

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を用いた アクセス制御方式の検討と評価

伊藤 智洋 鈴木 秀和 旭 健作 渡邊 晃

名城大学大学院理工学研究科

Researches and Evaluation of the Access control Method using Strong BusyTone in Ad hoc Networks

Tomohiro Ito Suzuki Hidekazu Asahi Kensaku Watanabe Akira

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

1 はじめに

ユビキタス社会に向け無線 LAN 技術の普及が急速に進んでいる。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点が挙げられる。中でも、端末同士で相互に通信を行うことで容易にマルチホップ通信を実現可能なアドホックネットワークが注目されている。しかし、アドホックネットワークは隠れ端末問題[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低下することが知られている。隠れ端末問題とは、互いに電波の到達範囲外にいる送信ノードが、同時に通信を開始すると、中間地点においてデータの衝突が発生する問題である。

IEEE802.11[2]では、隠れ端末問題の対策として RTS (Request to Send) / CTS (Clear to Send) 方式が採用されている。RTS/CTS 方式では、近隣の端末を仮想的なキャリア検出状態に移行させ、一定期間送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 同士の衝突や CTS とデータの衝突が発生することが避けられない。その理由として、RTS/CTS 自体がパケットであるため、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である。従って、RTS/CTS 方式だけでは隠れ端末問題を完全に解決することはできない。また、RTS/CTS 方式では、隣接端末に向けてパケットを送信するため、制御パケットの送信失敗時に周辺端末が制御パケットを受信し、無駄な待機時間が発生するさらし端末問題を解決できない。

隠れ端末問題とさらし端末問題を解決する方法としてビジートーンを用いた技術[3-6]が提案されている。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。ビジートーンは、帯域が狭いため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、周辺の装置はこれを検知することができる。しかし、既存のビジートーン技術ではさらし端末問題を解決することは可能であるが、遠隔の端末を制御できないためデータの衝突を完全に防ぐことができないという課題がある。

そこで、本稿ではストロングビジートーン (SBT: Strong Busy Tone) [7][8]と呼ぶ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を用い、周辺端末を広範囲にわたって制御することにより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。

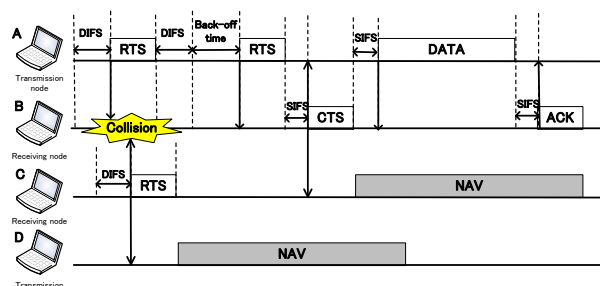


図 1. RTS/CTS 方式の課題 1

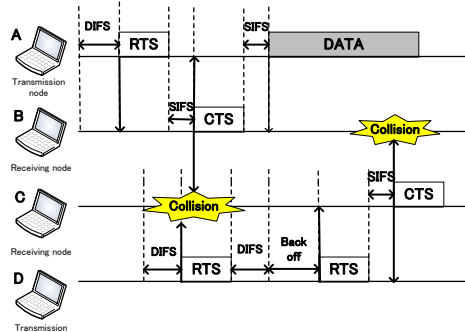


図 2. RTS/CTS 方式の課題 2

提案方式についてシミュレーションを行った結果、RTS/CTS 方式と比較しあらゆるケースにおいて通信性能が向上することがわかった。

以下、2 章では既存技術とその課題について、3 章では提案方式についてそれぞれ説明する。4 章ではシミュレーションとその結果を考察し、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 方式の課題

RTS/CTS 方式の課題の例を図 1、図 2 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 に送信が行われる例を示す。図 1 では、ノード A とノード C がほぼ同時にノード 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 送信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。衝突が発生することにより送信は失敗となるため、ノード A、C ともに

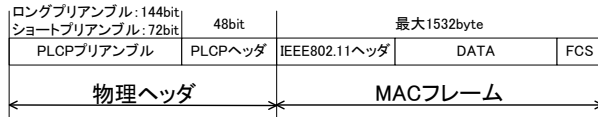


図 3. PLCP のフォーマット

表 1. 各シーケンスに要する時間

IEEE802.11g		時間(μs)
DIFS		34
Back off		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

再度 RTS の送信から始める必要がありスループットが低下する。また、ノード D は RTS を受信するため NAV 状態に入り、通信ができない状態となる（さらし端末問題）。

図 2 ではノード 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 に応答として 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。

これらの課題は RTS/CTS がパケット交換であるために送信にある程度の時間を必要とすることが原因である。また、隣接端末のみを制御するため、より遠隔の端末が通信を開始した際に制御することができない。そのため、通信が混雑するほどスループットが大幅に低下する。

2.2 PLCP に起因する課題

RTS/CTS 方式において周辺端末の制御に時間がかかる要因として PLCP（Physical Layer Convergence Protocol）のオーバーヘッドが挙げられる。PLCP とは、無線でパケットを送信する際に必要となる物理ヘッダで、図 3 に示すように 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定義されている。

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 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 はデータだけでなく RTS、CTS、ACK などにも付加される。表 1 に IEEE802.11g における各シーケンスの所要時間を示す。表 1 に示すように RTS、CTS、ACK はいずれ

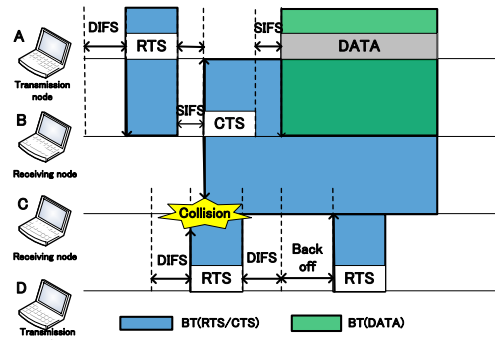


図 4. 既存ビジートーンによる課題の解決

も MAC フレーム本体部分が $3\mu s$ 程度で送信されるのに対し、PLCP 部分に $26\mu s$ もの時間を要する。RTS/CTS の MAC フレーム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ため、衝突する可能性が高くなっている。

2.3 ビジートーン技術

隠れ端末問題やさらし端末問題の一部を解決できる技術として、ビジートーンを用いた技術[3-6]がある。

DBTMA（Dual Busy Tone Multiple Access）[3]では、RTS/CTS の送信時と DATA 送信時にビジートーンを送信し周辺端末を制御する。図 4 に動作を示す。RTS、CTS 送信時に同時にビジートーンを送信することにより周辺端末を制御し衝突を防いでいる。ビジートーンは単一の周波数の電波であるため、即座にビジー状態を周辺に伝えることができる。図 4 では、端末 C がビジートーンを受信し続けることによって、制御されているため図 2 における CTS と DATA の衝突を防ぐことが可能である。

しかし、既存のビジートーン技術は、通信時に発生するノイズの範囲に対してビジートーンを送信することによって、さらし端末問題を解決する手法に用いられている。RTS/CTS 方式に適用した手法においては、ビジートーンは隣接端末までしか到達しておらず、完全に隠れ端末問題を防止することはできない。

3 提案方式

本稿では、RTS/CTS や既存のビジートーン技術の課題を解決するためにストロングビジートーン(SBT)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ノードを制御することを可能とした制御信号である。各ノードは、RTS および CTS を送信する際に、SBT を同時に送信することにより、遠隔ノードが送信開始することを防止する。各ノードは SBT を検出した場合、新たな通信を開始することができない。ただし、通信を既に行っている場合は、SBT を検出してもそれを無視する。

図 5 に SBT を導入した場合の動作を示す。ノード 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。次にノード 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。これにより図 1、図 2 に示すような衝突を防ぐことができる。図 5 では、SBT による送信抑制が終了した直後にノード D が RTS 送信を行っている。ノード C は既に NAV

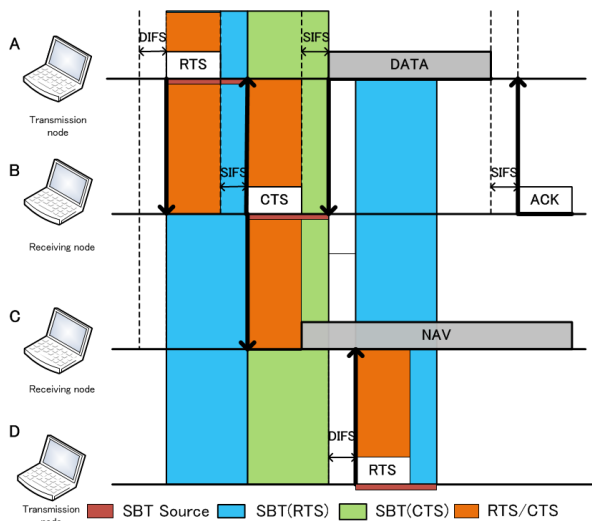


図 5. SBT の動作

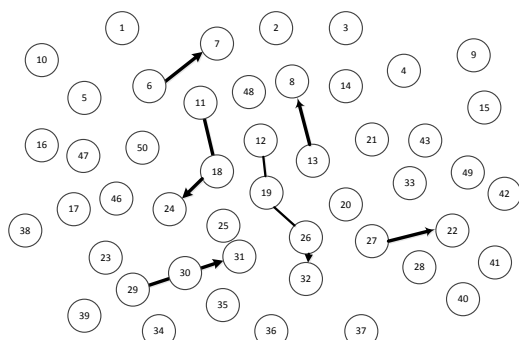


図 6. シミュレーション環境

状態に入っているため CTS を返信せず、ノード A の送信は正常に終了することができる。このときノード D の送信する SBT がノード A にも到達するがノード 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。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーション環境

提案方式の効果を ns-2 (Network Simulator2) を用いて TCP 通信のみの環境におけるネットワーク全体のスループットの変化と、UDP 通信のみの環境におけるスループットの変化を測定することにより確認した。図 6 にシミュレーション環境を、表 2 に計測環境のパラメータ、表 3 に TCP 通信と UDP 通信のパラメータを示した。図 6 に示すように 50 台のノードを不規則に配置し、一定時間ごとにランダムに選択した 2 つのノードにおいて TCP 又は UDP の通信を発生させ、各通信の合計スループットを測定した。電波到達範囲は 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 通信は通信タイプを FTP 通信とし、送信するパケットサイズは 1000Byte とした。UDP 通信は VoIP (Voice over Internet Protocol) を想定し、パケットサイズ 200Byte の CBR (Constant Bit Rate) で、パケット発生率は 64Kbps とした。

表 2. 計測環境のパラメータ

アクセス方式	IEEE802.11g
ノード数	50 台
SBT(RTS)電波到達範囲	300(m)
SBT(CTS)電波到達範囲	200(m)
フィールド	300×300(m)
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	330(s)
無線帯域	54(Mbps)

表 3. TCP/UDP のパラメータ

TCP 通信数	1~61 個
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)
UDP 通信数	1~61 個
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)
パケットサイズ発生率	64(kbps)

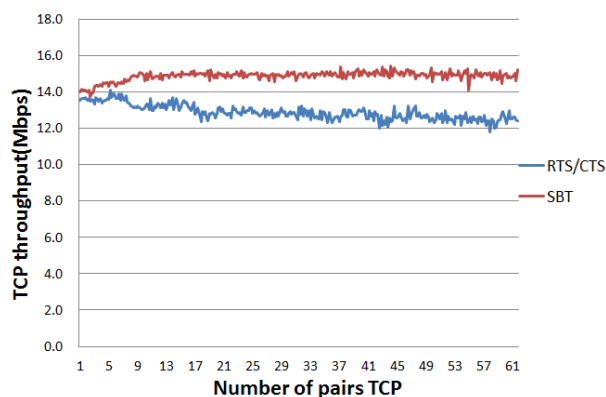


図 7. TCP 通信におけるスループットの推移

表 4. TCP 通信における衝突回数

	衝突回数
既存方式(RTS/CTS)	376,880
提案方式(SBT)	13,229

4.2 TCP 通信

図 7 に TCP 通信のスループット測定結果を示す。表 4 にこのときの衝突回数を示す。いずれも 10 回試行した結果の平均値である。図 7 の横軸は TCP 通信ペア数、縦軸は TCP 通信のスループットの合計値である。

図 7 から、既存方式のスループットは、TCP 通信の数が増加するとともに低下している。それに対し、提案方式のスループットは、常に高い値を維持し続けている。衝突回数を確認すると既存方式と比較し提案方式では約 96.5%削減されている。RTS/CTS 方式では TCP 通信が増加するにつれて衝突を防ぐことができず、再送回数が増加することによりスループットが低下していることがわかる。

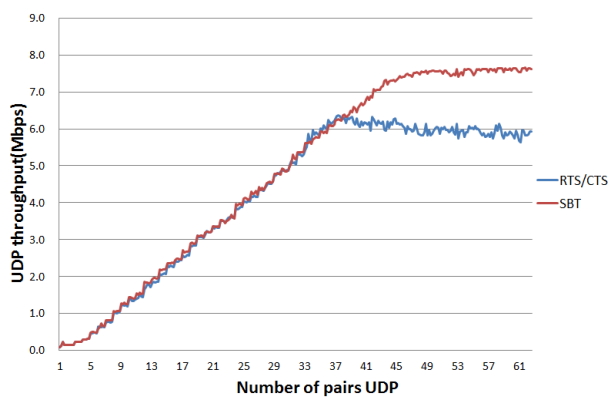


図 8. UDP 通信におけるスループットの推移

表 5. UDP 通信における衝突回数とパケットロス数

	衝突回数
既存方式(RTS/CTS)	318,149
提案方式(SBT)	9,745

SBT を用いることにより、TCP 通信が増加したとしても衝突を大幅に軽減することで、無駄な再送を防ぎスループットの低下を防止することができる。

4.3 UDP 通信

図 8 に UDP 通信のスループット測定結果を示す。表 5 にこのときの衝突回数を示す。いずれも 10 回試行した結果の平均値である。図 8 の横軸は UDP 通信ペア数、縦軸は UDP 通信のスループットの合計値である。図 8 から、既存方式では、37 対目の UDP 通信が発生した後は、通信が飽和してしまい、その後は UDP 通信の増加と共にスループットの値が低下していく。提案方式を用いた場合では、通信が飽和しにくくなっており、スループットの値が増加し続けていることがわかる。また、衝突回数を確認すると既存方式と比較し提案方式では約 96.9%削減されている。

シミュレーションの結果から、提案方式を用いることで TCP, UDP の各通信プロトコルのどちらにおいても衝突を大幅に減少し、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った。

また、端末を定期的に配置したシミュレーション[11]と端末を不規則に配置しシミュレーションを行うことで、提案方式がどのような端末の配置状況においても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った。

5 まとめ

RTS/CTS 方式における課題を解決するために、SBT を導入することによって大幅に衝突回数を軽減し、スループットを向上させる方式を提案した。SBT の導入により、TCP, UDP 両プロトコルにおいてパケット衝突の軽減及びスループットの向上することが可能である。また、不規則な端末配置の場合においても、提案方式のスループットが向上しており、既存方式に比べて優れていることを示した。

参考文献

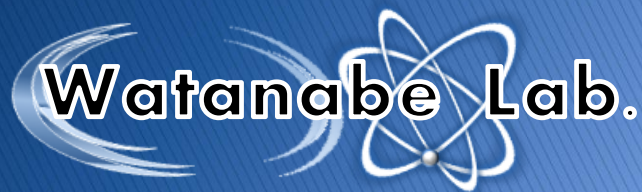
- [1] Athanasia Tsertou, David I. Laurenson: Revisiting

- 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] 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)
- [4] 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)
- [5] Supeng Leng, Liren Zhang, Yifan Chen: IEEE 802.11 MAC Protocol Enhanced by Busy Tones, Communications, 2005. ICC 2005. IEEE International Conference on (2005)
- [6] 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 (2009)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)



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

名城大学大学院 理工学研究科
伊藤智洋, 鈴木秀和, 旭健作, 渡邊晃



研究背景

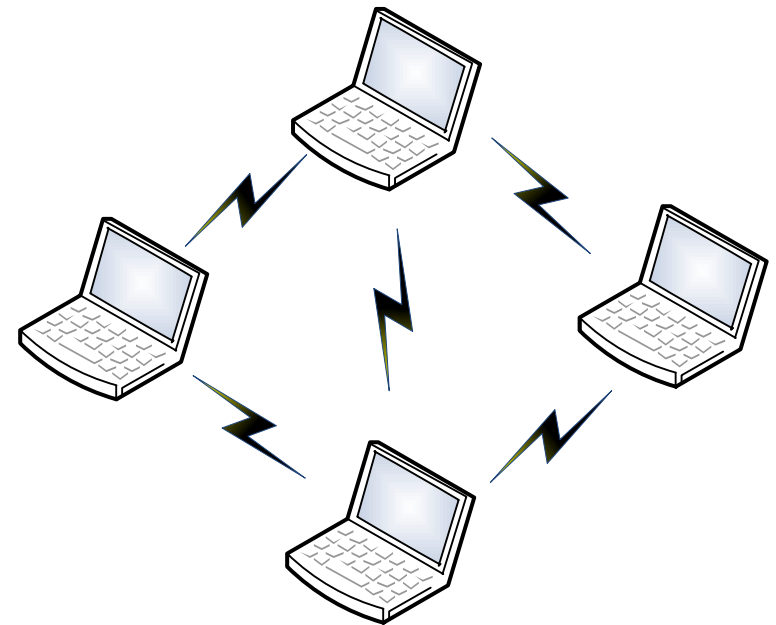
- 無線LAN技術の急速な普及
 - スマートフォン, タブレット端末の普及
 - 通信速度の向上

- 無線LAN技術の課題
 - 通信端末の増加による干渉
 - 隠れ端末問題の発生

- 無線LANの形態
 - インフラストラクチャモード
 - アドホックモード

アドホックネットワーク

- アドホックネットワーク
 - 多数の端末をアクセスポイントの介在なく相互に接続する形態を取っている
 - アドホックモードにルーティングプロトコルを追加した方式

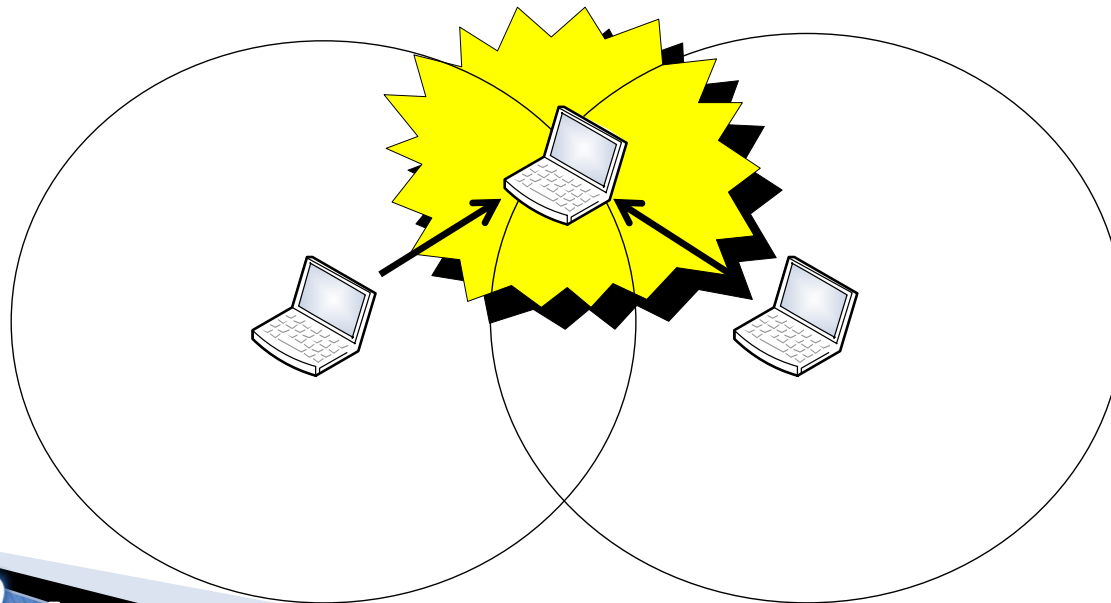


隠れ端末問題

➤ 隠れ端末問題

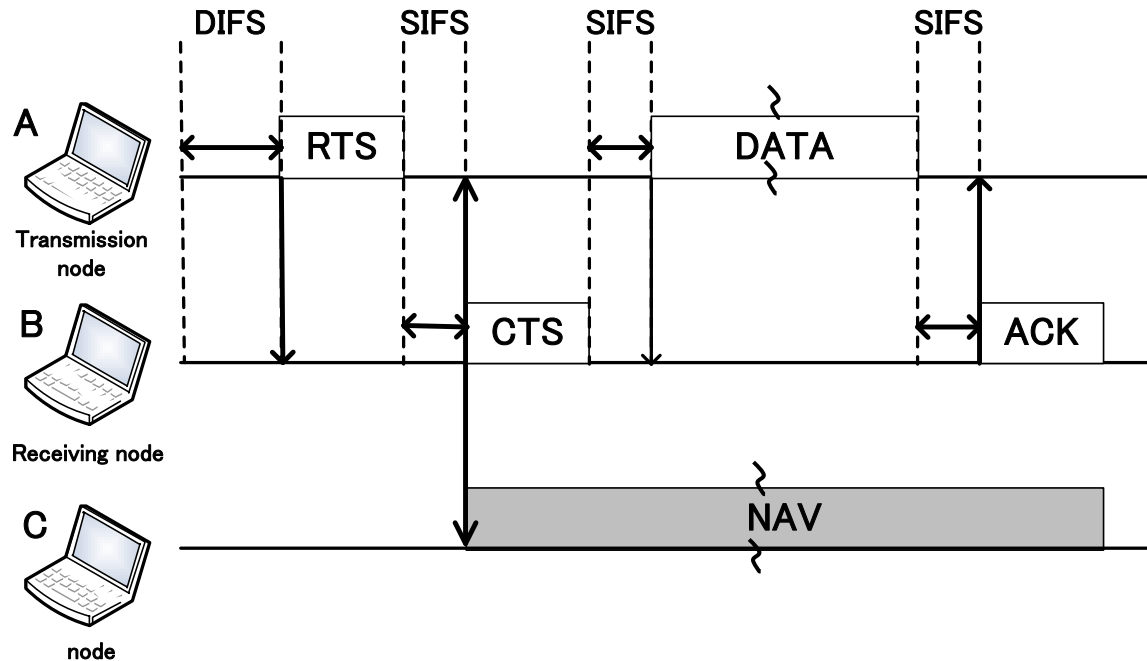
- 無線LAN環境では互いに認識していない端末の行動は分からない

⇒ 同じ対象に向け同時に通信を行う可能性がある

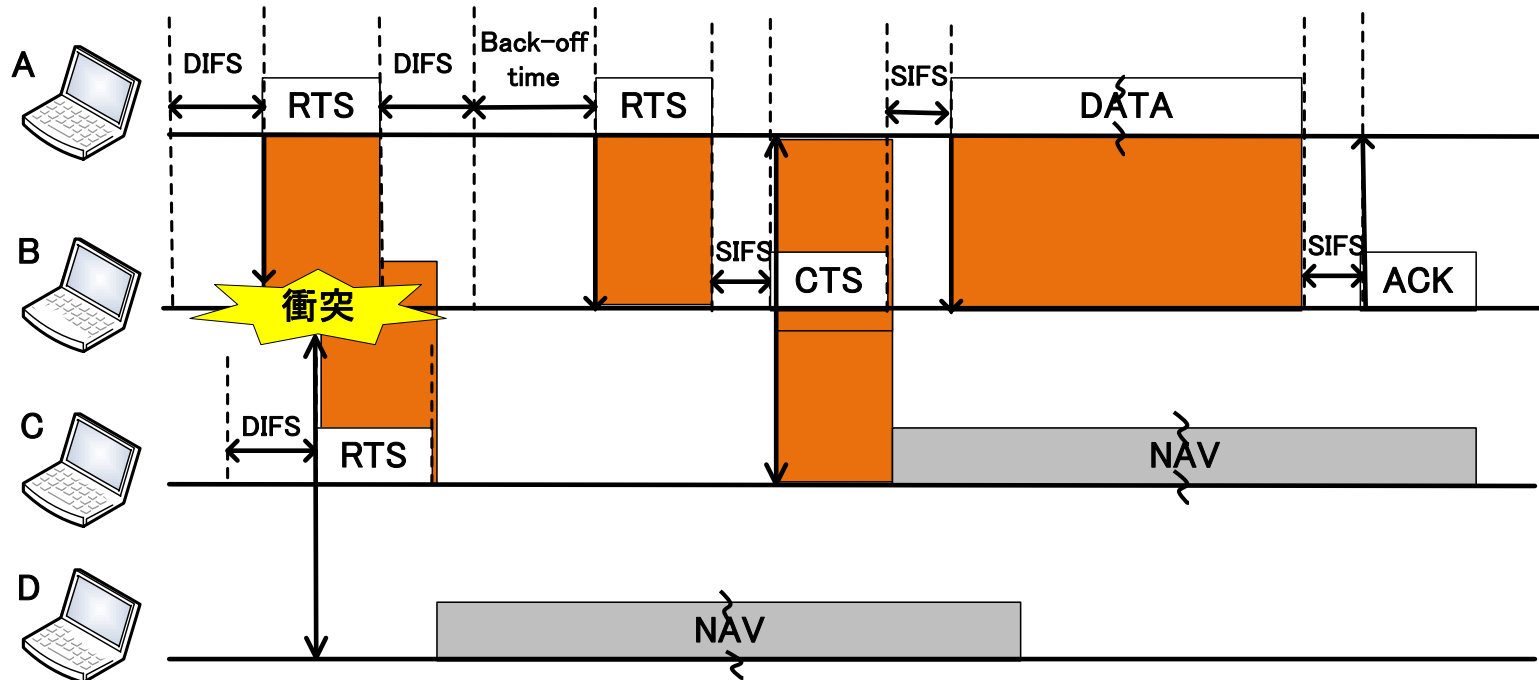


RTS/CTS方式

- IEEE802.11ではRTS/CTS方式による送信予約によって隠れ端末問題を解決している
 - 送信予約: RTS(Request to Send)
 - 予約完了: CTS(Clear to Send)

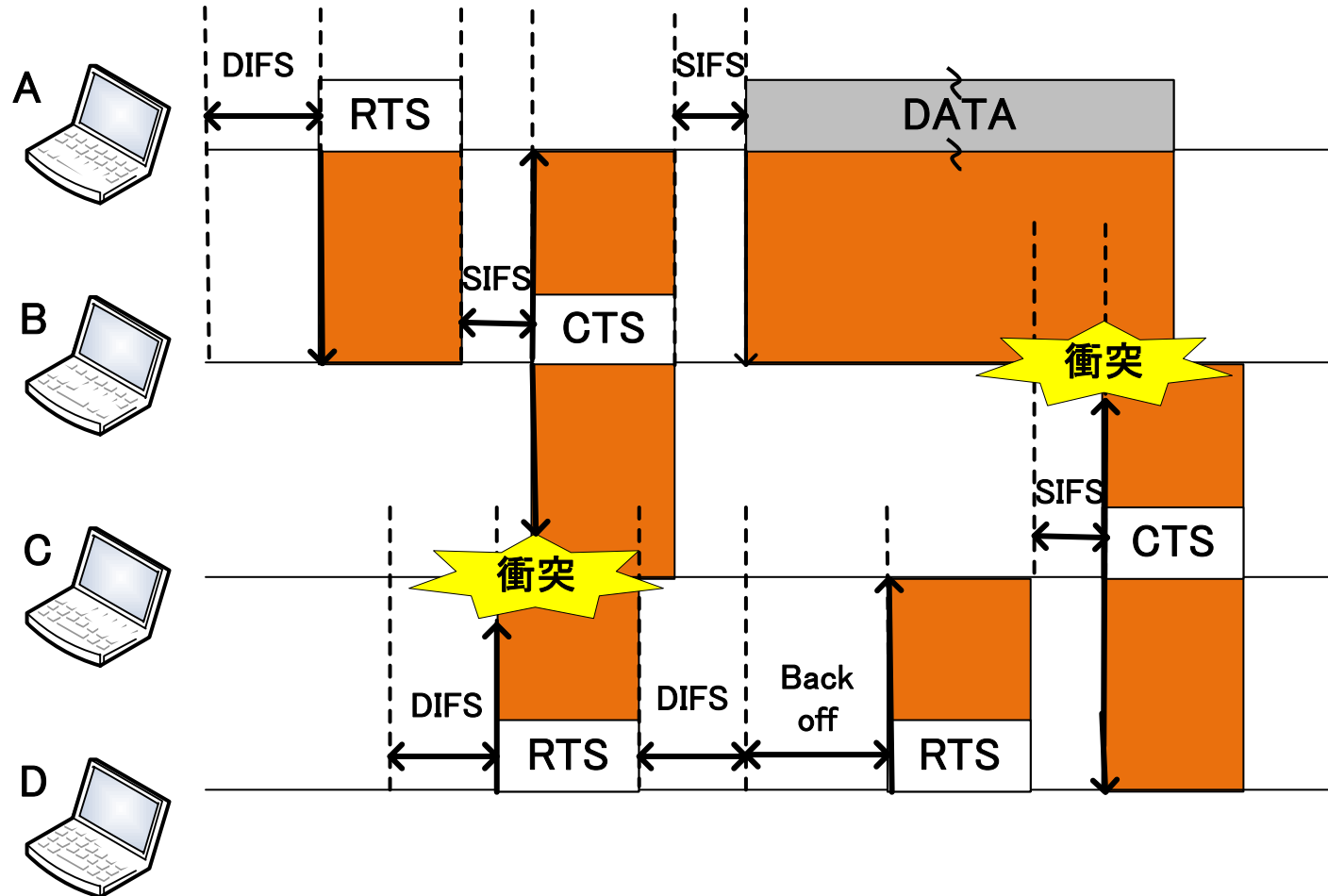


RTS/CTS方式の課題



- 同時に送信を開始すると衝突が発生
- 端末Dに無駄な待機時間が発生(さらし端末問題)

RTS/CTS方式の課題

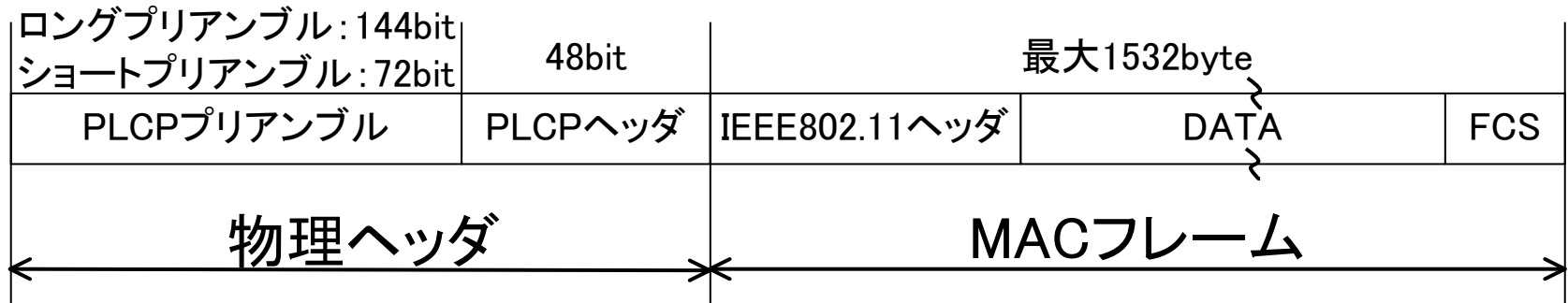


- 遠隔の端末は制御できない

RTS/CTSの課題

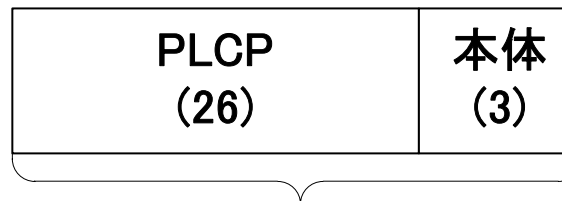
- RTS/CTS自体がパケットであるため制御に時間がかかる
- RTS/CTSでは隣接端末しか制御できない
- RTS, CTS同士で衝突が発生する

PLCP



➤ PLCP

- 受信信号の同期や伝送速度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
- 全ての端末が受信できるよう最低速度で送信される



RTS 単位(μ s)

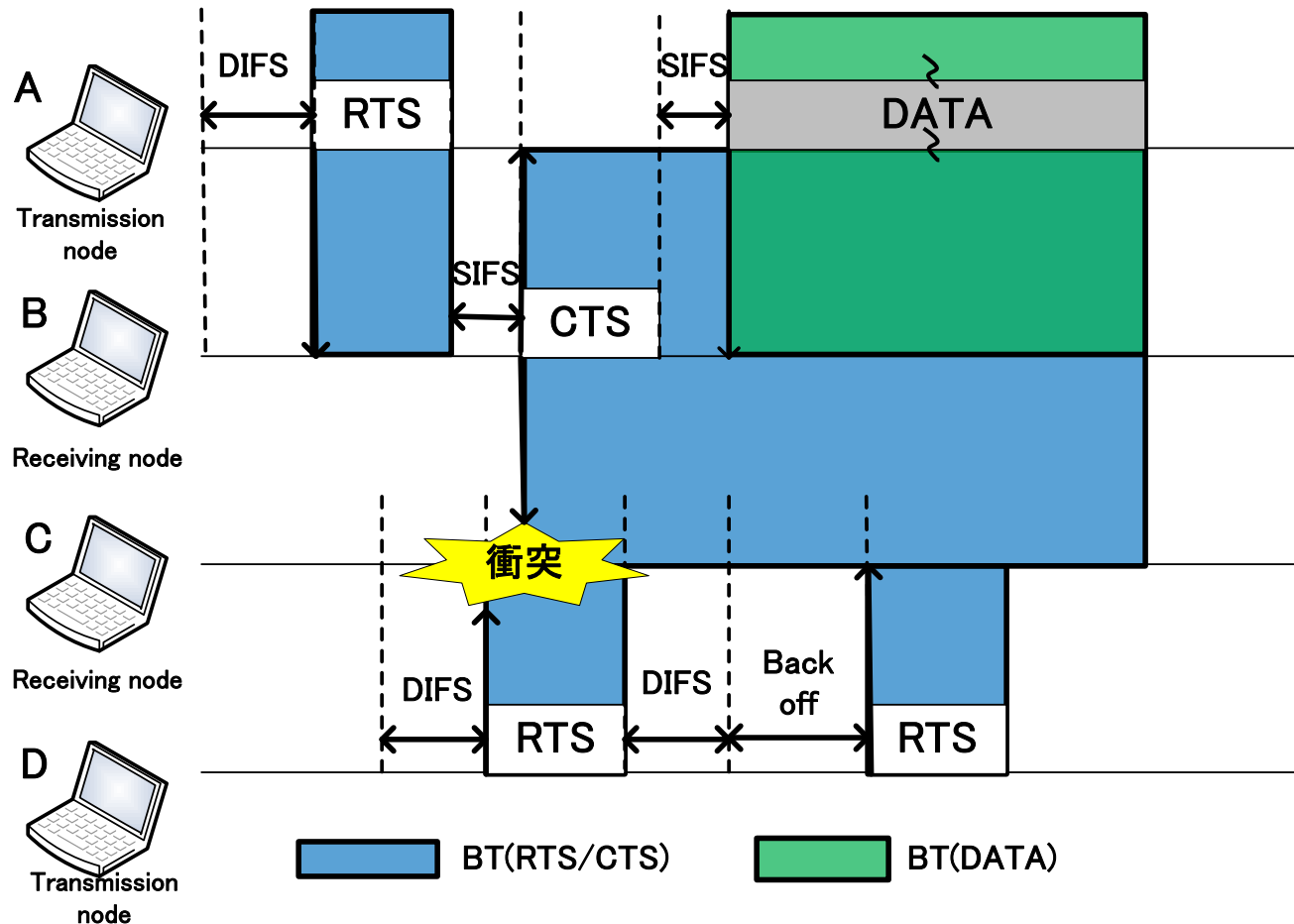
ビジートーン

- 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
 - 単一の周波数の電波
 - 小さな送信電力でも広範囲に受信可能⇒電力消費が小さい

- データを含まないため瞬時に制御可能
 - パケットでないため送信遅延が無い

- さらに端末問題を解決する手法として提案される

ビジートーンの動作

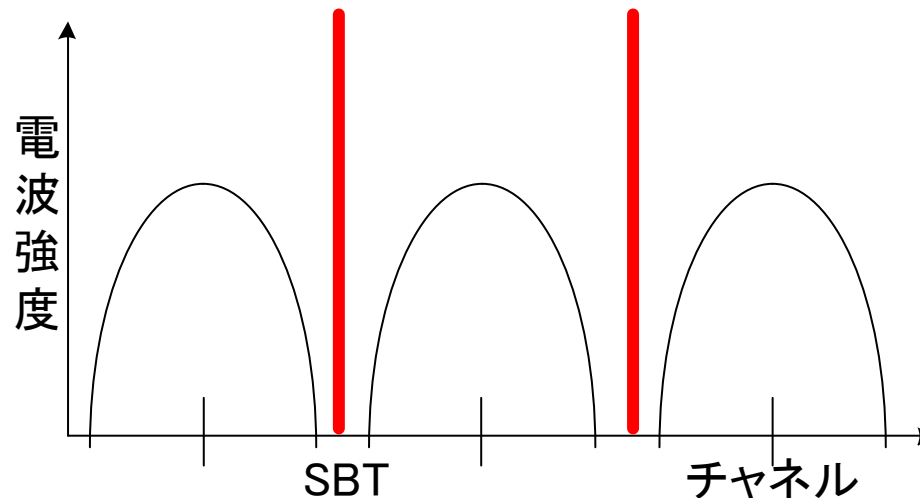


- 既存技術では隣接端末までしか制御できない

提案方式(SBT)

➤ SBT(Strong Busy Tone)

- ビジートンの電波到達範囲を拡大させ広範囲の端末を制御する
 - 遠隔の端末を制御可能
 - 隠れ端末問題, さらに端末問題の双方を防止

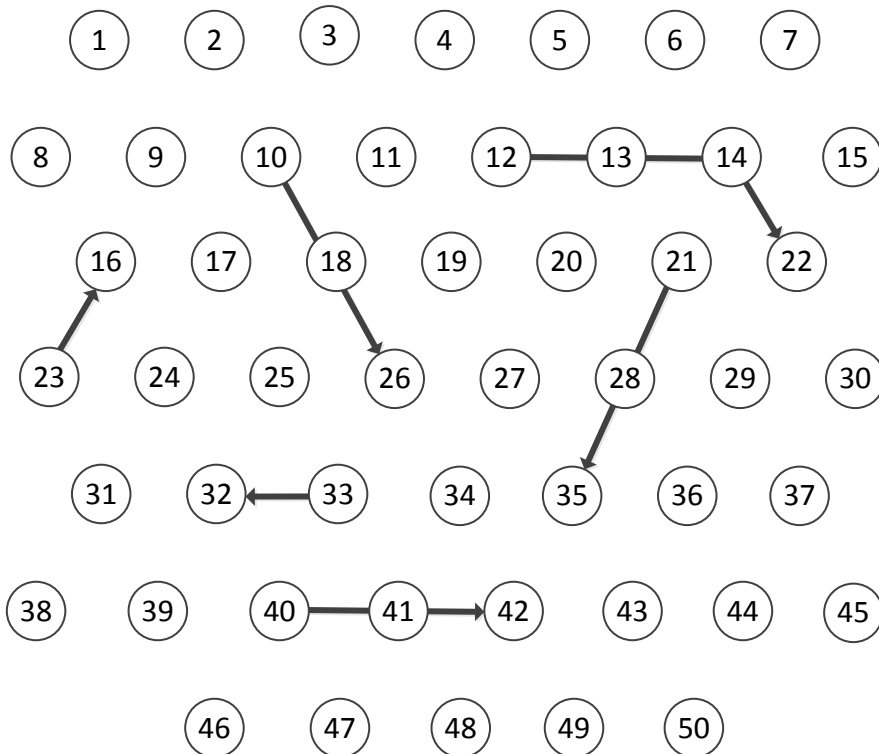




ns-2によるシミュレーション

- 提案方式の効果測定
 - シミュレーション全体のスループットの変化
 - 衝突防止効果
 - TCP, UDPの各プロトコルごとの効果測定
 - 配置設定変更による変化の測定

均等配置時の環境



試行回数	10回
台数	50台
端末間距離	90(m)
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)
計測時間	330(s)
通信形態	802.11g
無線帯域	54(Mbps)

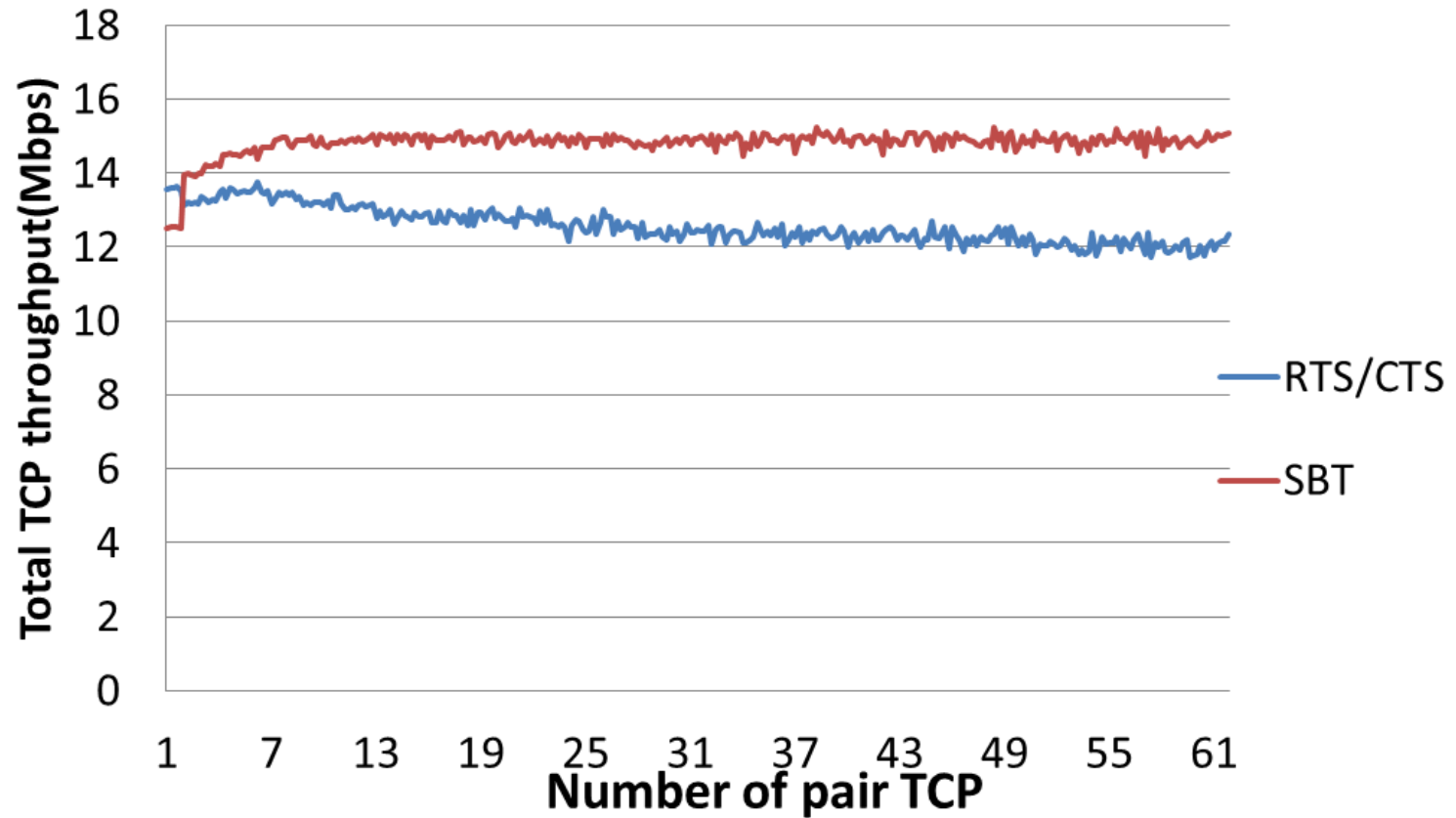
均等配置時の環境

トランスポートプロトコル	TCP
パケットサイズ	1000(byte)
TCP通信数	1~60対

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	64(kbps)
UDP通信数	1~60対

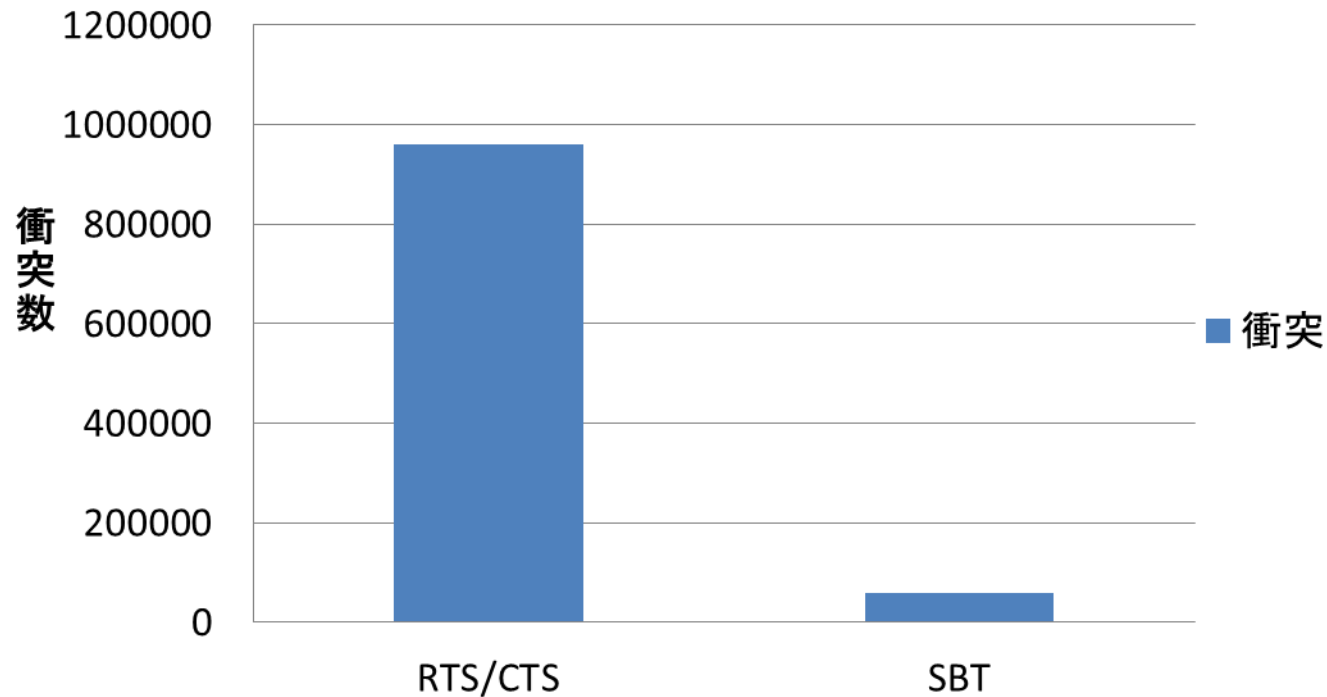
- UDP通信はVoIPを想定
- 単位時間ごとに通信を増加

均等配置時の結果(TCP)



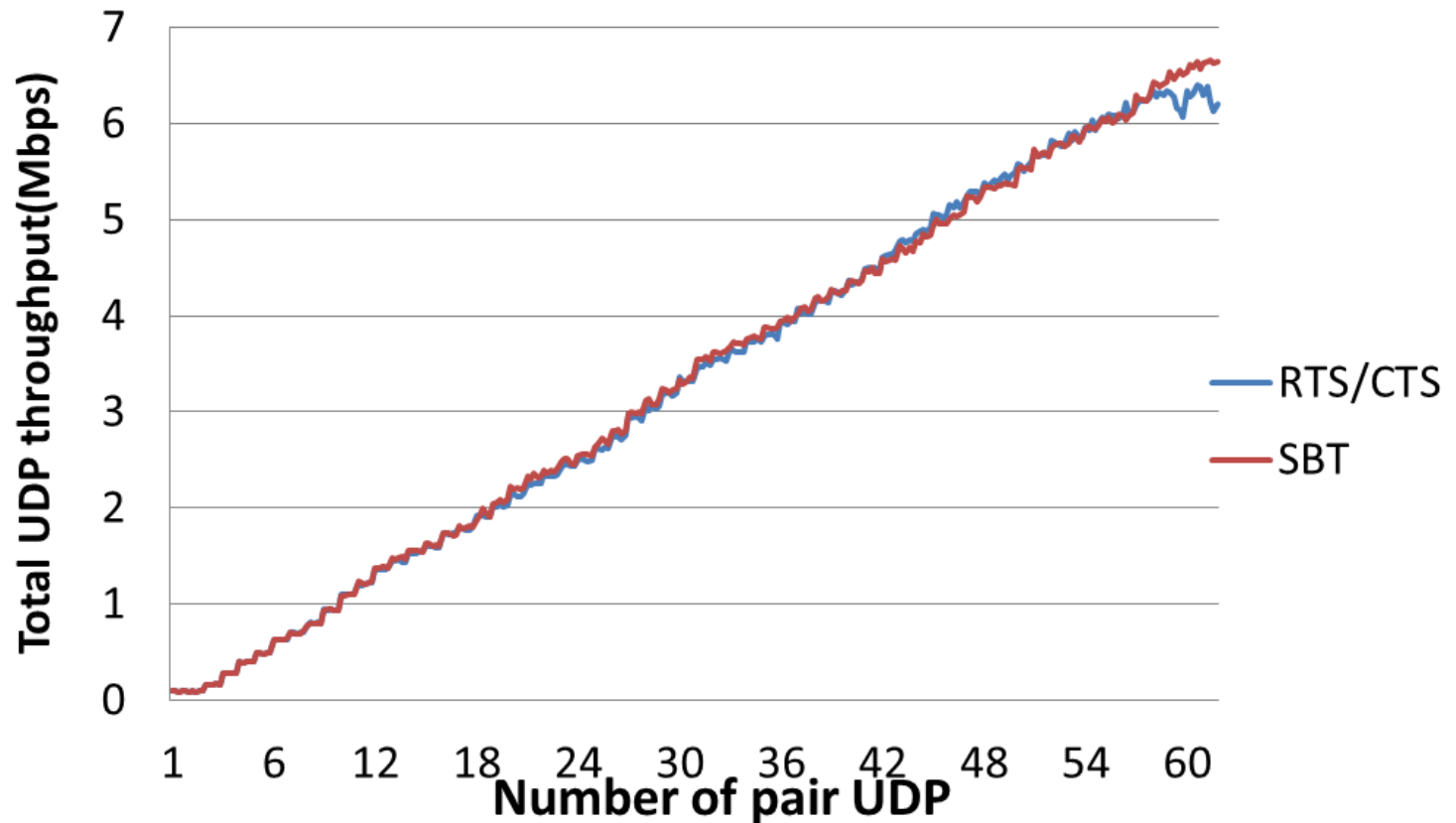
▶ 端末増加時にスループットの低下を防止

均等配置時の結果(TCP)



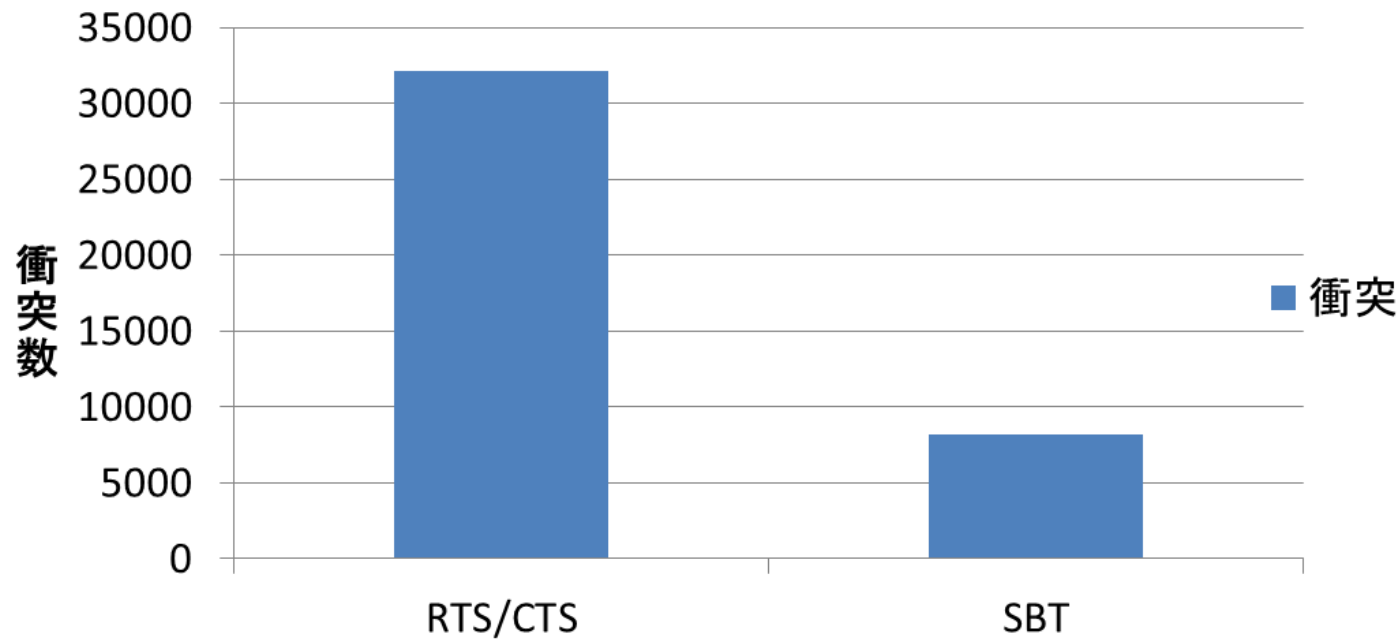
- ▶ 既存方式と比較し衝突を約94%削減

均等配置時の結果(UDP)



- ▶ 通信数が増加した状態でもスループットが低下しない

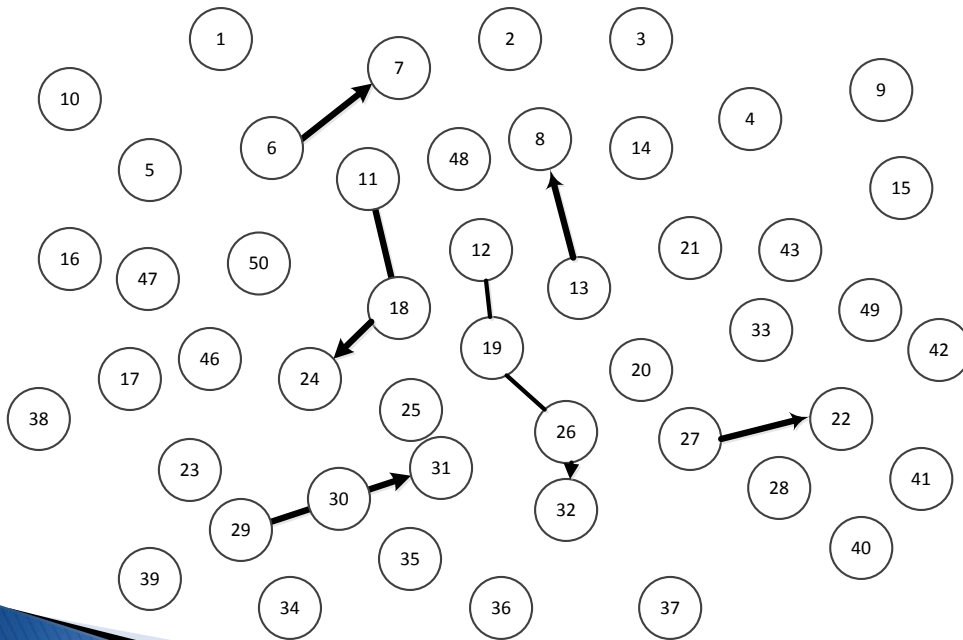
均等配置時の結果(UDP)



- 提案方式を用いることで衝突を74%削減

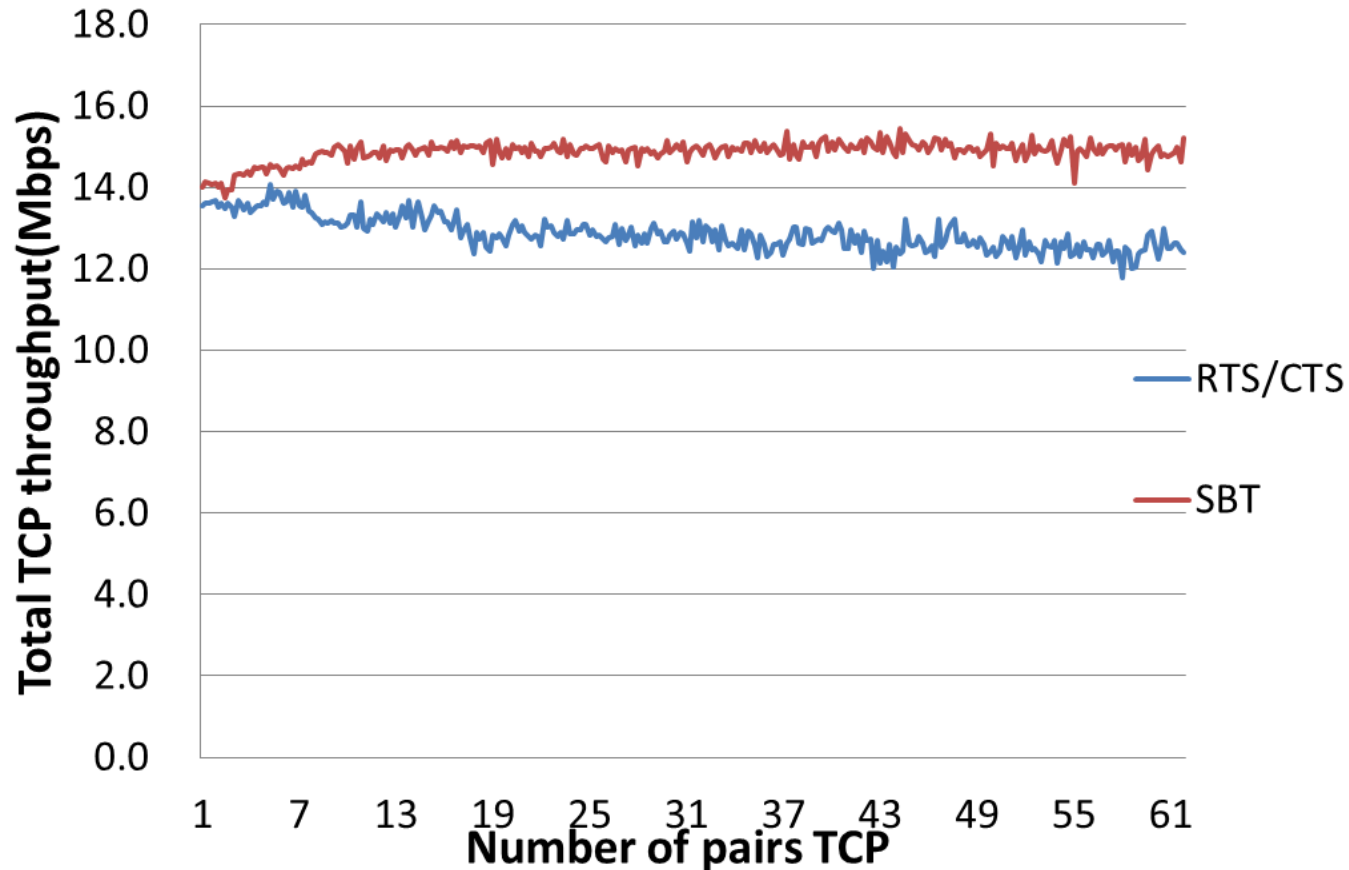
ランダム配置時の環境

- TCP又はUDPのみの通信による測定
 - 全ての端末配置を選択範囲からランダムに選択し配置



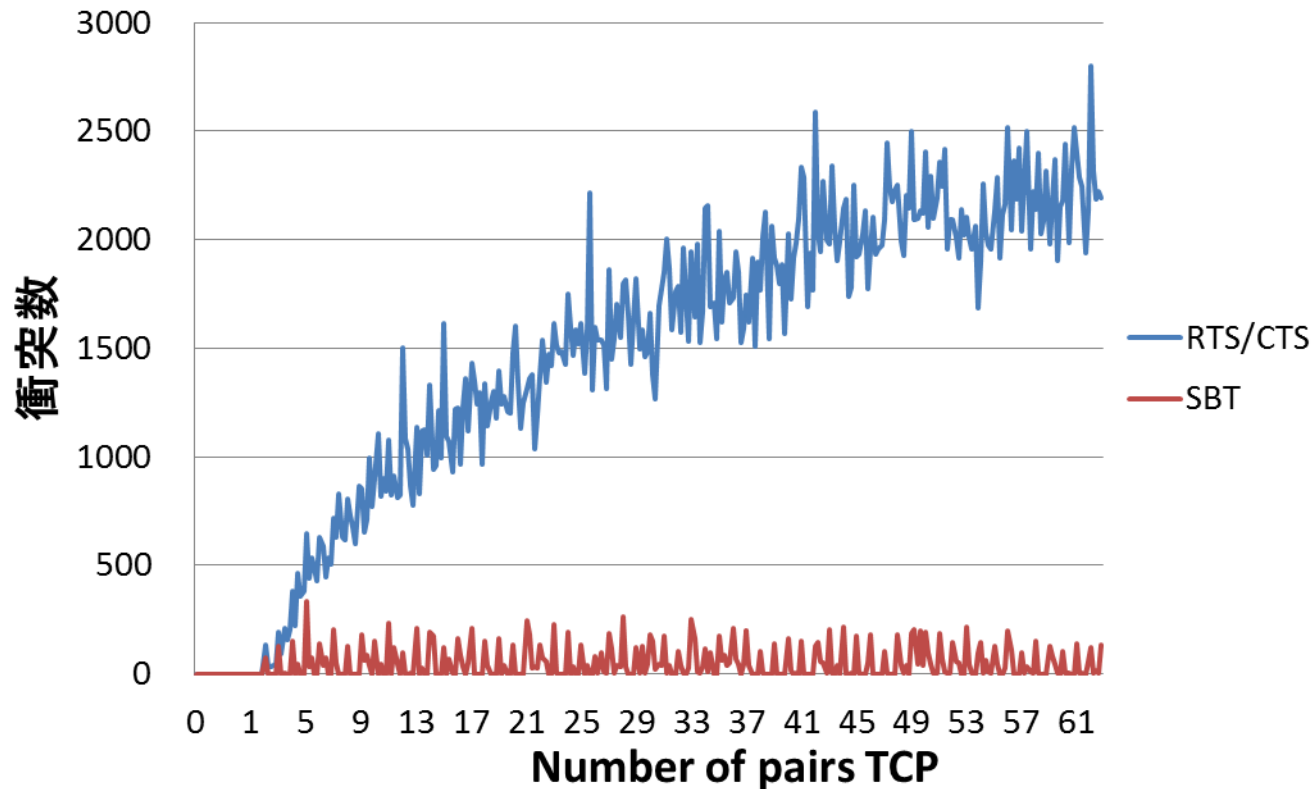
試行回数	20回
TCP通信数	1～60対
UDP通信数	1～60対
フィールド	300×300(m)
台数	50台

ランダム配置時の結果(TCP)



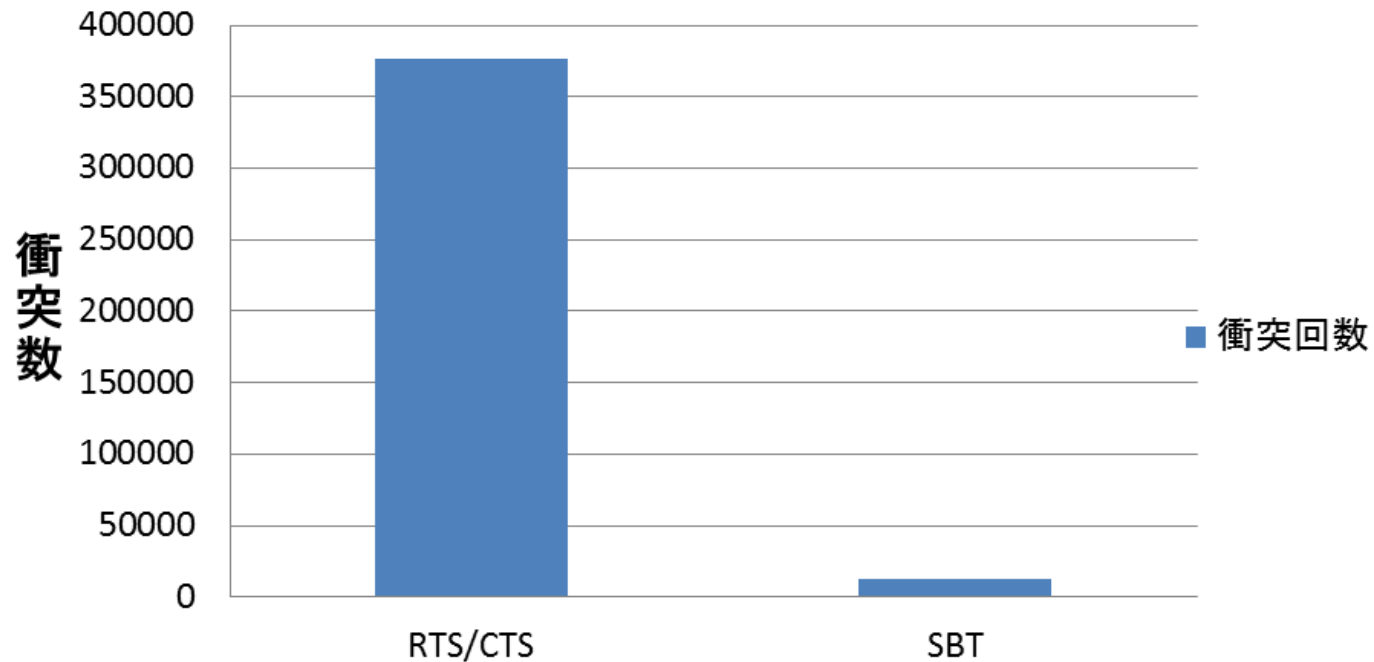
- 提案方式を用いることでスループットの低下を防止

ランダム配置時の結果(TCP)



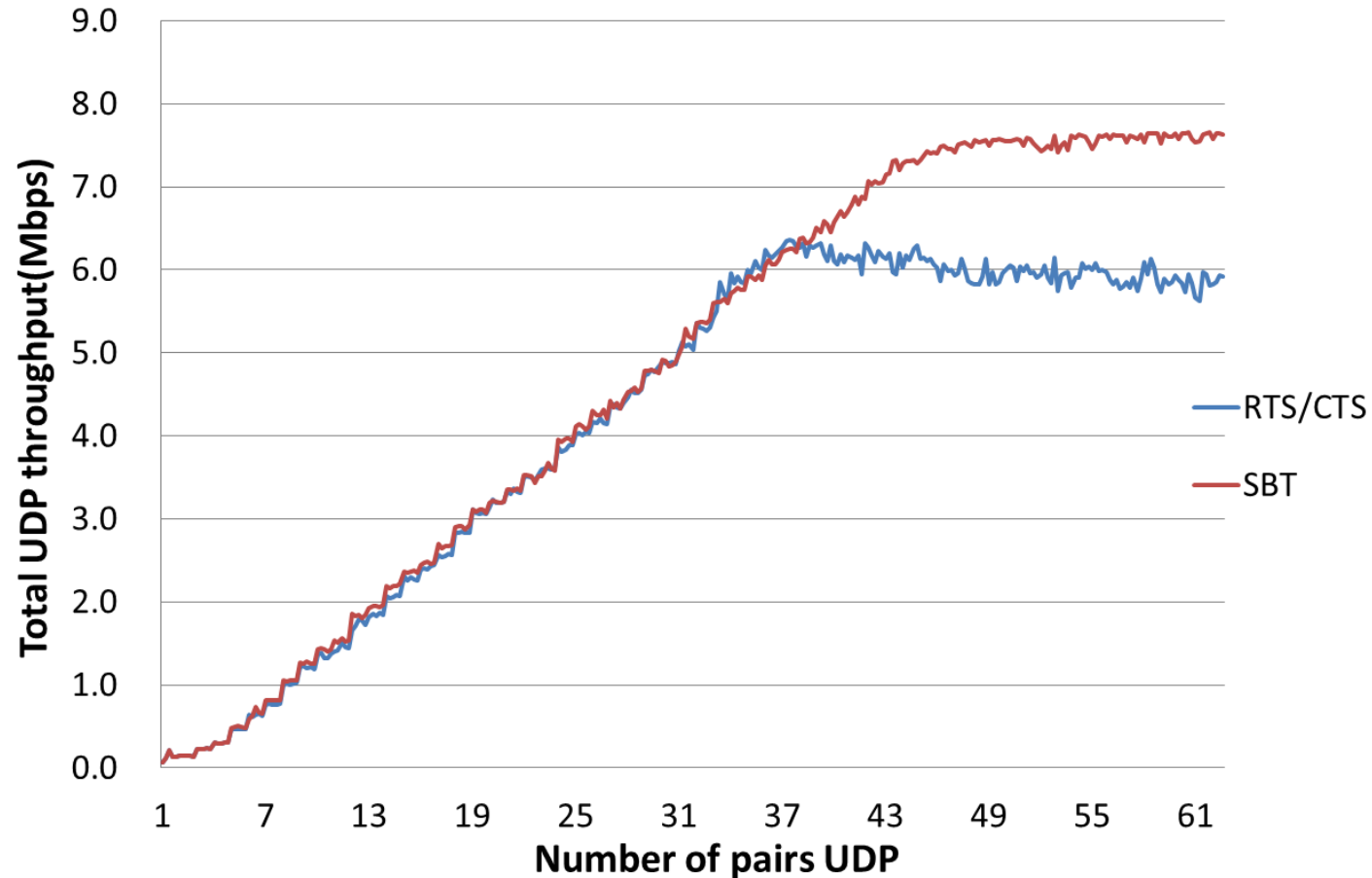
- 衝突を大幅に削減し再送を防止
 - ウィンドウサイズの縮小を防ぎスループットの低下を防止

ランダム配置時の結果(TCP)



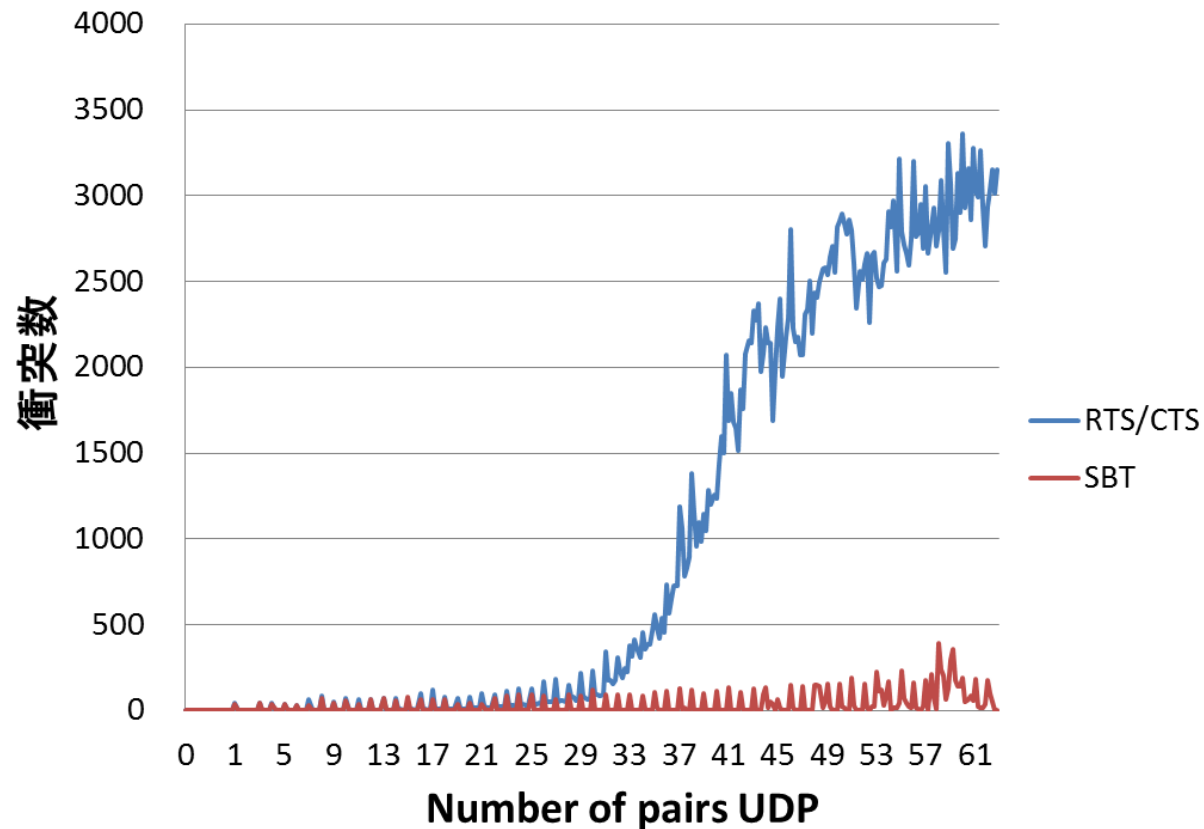
- 既存方式と比較し96.5%削減

ランダム配置時の結果(UDP)



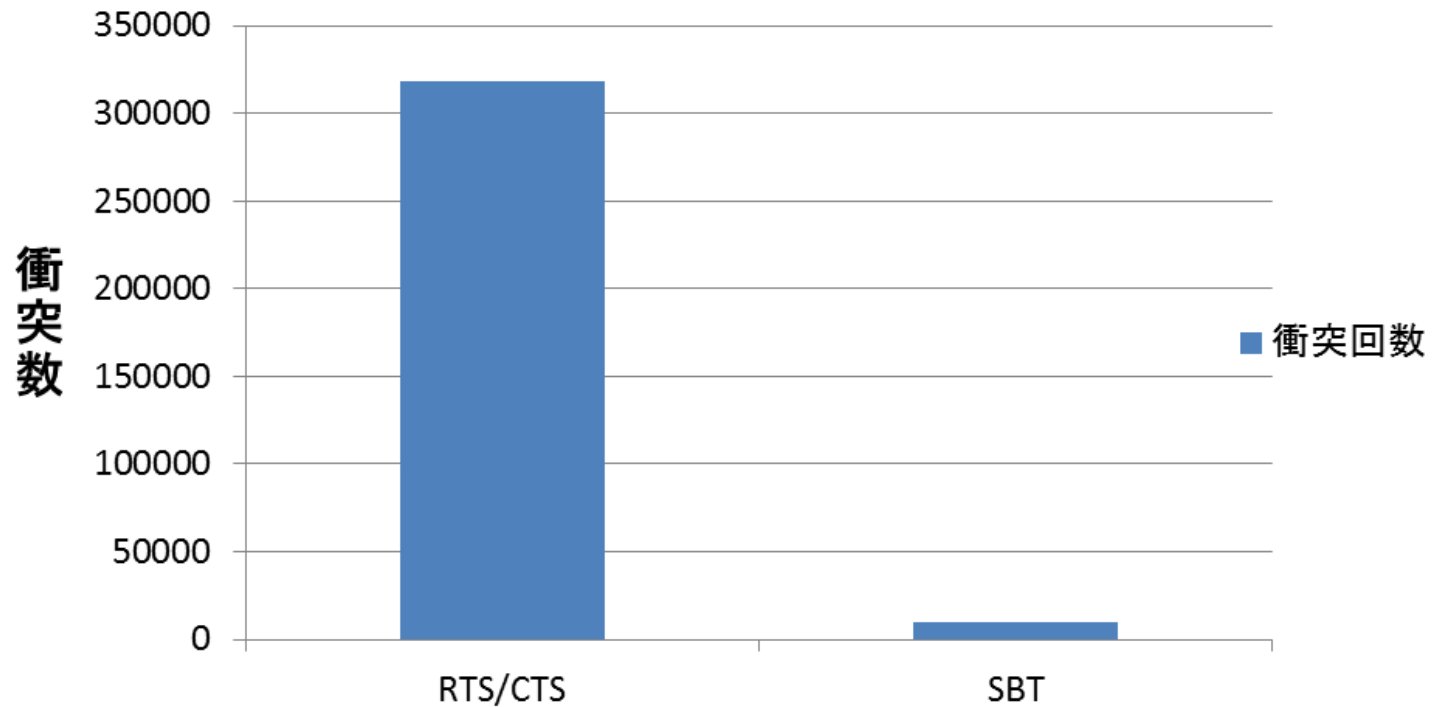
- 通信の増加に伴う飽和を抑制
- ネットワークの限界が向上

ランダム配置時の結果(UDP)



- 通信が増加しても衝突を防止
 - 衝突によるパケットロスを大幅に削減

ランダム配置時の結果(UDP)



- 既存方式と比較し96.9%削減

シミュレーション結果

- 各プロトコルにおいて効果を確認
 - スループットの向上
 - 衝突の大幅な削減

- TCP通信における効果
 - 衝突防止によるウィンドウサイズ縮小の抑制
 - 通信増加時のスループット低下防止

- UDP通信における効果
 - ネットワーク全体の通信能力の向上
 - 衝突防止による通信精度の向上

シミュレーション結果

- 様々な配置において効果を発揮
 - 均等配置
 - ランダム配置



ネットワークの効率の向上が可能

むすび

- アドホックネットワークにおいて、衝突を大幅に削減し、スループットを向上させる方式を提案した
- 提案方式の有用性の証明
 - 衝突回数の軽減
 - スループットの向上
- 今後の課題
 - SBTによる通信制御方式の応用

補足

キャリアセンス

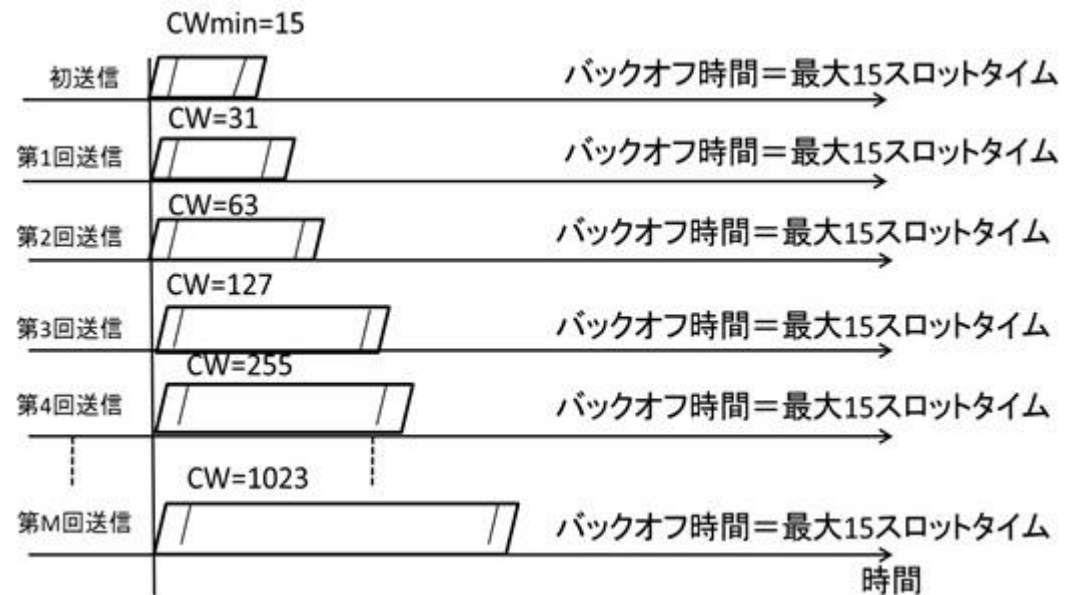
- 各端末は通信開始時にキャリアセンスを行う
⇒ 一定以上の電波を検知した場合通信を控える
- キャリアセンスにおいてビジートーンを検知する
⇒ 受信に関して端末の改造は不要

バックオフアルゴリズム

- バックオフアルゴリズムにおいて、乱数は以下の様に $CWmin$ から始まり $CWmax$ になるまで

$$(CWmin + 1) \times 2^n - 1$$

上記の式の指数関数で CW の範囲内からランダムに選択される。

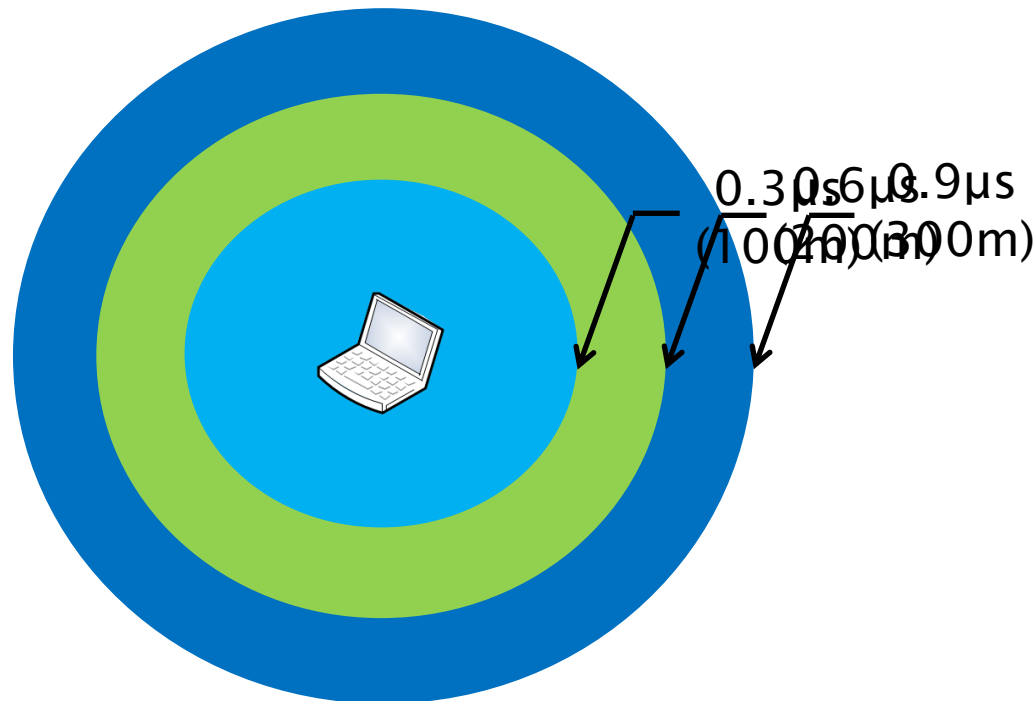


ガードバンド

- SBTは通常の周波数帯ではなくガードバンドを使用
- ガードバンドとは
 - 2つの通信チャネルの間にある未使用周波数帯
 - ⇒ 11b/gは周波数帯が被っており双方の未使用周波数帯を確認する必要がある
 - ⇒ 11aでは周波数帯が整備されているので問題はない

SBTの到達速度

- SBTは速度は c (光速)なので100m(通常の通信範囲)先の端末への到達速度は約 $0.3\mu\text{s}$
→ 3ホップ先の端末への到達速度は約 $0.9\mu\text{s}$ である



各シーケンスの時間

- RTS/CTS方式を用いた際の各シーケンスにおける時間

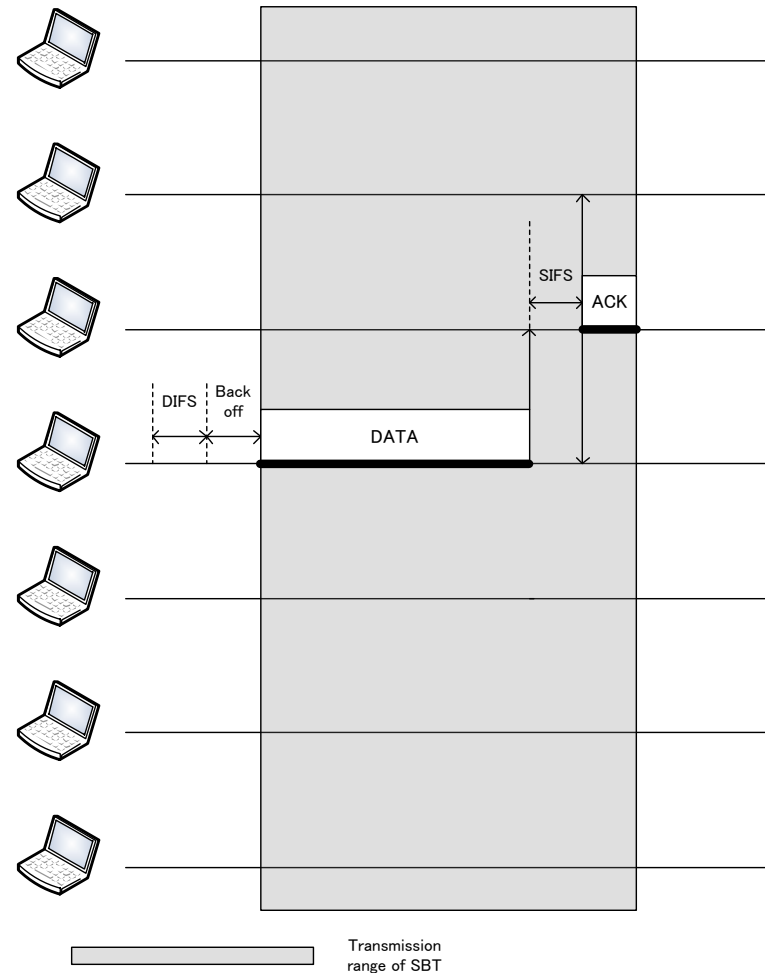
DIFS		34
Back-off		135~9207
RTS	PLCP 本体	26 3
SIFS		10
CTS	PLCP 本体	26 3
DATA	PLCP 本体	26 227
ACK	PLCP 本体	26 3

SBTについて

- ▶ SBTの受信はキャリアセンス時に電波を受信するものと同様
- ▶ SBTを受信した場合は通常の待機と同様
⇒ DIFS + バックオフ時間
- ▶ NAVが発生している訳ではない

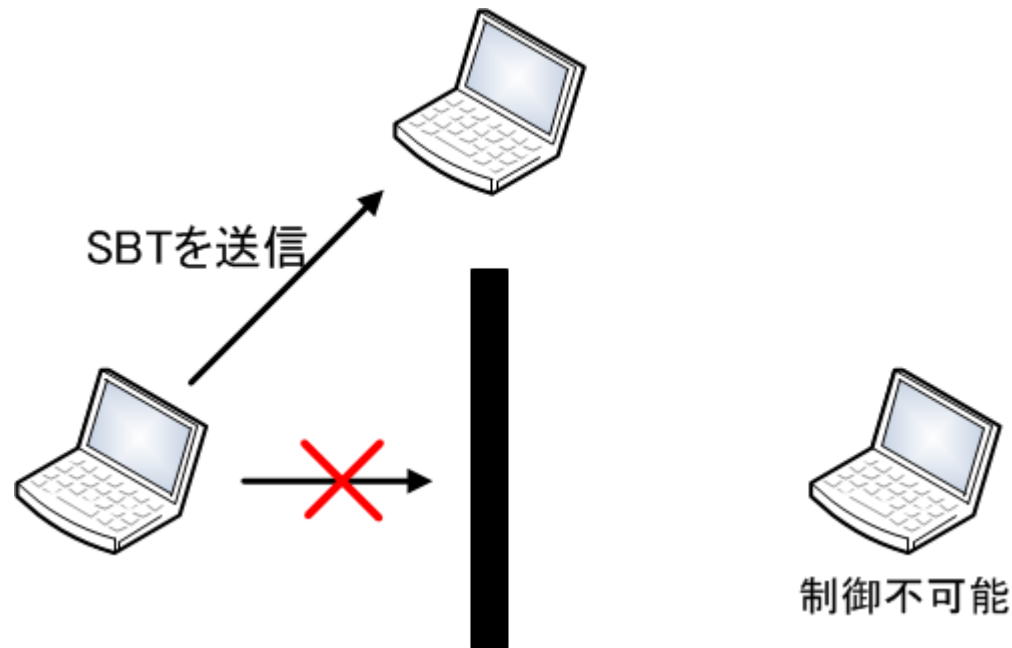
SBTの拡張性

- RTS/CTSをなくす
- DATA部分にSBTを適用



SBT拡張時の課題

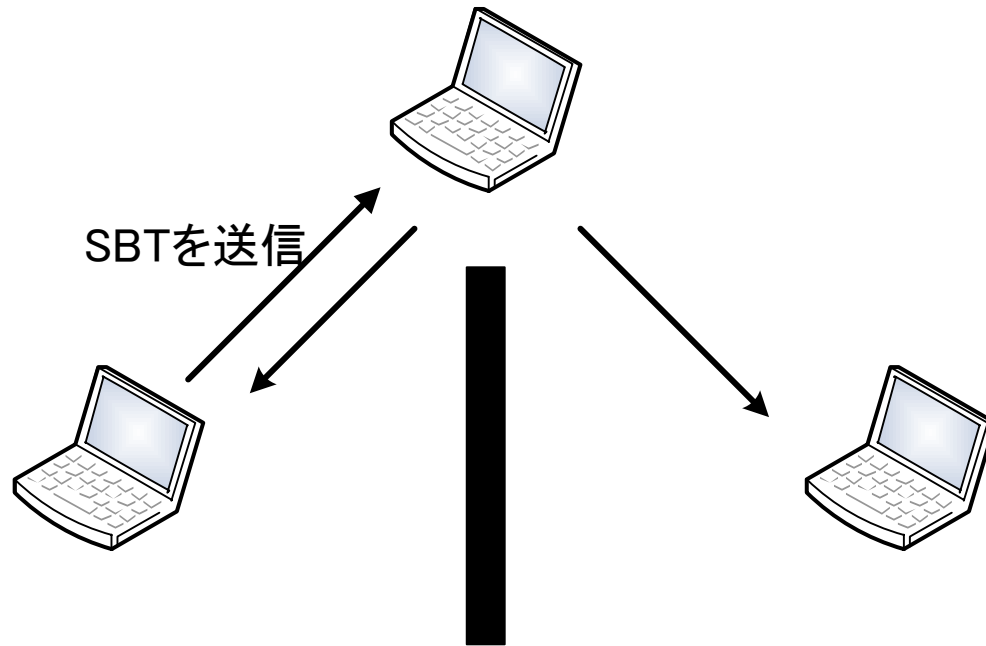
- ▶ 障害物が存在する場合SBTが端末に到達しない
- ▶ RTS/CTSがないため障害物を回避できない



課題の解決手法

- ▶ 受信ノード側でもSBTを送信する
- ▶ 障害物を迂回する手法

DATA部分受信と同時に
SBTを隣接端末に向け送信



SBTによる通信妨害

- ▶ SBT送信端末がSBTを送信し続ける
 - 通信妨害となる
- ▶ SBTは逆位相の信号を送信すれば消滅する
- ▶ 通信妨害で電波法に抵触する
- ▶ SBTを送信し続けることは電力的にも厳しい