Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

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[1]　旭 健作[1]　鈴木 秀和[1]　渡邊 晃[1]

概要：無線通信において，隠れ端末問題による衝突はスループットの大幅な低下に繋がることが知られている．我々はこれまで Strong Busy Tone（以下 SBT）と呼ぶ制御信号を RTS/CTS に付加して周辺端末の送信を制御する方式（SBT-RC）を提案し，効果があることを示してきた．本稿では RTS/CTS を用いずデータパケット自体に SBT を付加する方式を提案し，そのシミュレーション結果を示す．

キーワード：無線 LAN，ビジートーン，CSMA/CA

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 [1] 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．

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）による方式が採用されている．RTS/CTS を用いることにより，周辺端末を制御し衝突を軽減することができる．しかし，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し，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．

我々は，ビジートーンの技術 [3]~[9] に着目し，ストロングビジートーン（以下 SBT: Strong Busy Tone）[10] ~ [12] と呼ぶ制御信号を用いて，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してきた．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わたって制御することができる．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．SBT は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 RTS/CTS の課題を克服することができる．

SBT を用いることにより，バックオフの待機時間を演算する際に用いられるスロットタイム（以下 Δt）の値を短縮することができる．Δt の値を短縮することにより，送信待機時間が減少し，スループットがさらに向上することを確認している．

しかし，これまで提案してきた方式（以下 SBT-RC と呼ぶ）は，RTS/CTS の交換に要する時間が大きなオーバヘッドとなっている．そのため，衝突を大幅に防止したにもかかわらず，スループットの向上が期待したほど大きくない．

本稿では SBT を用いた新しいアプローチとして，RTS/CTS を用いずに，DATA パケットと同時に SBT を送信する方式（以下 SBT-D と呼ぶ）を提案する．SBT-D は SBT-RC の課題であった RTS/CTS の交換によるオーバーヘッドを無くすことができ，スループットを大幅に向上させることができる．

SBT-D はデータ送信中に広範囲に渡って周辺端末の送信を抑えることになるため，システムとしてのスループットを下げる要因にもなりえる．そこで ns-2（Network Simulater2）を用いてシミュレーション評価を行い，既存の RTS/CTS を用いた方式や SBT-RC と比較した．その結果，SBT-D は大幅にスループットを向上できることがわかった．

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．

[1] 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

2. 既存技術とその課題

2.1 RTS/CTS による方式の課題

RTS/CTS による方式の課題は，RTS/CTS 自体がパケット交換を用いた送信予約であるため周辺端末の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に伴い，RTS 同士の衝突や CTS と DATA の衝突などを起こしてしまう．衝突の発生により RTS の再送が必要であったり，長データを無駄に送信してしまいスループットが大幅に低下してしまう．また，通信が失敗しているにも関わらず周辺端末が制御された状態のままになり無駄な待機時間が発生するさらし端末問題が発生し，ネットワーク全体の通信性能の低下に繋がっている．

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 PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) のオーバーヘッドが挙げられる．PLCP は，無線でパケットを送信する際に必須となる物理ヘッダで，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定義されている．PLCP のサイズ自体はそれほど大きくない．しかし，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 における一連のシーケンスの所要時間を示す．表 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 3μs 程度であるのに対し，PLCP 部分に 26μs 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．

2.3 SBT-RC

我々はこれまで RTS/CTS に SBT を付加することにより RTS 同士，CTS と DATA との衝突を大幅に削減する SBT-RC を提案してきた．

SBT-RC の動作を図 1 に示す．この動作は端末 A が端末 B に対して送信を行う状態を示している．端末 A は RTS の送信と同時に 3 ホップ先に到達するように SBT を 3 倍に拡大して送信する．その後，端末 B は CTS を返信する際に，2 ホップ先に到達するように SBT を 2 倍に拡大して送信を行う．RTS，CTS を送信する際に拡大して SBT を送信することにより，従来の RTS/CTS では制御に時間がかかっていた端末を瞬時に制御することが可能となる．これにより，RTS/CTS がパケット通信であるがゆえに制御に時間を要するという課題を解決し，隠れ端末問題やさらし端末問題を大幅に防止することが可能となる．

図 1 では，SBT による制御が終了した後に端末 D が RTS の送信を行っている．この場合，端末 C は既に RTS/CTS により制御されており NAV 状態に移行しているため返信を行うことはない．また，端末 D が送信する SBT が端末 A，B に到達しているが，通信中である場合は SBT を無視して通信を続行し，正常に終了する．

表 1 各シーケンスに要する時間
Table 1 Time of each sequence.

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

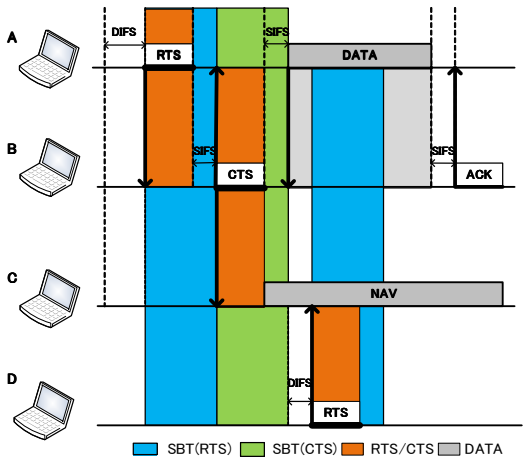


図 1 SBT-RC による課題の解決
Fig. 1 To solve these issues with SBT-RC.

2.4 Δt の短縮

SBT を導入することによりスロットタイム（Δt）の短縮が可能になる．Δt を短縮することにより CSMA/CA の待機時間を減らし，スループットを向上することが可能である．CSMA/CA における再送時のバックオフ時間は以下の式によって決定される．

$$\text{Back off Time} = \Delta t \times r(\text{CW})$$

ここで Δt はスロットタイム，r は 0∼CW の乱数，CW はコンテンションウィンドウサイズである．Δt は待機時間

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

を計算する際に必要な時間の最小単位で 802.11g では 9μs と定義されている．802.11g の場合，Δt の値 9μs の内訳は以下のように設定されている．

Δt=CCATime+AirPropagationTime
+RxTxTurnaroundTime+MACProcessingDelay

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

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．SBT を用いた制御方式においては，Δt として 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．

端末間距離を 100m とすると SBT が隣接ノードに届く時間は約 0.3μs 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 AirPropagationTime として定義することができる．提案方式では，この値を余裕をみて 1μs とする．従って，提案方式 Δt の値を AirPropagationTime と RxTxTurnaroundTime を合わせた 3μs まで短縮することができる．

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である．さらに，Δt の短縮を行うことによりスループットが大幅に向上することを確認している．特定の条件下では，TCP スループットが既存の RTS/CTS を用いた方式に比べ約 10 倍に向上した．しかし，2.2 節に示すように RTS/CTS の交換に要する時間がオーバーヘッドになっている．そのため，衝突の大幅な削減や Δt の短縮により待機時間を短縮した割合に対しスループットの向上の割合が低い．

3. 提案方式

提案方式では，オーバーヘッドの要因となる RTS/CTS をやめ，DATA パケットを送信する際に同時に SBT を送信する．この時，通信時に隠れ端末の関係になるものは最大で 2 ホップ先の端末である．そこで，SBT の電波到達範囲を 2 ホップ先に到達するように拡大する．この方式を以後 SBT-D と呼ぶ．

図 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

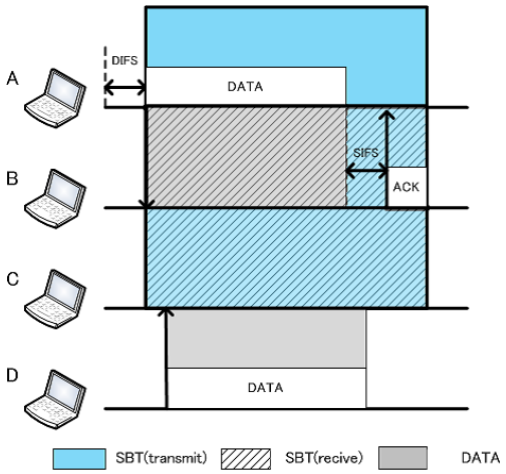


図 2　SBT-D の動作
Fig. 2　The operation of SBT-D.

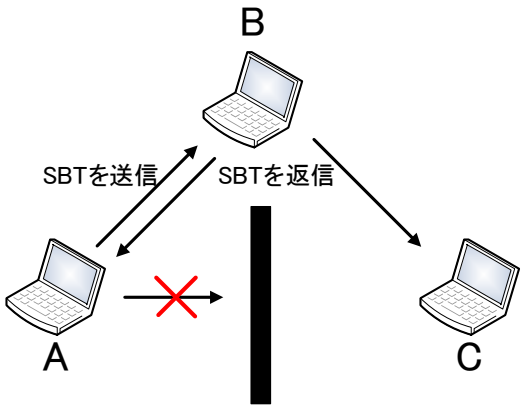


図 3　障害物の対策
Fig. 3　Measures of obstacle.

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．ただし，SBT の到達範囲は 1 ホップ分でかまわない．送信側のみ SBT を送信すると，送受信間に障害物が存在し SBT が障害物により隠れ端末を制御できない場合がある．図 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．このような対策を取ることにより，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．

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

表 2　全体のパラメータ
Table 2　Parameters for the entire.

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　端末のパラメータ
Table 3　Parameters of the terminal.

TCP 通信	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（Byte）	1000
UDP 通信	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（Byte）	200
	パケット発生率（Kbps）	64

4. 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-D 方式の効果および RTS/CTS を用いないことによる影響がどの程度のものかを検証した．

4.1 シミュレーションパラメータ

本稿では SBT の純粋な効果を測定するために Δt の値は 802.11g の規格 $9\mu s$ のまま変更することなく，以下の 3 通りの Case において比較を行った．

- Case1：RTS/CTS による既存技術の通信
- Case2：SBT-RC
- Case3：SBT-D

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 200Byte の CBR（Constant Bit Rate），パケット発生率は 64Kbps とした．

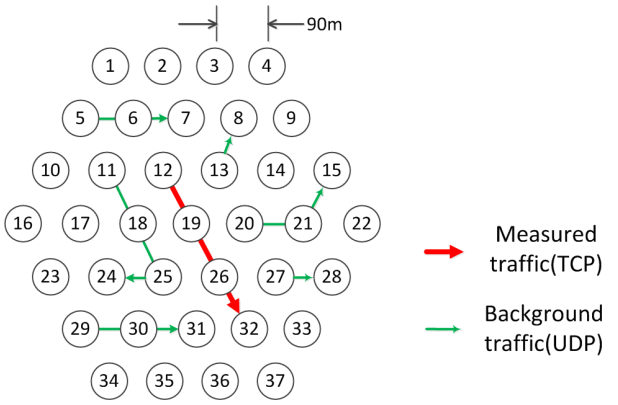


図 4　シミュレーション環境
Fig. 4　Simulation environment.

4.2 シミュレーション環境

図 4 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．

4.2.1 シミュレーション結果

図 5 ～ 9 にシミュレーションの結果を示す．今回の結果は，20 回試行した結果の平均値である．横軸は全て背景となる UDP 通信ペア数である．図 5 に TCP 通信のスループット測定結果を示す．縦軸は測定対象となる TCP スループットである．図 6 に TCP 通信の通信数を示す．縦軸は単位時間あたりの TCP 通信の送信パケット数である．図 7 に背景負荷端末のスループット測定結果を示す．縦軸は背景負荷端末全体のスループットである．図 8 に背景負荷端末のパケット数を示す．縦軸は単位時間あたりの UDP 通信の送信パケット数である．図 9 にネットワーク全体の衝突回数の推移を示す．縦軸は単位時間あたりの衝突回数である．

図 5 から，背景負荷数が増えるごとに段階的に TCP スループットが低下していくことが分かるが，これは UDP の背景負荷が一部のトラフィックを占有するためである．Case2 は Case1 よりスループットが向上しているもののわずかである．それに対し，Case3 は大幅にスループットが向上していることがわかる．このことから RTS/CTS を無くすことによる効果が非常に大きいことがわかる．図 6 か

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

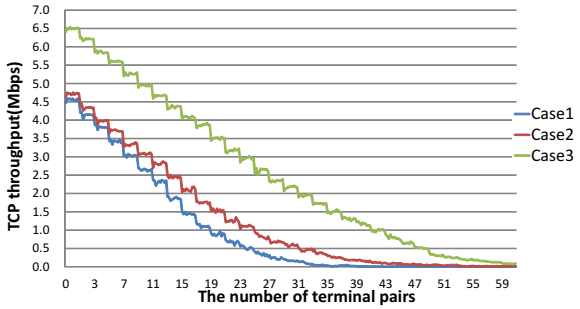


図 5　背景負荷量に対する TCP 通信のスループット測定結果

Fig. 5　Measurement for the amount of background traffic on TCP throughput.

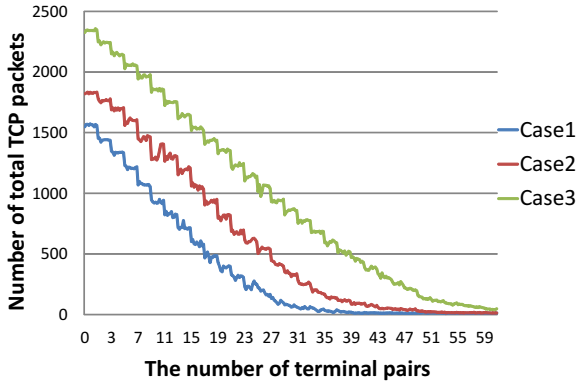


図 6　TCP 通信パケット数の推移

Fig. 6　Changing on TCP transmission packets.

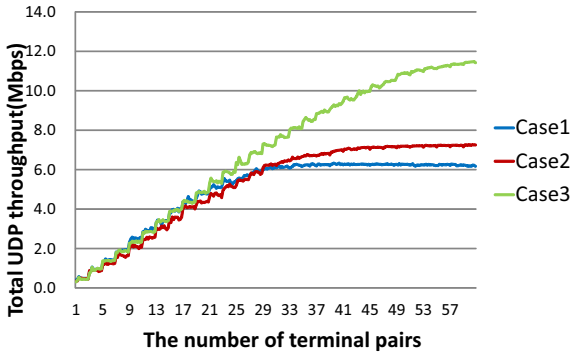


図 7　背景負荷のスループット測定結果

Fig. 7　Measurement on background traffic.

らわかるように，TCP 通信の送信パケット数が大幅に増加している．図 7 より背景負荷端末に注目すると，Case1 と比較して，Case2,Case3 ともにスループットの値が増加している．このことより，SBT によりネットワークの限界が向上していることがわかる．図 8 に示すように，SBT を用いることで背景負荷端末が増加した状態においても UDP 通信の送信パケット数は増加し続けている．このことより，SBT は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 9 より衝突回数に注目すると，Case1 においては背景

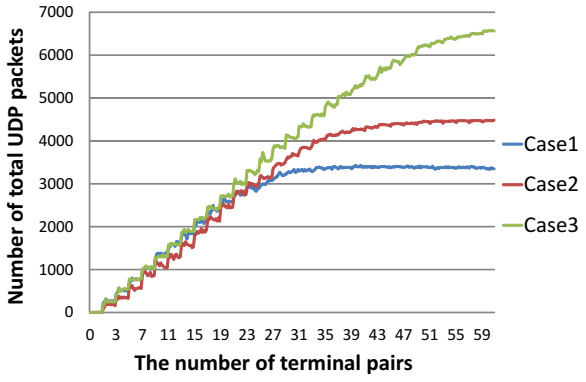


図 8　UDP 通信パケット数の推移

Fig. 8　Changing on UDP transmission packets.

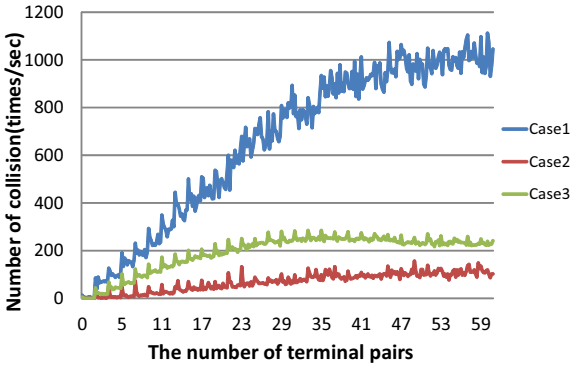


図 9　背景負荷量に対する衝突回数の推移

Fig. 9　Changing for the amount of background traffic on Collision.

負荷端末が増加した際に大幅に衝突回数が増加していくことがわかる．Case2，Case3 では背景付加端末が増加した状態においても衝突回数が大幅に削減されていることがわかる．Case2 と Case3 を比較した場合，Case3 の衝突回数が増加している．これは，図 6 と図 8 に示すように Case3 は Case2 と比較し単位時間に発生する通信回数が増加している．そのため，衝突回数が増加していると考えられる．

以上の結果から，いかなる状態においても，SBT による衝突防止効果があることがわかる．また，SBT-D では RTS/CTS を削除したことにより，大幅なスループットの増加を実現できていることがわかる．

5. まとめ

RTS/CTS における課題を解決するために，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方式を提案した．シミュレーションにより，TCP/UDP 混在環境においてパケット衝突の大幅な軽減やスループットの向上を確認した．RTS/CTS によるオーバーヘッドが如何に大きいかを

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.10
Vol.2013-ITS-55 No.10
Vol.2013-DCC-5 No.10
2013/11/14

示し，RTS/CTS を無くした状態において SBT のみによる制御が可能であることを示した．SBT は周辺端末の送信を抑制する性質を持つが，衝突を防止し，RTS/CTS のオーバーヘッドをなくすことによる効果の方が大きいことを確認した．

参考文献

[1] Athanasia Tsertou, David I. Laurenson: Revisiteing the Hidden Terminal Problem in a CSMA/CA Wireless Network, IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 7, NO. 7, JULY 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 Mul-tiple 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. 2005 IEEE International Conference on
[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
[7] 萬代雅希，笹瀬巌：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
[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)，2815-2829，2006-09-15
[9] Abdullah, A.A.: Enhanced Busy-Tone-Assisted MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks, Vehicular Technology Conference Fall(VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd
[10] 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．
[11] 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
[12] 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ーンの導入の検討と評価，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．

© 2013 Information Processing Society of Japan