したものであり、SBT を使用したことにより RTS/CTS 方式を使用した時と比べてどのような変化が出るのかを調べるために行った。条件 3 は、条件 2 に加え t の値を小さくしたものであり、RTS/CTS 方式に SBT を使用しバックオフアルゴリズムを修正することによりどのような効果が表れるかを調べるために行った。条件 4 は、条件 3 に加えて、CW の値を大きくしたものであり大きくしたことにより衝突回数を減らすことができ、どのような効果が表れるかを調べるために行った。

4.4 シミュレーション構成図

4.4.1 基準とするシミュレーション

シミュレーション環境は図 4.1 のようになっている。

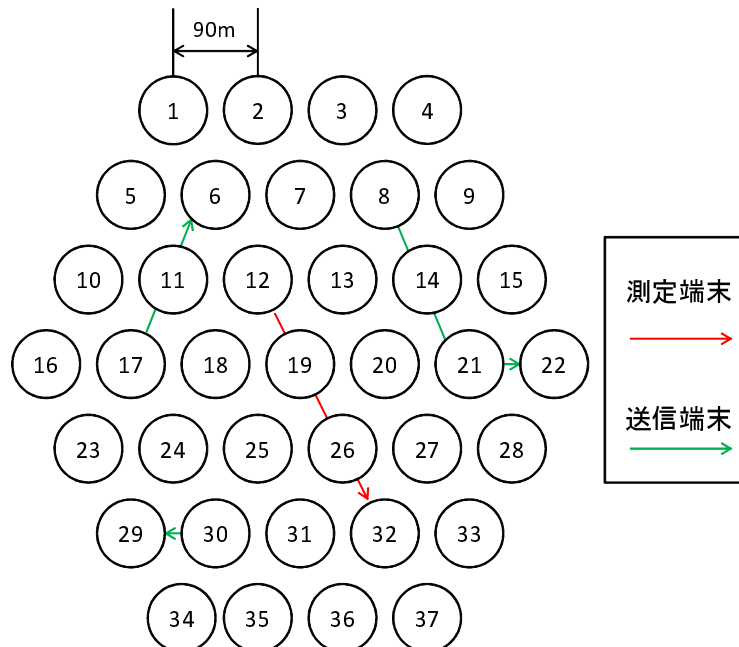


図 4.1 シミュレーション環境

図 4.1 に示すように、端末は規則正しく並んでいて、端末間距離は 90m、測定端末は TCP

通信で端末 12 から端末 32 へ、背景負荷端末は UDP 通信で測定端末以外の端末で行った。
シミュレーション回数は 50 回である。

4.4.2 端末間距離が狭いシミュレーション

シミュレーション環境は図 4.2 のようになっている。

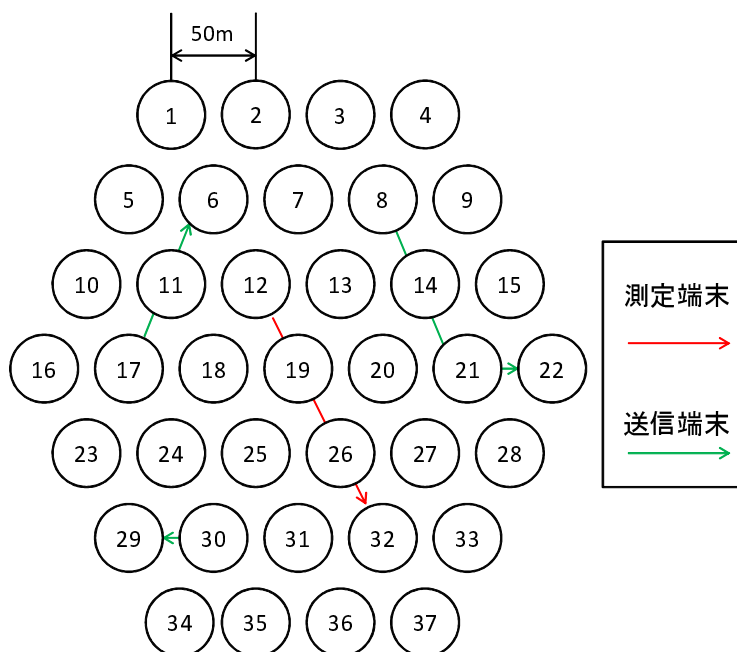


図 4.2 シミュレーション環境

図 4.2 は、端末は規則正しく並んでいて、端末間距離が 50 m となっていて、シミュレーション回数は、40 回となっている。それ以外は図 4.1 とすべて同じ条件になっている。

4.4.3 端末数が多いシミュレーション

シミュレーション環境は図 4.3 のようになっている。

図 4.3 は、端末は規則正しく並んでいて、端末数が 79 とする。シミュレーション回数は 10 回となっている。それ以外は図 4.1 とすべて同じ条件になっている。

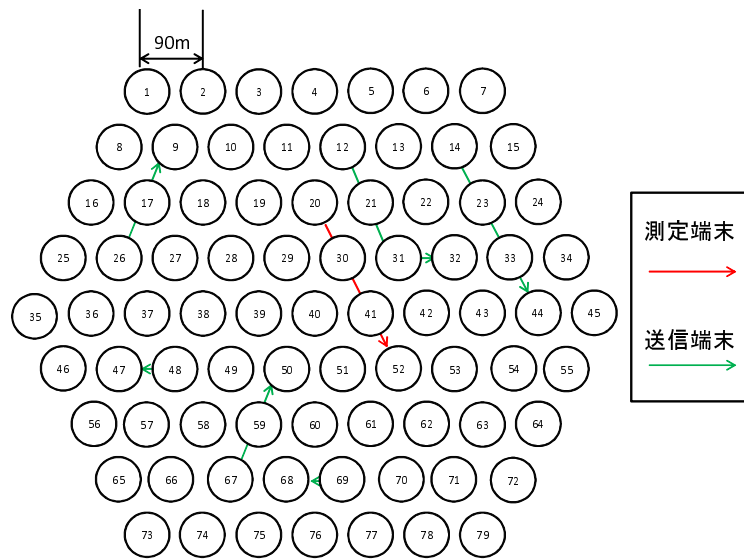


図 4.3 シミュレーション環境

4.5 シミュレーション結果

全てのシミュレーション結果にグラフを載せているが、全て縦軸がスループット (Mbps) で横軸が時間 (秒) となっている。

4.5.1 基準とするシミュレーション

シミュレーションした結果のスループットは図 4.4 のようになり、衝突回数は表 4.3 のようになった。

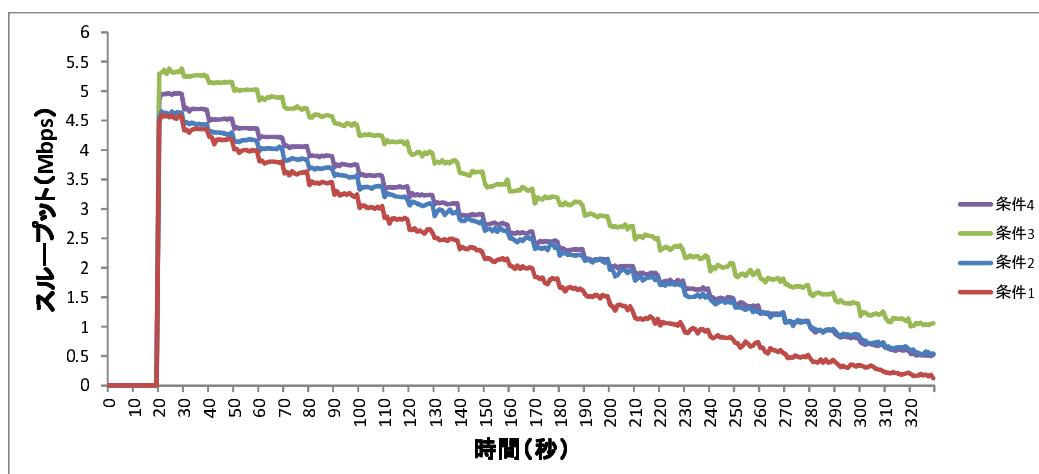


図 4.4 シミュレーション結果

衝突回数	
条件 1	135462
条件 2	13289
条件 3	15268
条件 4	5093

図 4.4 より、スループットは条件 3 が最も良くなった。各条件についてみていくと、条件 2 は条件 1 よりもスループットがよくなっているが、これは SBT を使用したことによってデータの衝突回数が大幅に減少したためである。条件 3 は SBT を使用しさらに、 t を小さくしたことによって待ち時間が減ったため条件 2 よりもスループットがよくなっている。条件 4 では、SBT を使用し、 t を小さくしさらに CW の値を大きくしているため、衝突回数が大幅に減少している。しかし、CW を大きくしたため結果的に無駄な待ち時間が生じてしまうため、条件 3 を超えることはできない。

以上のことより、SBT を使用した場合においては、 t の値だけを小さくすることが最も効果があるということが出来る。

4.5.2 端末間距離が狭いシミュレーション

シミュレーションした結果のスループットは図 4.5 のようになり、衝突回数は表 4.4 のようになった。

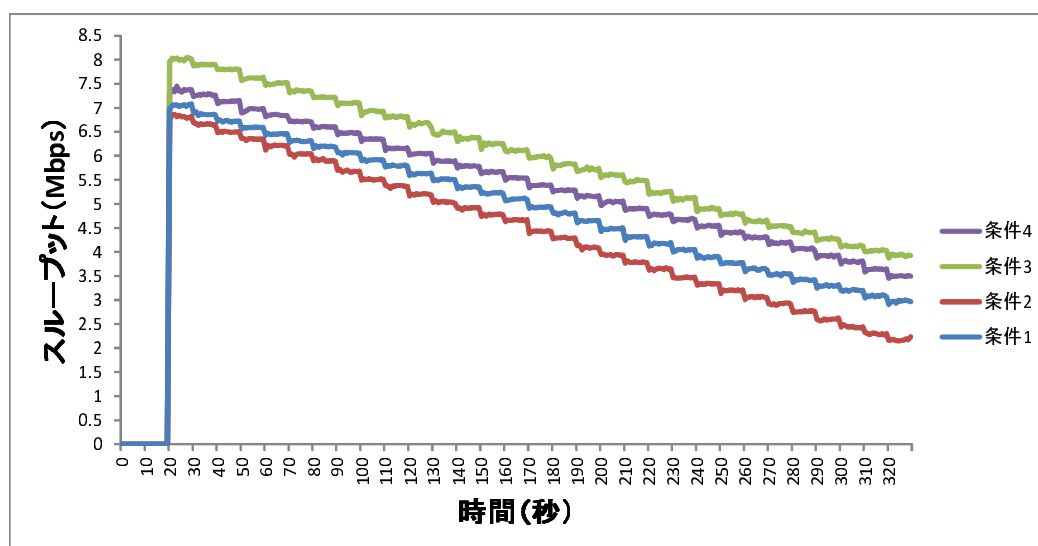


図 4.5 シミュレーション結果

図 4.5 より、スループットが最もよくなっているのは条件 3 である。これより、端末間距

衝突回数	
条件 1	128390
条件 2	9289
条件 3	10839
条件 4	3216

離を狭くしても t の値だけを小さくすることが最も効果的であることがわかる。また、縦軸を見るとスループットの初期値が図 4.4 よりも大きくなっているが、これは端末間距離が 50m と狭くなったのに対して、電波到達範囲は 100m から変更していないため、基準とするシミュレーションと違い、2 ホップ先の端末に電波が届く。そのため、スループットの初期値が大きくなっている。

4.5.3 端末数が多いシミュレーション

シミュレーションした結果のスループットは図 4.6 のようになり、衝突回数は表 4.5 のようになった。

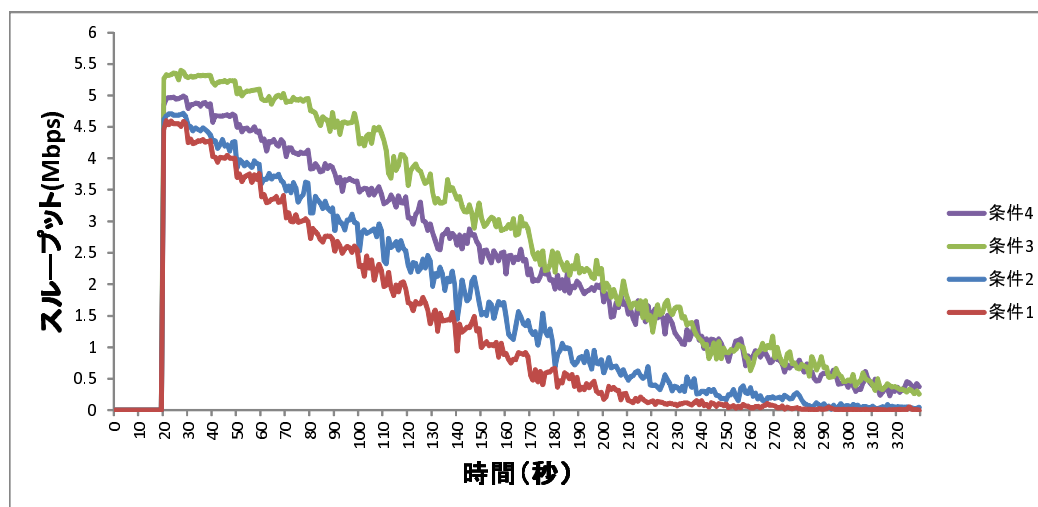


図 4.6 シミュレーション結果

衝突回数	
条件 1	238081
条件 2	113282
条件 3	136872
条件 4	73622

図 4.6 より、スループットが最も良くなっているのは条件 3 である。しかし、シミュレーション回数が 5 回と少ないため、シミュレーション回数を増やしていかないと正確な値を出すことはできないが、通信開始時の値は変わることがないので図 4.4 と比べてみると、ほとんど変わらないことがわかる。これにより、端末数が多くなった場合でも、 t の値を小さくすることが最も効果的であると考えられるが、1 回のシミュレーションに対して時間が大幅にかかってしまうため基準のシミュレーションや端末間距離が狭いシミュレーションのようにシミュレーション回数を増やすことができていないため、今後シミュレーション回数を増やしていく予定である。

以上より、全てのシミュレーションの結果より、どの条件においても SBT を用い、CSMA/CA のバックオフアルゴリズムを修正することがスループットの向上に繋がるということが分かる。

第5章 まとめ

本稿では、RTS/CTS 方式の課題である隠れ端末問題を解決しスループットを上昇させるため、SBT の使用と CSMA/CA のバックオフアルゴリズムの修正を行いさまざまな条件でシミュレーションを行った。これにより、最もスループット上昇させることができたのは t の値を小さくすることである。今後は、より多くの条件でシミュレーションを行い SBT とバックオフアルゴリズムの修正の有用性を確かめていく予定である。また、RTS/CTS を用いることなく全て SBT で制御する方法などについても検討していく予定である。

謝辞

本研究を吸う移行するにあたり、多大な御指導とご教授を賜りました。名受大学理工学研究科 渡邊晃教授には心から感謝致します。

最後に、本研究を遂行するにあたり、数々の有益な御助言や御討論を賜りました。渡邊研究室及び鈴木研究室の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 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(2008)
- [2] IEEE Std 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).
- [3] 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)
- [4] 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)
- [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ーンの導入とその拡張方式の検討と評価, 信学技報, vol.112, no.241, AN2012-42, pp. 101-106(2012)
- [6] 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)
- [7] 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(2011)

研究業績

学術論文

なし

研究会・大会等

なし