

# RSSIを用いた制御フレーム検知によるCSMA/CAの 高効率化の一検討

梅澤 良斗<sup>1,a)</sup> 吉廣 卓哉<sup>2,b)</sup>

**概要:** CSMA/CA は、無線通信の萌芽期から代表的な媒体アクセス制御手法として知られており、現在でも、最も普及した通信規格の一つである IEEE802.11 に採用されるなど、世界で広く使用されている。CSMA/CA は古くから隠れ端末問題や晒し端末問題と呼ばれる、通信性能を大きく悪化させる問題が知られている。これらの問題に対して、長年に渡って多くの研究者により取り組まれており、膨大な研究が存在する。しかしながら、これらに対する根本的な解決策ははまだ提案されていない。このため、現在でも、端末が多数集まった場合には通信性能が大きく低下する問題を抱えている。本研究では、あるノードに近隣ノードの送信信号が届いており、通常であればビジー状態になる場合であっても、RSSI（受信信号強度）を監視することによって、復調することなく制御フレーム（CTS と ACK）の検知を高精度に行う制御フレーム多重化技術を提案する。提案技術によって、近隣ノードがフレームを送信中であっても自身が RTS を送信すれば CTS が受信でき、データフレームを送信すれば ACK を受信できるため、データの同時通信が可能となり、晒し端末問題を解決し、CSMA/CA における通信を大きく効率化できる。

**キーワード:** CSMA/CA, 晒し端末問題, RTS/CTS, RSSI

YOSHITO UMEZAWA<sup>1,a)</sup> TAKUYA YOSHIHIRO<sup>2,b)</sup>

## 1. はじめに

1997年に策定されたIEEE802.11は、現在でも最も普及している無線通信規格の一つである。このIEEE802.11ではCSMA/CAと呼ばれる媒体アクセス制御方式が採用されている。CSMA/CAは通信を始める前に他のノードが通信を行っていないか検知する。他のノードが通信を行っていない場合、バックオフと呼ばれるランダム長の時間待機した後、通信を開始する。他のノードが通信中であることを検知すると自身は送信を待機し他のノードが通信終了した後、自身の通信を開始する。しかし、CSMA/CAには隠れ端末問題と晒し端末問題と呼ばれる通信性能を大幅に悪化させる問題が発生する。隠れ端末問題とは、お互いに検知できない場所に存在するノードが同時に電波を送信した場合、受信先のノードで衝突が発生する問題である。晒し端末問題は実際には送信可能であるが他のノードの通信

があるために送信を抑制してしまう問題である。

2つの問題については多くの研究者により長年に渡って取り組まれており、膨大な研究が存在するが、いまだ根本的な解決手段は提案されていない。このため、現在でも無線通信する端末が多数集まった場合には通信性能が大幅に悪化する問題を抱えている。

本研究の目的は、CSMA/CAを用いた無線通信において晒し端末問題を解消することである。これを実現するために、本来はビジー状態になる場合であってもRSSIの監視によってCTSおよびACKの到達を高精度に検知してデータの送信を可能とする制御フレームの多重化技術を提案する。次にCSMA/CAプロトコルを拡張し、制御フレームの多重化技術を適用できるようにすることで晒し端末問題の解消を目指す。本研究では、RSSIによる制御フレーム多重化技術をCSMA/CAに適用し、データの同時通信を可能とすることで晒し端末問題を解決する手法を提案する。本論文は全5章で構成されており、第2章では関連する研究について述べる。第3章では本研究の提案手法を述べる。第4章では評価について述べる。第5章では本研究についてのまとめを述べる。

<sup>1</sup> 和歌山大学大学院システム工学研究科

<sup>2</sup> 和歌山大学システム工学部

<sup>a)</sup> s206036@wakayama-u.ac.jp

<sup>b)</sup> tac@wakayama-u.ac.jp

## 2. 関連研究

CSMA/CA の改良は多くの研究者によって長年取り組まれており、膨大な研究がある。CSMA/CA において発生する隠れ端末問題を解消するために、Bharghavan らは RTS/CTS を用いる方法を提案した [1]。本手法は IEEE 802.11 にも採用されているが、晒し端末問題による性能低下が著しいこと、また、特に高速通信時には遠方からの電波干渉によるフレーム損失が頻繁に発生するため、隠れ端末問題の対策として十分に機能しないことが知られており [2][3]、実用的にはあまり使われていない。

近年では物理層における技術を用いて通信を効率化する手法が提案されている。無線通信において、同一ノードが送信機と受信機を持ち、送信信号を受信機において打ち消すことで送信と受信を同時に行う技術 SIC (Self Interference Cancellation) を提案した。この技術は全二重無線通信 [4][5] として知られ、活発に研究されている。また、NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)[6] は電波強度の強い信号と弱い信号を同時に受信したとき、先に強度の強い信号を復調することで元の信号を推測し、受信信号から除去することで強度の弱い信号を復調可能にする技術として知られている。これらの技術は無線通信容量を大幅に向上する技術として注目されているが、MAC 層におけるこれらの活用技術はほとんど提案されておらず、CSMA/CA において本質的な問題である隠れ端末問題に貢献するかどうかは疑問である。J.J.Garcia-Luna-Aceves は SIC 技術を用いた MAC プロトコルとして CRMA を提案した。[7] また、無線通信において、隠れ端末問題及び晒し端末問題の両方を起こさない完全な MAC プロトコルの実現に向けてビジートーンやパイロット信号を用いた提案 [8][9][10] をしている。しかし、いずれも理論的解析に終始しており、実際の無線環境における性能は未知である。

本論文の目的は、Garcia-Luna-Aceves と同様に隠れ端末問題と晒し端末問題の両方を起こさない MAC プロトコルの実現である。本提案では CTS と ACK を復調することなく受信することを可能にする点で従来手法とは異なる。復調しないため、他ノードからの信号を受信中であっても、僅かに 3dB 程度の SN 比があれば CTS と ACK を受信できる。このため、従来法と比較して大幅に MAC プロトコルの柔軟性を向上できる潜在性を秘めている。

## 3. 提案手法

### 3.1 提案手法の概要

本研究では RTS/CTS を用いた無線通信の際、常に RSSI (Received Signal Strength Indicator : 受信信号強度) を監視し、本来はビジー状態もしくは NAV 状態へ遷移する RSSI であっても、一定条件を満たす場合であれば、ビジー状態または NAV 状態へと遷移せず RTS/CTS の交換と

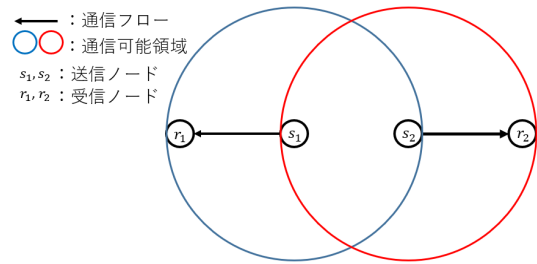


図 1: 動作例における配置図

データフレームの送信を行う。またデータフレームを検知中であっても、CTS または ACK が返信されるタイミングでの RSSI の上昇のみを観測することにより復調することなく CTS や ACK の返信を高精度に判別する。これによりデータフレームの同時通信が実現され晒し端末問題を解決し、通信性能を向上する。

提案手法の動作例を図 1 と図 2 を用いて説明する。図 1 はノードの配置と通信フローを示し、図 2 は各ノードの動作例を示す。始めにノード  $s_1$  とノード  $r_1$  の間で RTS/CTS の通信が行われる。 $s_1$  は  $r_1$  からの CTS の受信が完了するとデータフレームの送信を開始する。 $s_1$  の RTS とデータフレームを受信したノード  $s_2$  は RTS またはデータフレームの RSSI が閾値以下であれば、NAV、ビジー状態へ遷移せず、バックオフ時間待機した後にノード  $r_2$  へ RTS を送信する。 $s_2$  の RTS を受信した  $r_2$  は、SIFS 時間の後に CTS を返信する。 $r_2$  から CTS が返信されるとき、 $s_2$  は  $s_1$  からのデータフレームを検知中であるが、RSSI を観測し CTS が返信されるタイミングで RSSI の上昇を観測することで、復調することなく  $r_2$  から CTS が返信されたと判定しデータフレームの送信を開始する。

$s_1$  からのデータフレームの受信が完了した  $r_1$  は SIFS 時間の後に ACK を返信する。 $s_1$  は  $s_2$  からのデータフレームを検知中であるが、ACK が返信されるタイミングで RSSI の上昇が確認されたとき、復調することなく ACK が返信されたとみなし通信を完了する。 $s_2$  からのデータフレームの受信が完了した  $r_2$  は ACK を返信して、 $s_2$  の通信が完了する。もし  $s_1$  のデータフレームより先に  $s_2$  のデータフレームが送信完了した場合、 $r_2$  からの ACK が  $s_1$  のデータフレームと干渉するが、 $s_2$  は RSSI の上昇によって ACK が到達したと判断し通信を完了する。このように提案手法では RTS によって  $s_2$  の通信が抑制されることがなく、 $s_1$  と  $s_2$  のデータの同時通信が可能となり晒し端末問題を解消する。

### 3.2 前提条件

本研究では、CTS および ACK について復調することなく、RSSI のみを用いて到達を判別する手法を提案する。このためにすべてのノードは CTS および ACK が到達すると予測される時間範囲において詳細に RSSI を観測しなけ

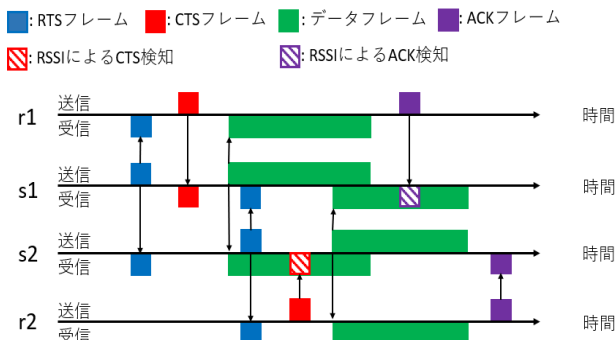


図 2: 提案手法における各ノードの動作例

ればならない。しかし従来の無線 NIC に搭載されているような市販の通信チップでは、フレーム受信完了時に、フレーム全体の平均 RSSI を計算するように設計されている。そのため、提案手法の実装においては、市販の通信チップは改造することなしに用いることができない。本研究では、研究時に bladeRF[11] や USRP[12] などのソフトウェア無線機を用いることで、すべてのノードが一定間隔ごとの RSSI の計算ができるように設計する。これにより、フレームの受信時であっても RSSI を観測し、RTS もしくはデータフレームの送信完了から CTS や ACK が到達する時間までにおける RSSI を詳細に観測できることを想定している。

### 3.3 RSSI による CTS と ACK の検知

本研究では、一定の条件を満たす場合ビジー状態に遷移する RSSI でフレームを観測しても、ノードが RTS/CTS に始まるフレームの送信を開始することによって、晒し端末問題による影響を解消し、通信性能を向上することを目的とする。しかし、他のノードのフレームを考慮せず、RTS もしくはデータフレームを送信するだけでは CTS または ACK とデータフレームが干渉し、CTS と ACK が復調できないため再送処理を行うことになる。

このためには、CTS または ACK が正常に復調できる RSSI でない場合や、データフレームとの干渉によって正確に復調できない場合であっても、RSSI のみの観測によって CTS または ACK の到達を判別できる必要がある。このとき、自分が送信した RTS またはデータフレームに対する CTS や ACK が返信されるタイミングは、固定長の SIFS 時間とフレームの送信速度によって依存するため、その到着時間が容易に予測できる。したがって、RTS またはデータ送信後の RSSI を観測し、CTS や ACK が返信されるタイミングで RSSI の上昇を観測できれば、CTS や ACK が返信されたことと見なすことができる。CTS と ACK を正常に復調することは不可能であるが送信ノードは CTS または ACK の内容を読み取る必要はなく、CTS と ACK の到達したことをのみを判断できればよい。図 3 を用いて説明す

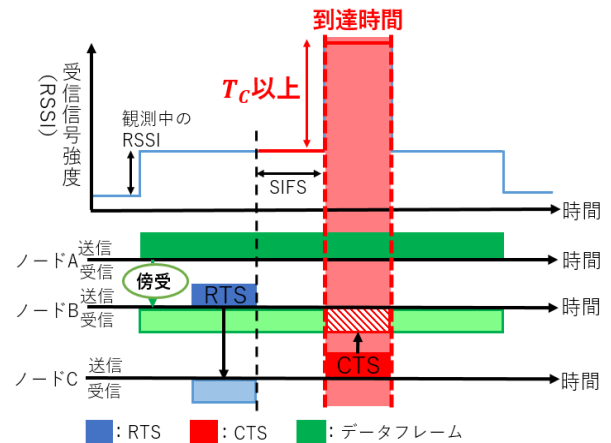


図 3: RSSI による CTS の検知

る。ノード B はノード C へのデータを持つが、このとき B は近隣ノード A からのデータフレームを受信中である。B は A の平均電波強度  $S_A$  [dBm] を保持している。このとき、閾値  $T$  [dB] として観測中の電波強度が  $S_A + T$  [dBm] 以下であれば、B は RTS から始まるデータの送信処理を開始する。ここでノード C がノード B の RTS を正常に受信処理した場合、ノード C は SIFS 時間後に CTS を返信する。しかし B ではノード A のデータフレームの干渉によって、C からの CTS は復号できない。そのため、CTS の到達期間と到達期間周辺の RSSI を比較し、この差が閾値  $T_c$  以上であれば CTS が到達したと判断して CTS の受信処理を行う。また、データの送信フレーム同士の距離が近い場合ではお互いに受信するデータフレームの RSSI が大きくなるため、CTS や ACK の RSSI が相対的に小さくなり検知できない可能性が高くなる。そのため、B が観測した電波強度が  $S_A + T$  以上ならば従来の CSMA/CA と同様にビジー状態に遷移し、A の通信が終了するまで通信を待機する。

この RSSI による CTS または ACK の検知により、他のノードから送信される RTS やデータフレームによって通信が抑制されることがなく、かつフレームの干渉が発生したとしても RTS/CTS の交換、データの送信と ACK の伝達が可能となり、晒し端末問題が解消される。

### 3.4 提案 MAC プロトコル

提案手法では 3.3 章で述べた RSSI による CTS および ACK の検知を行うため、従来の CSMA/CA と提案手法では状態遷移する条件が異なる。図 4 に提案手法の状態遷移図を示す。

CSMA/CA と提案手法で異なる点は自分宛でない RTS を受信したときの動作とキャリアセンスの動作が異なる。CSMA/CA ではバックオフ、データ待機、CTS 待機、ACK 待機状態のいずれかであるときに自分宛でない RTS または CTS を受信したとき、NAV 状態へ遷移する。これに対して提案手法では、バックオフ状態にあるとき自分宛でない

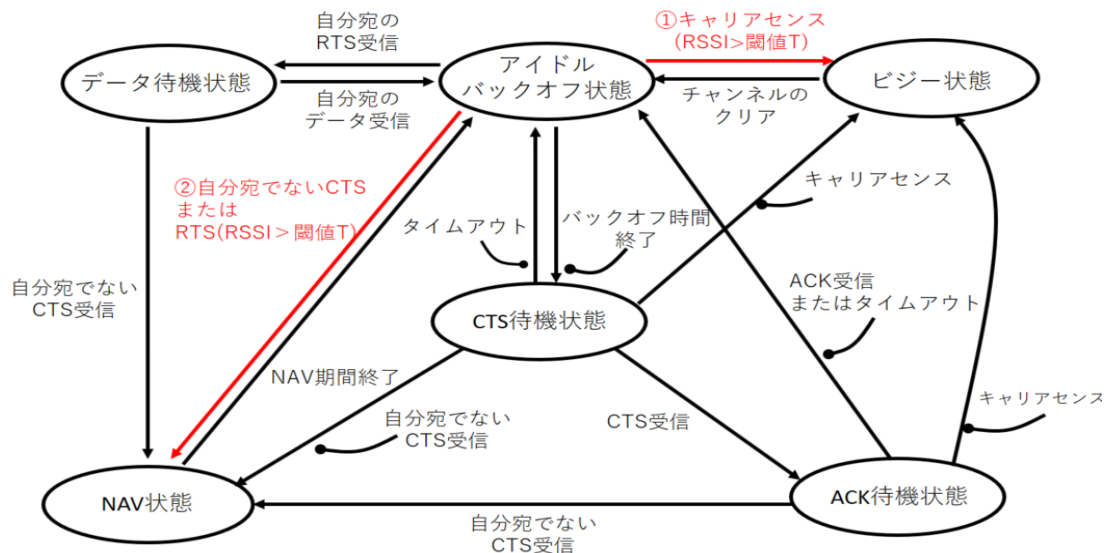


図 4: 提案手法の状態遷移図

い RTS を受信した送信ノードは、RSSI が閾値以下であればバックオフ状態を続行する。もし閾値以上であれば、この後に送信されるデータフレームの RSSI も閾値以上となり、RSSI による CTS または ACK の検知ができない可能性があるため、CSMA/CA と同様に NAV 状態へ遷移する。キャリアセンスでは RSSI が閾値以上の場合、ビジー状態へと遷移する。

また CSMA/CA では CTS を受信した場合のみデータフレームの送信を開始し、送信が終了した後 ACK 待機状態へと遷移する。しかし提案手法では、CTS 待機状態にいるとき自分宛の CTS を受信した場合、または 3.3 章で説明した RSSI により CTS を検知した場合には、データフレームの送信を開始し ACK 待機状態へ遷移する。自分宛でないフレームが届いたときに RSSI が閾値以上の I であれば、ビジー状態へと遷移する。CTS を受信したまたは検知ができずタイムアウトしたとき、ノードはバックオフ状態へ遷移する。提案手法では、ACK 待機状態にいるときに自分宛の ACK を受信したまたは RSSI により ACK 検知した場合、または ACK を受信せずタイムアウトした場合のいずれかによってバックオフ状態へ遷移する。

次に提案手法と CSMA/CA において共通する部分について述べる。まず、ビジー状態と NAV 状態にあるときの動作は共通である。ビジー状態にいるとき、通信チャンネルに電波が存在しない場合、バックオフ状態へ遷移する。NAV 状態では NAV 期間が終了したときバックオフ状態へ遷移する。CSMA/CA と提案手法においてバックオフ状態であるとき、自分宛でない CTS を受信した場合は、NAV 状態へ遷移する。NAV 状態へ遷移する理由は、CTS を送信したノードでデータフレームとの衝突が発生するのを防ぐためである。バックオフ状態ではランダムバックオフ時間が終了するまで送信を待機し、バックオフ時間が終了す

ると RTS を送信して CTS 待機状態へと遷移する。自分宛の RTS を受信した場合は、CTS を返信し、データ待機状態へと遷移する。

## 4. 評価

### 4.1 評価方法

今回の提案手法と既存手法の性能をネットワークシミュレータ Scenargie2.1 を用いて比較する。比較する既存手法は、CSMA/CA (RTS/CTSあり) と CSMA/CA (RTS/CTSなし) とする。実験では提案手法による晒し端末問題の解決によって従来手法よりも通信性能が向上しているか評価するため、平均フレーム到達率と平均スループットに着目して評価する。平均フレーム到達率は全てのフレームのうち、どれだけ宛先ノードが受け取ることができたかを表している。平均スループットは単位時価あたりに送受信したデータ量を表しており、これによりネットワーク全体の通信速度を測る。シミュレーションシナリオを図 5 に示す。AccessPoint (AP) を 2 つ用意し、1 つの AccessPoint は 4 つの Client (C) と通信し、各 AP と C の配置は、隠れ端末問題と晒し端末問題が発生するように設定している。AP と AP の距離、AP と通信する Client の距離は 250m で統一する。シミュレーション時間は 120 秒とし、通信フローの発生時間を 10~110 秒とする。通信方式は一般的に利用されている無線通信方式である IEEE802.11g を使い、全ノードの通信速度は 6Mbps とする。通信フローは CBR とし、フレームサイズは 1000Bytes とした。そして 1 フローあたりの送信レートを 150~900kbps まで 150kbps ずつ増加させてシミュレーションを行った。表 1 に提案手法と既存手法の両方に共通する条件を記載する。



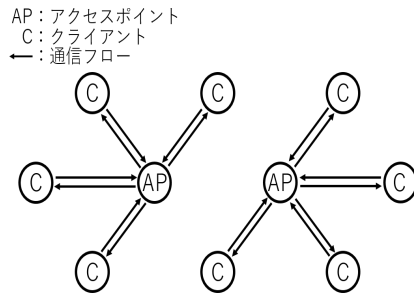


図 5: 評価におけるノード配置

表 1: シミュレーションにおける共通条件

パラメータ	値
しきい値	3[dBm]
シミュレーション時間	120[秒]
ノード数	10 個
ノード間隔	250[m]
データフロー種別	CBR
データフロー数	16[本]
送信ビットレート	150~900[kbps]
発生時間	100[秒]
フレームサイズ	1000[Byte]
通信規格	IEEE802.11g
通信速度	6[Mbps]
送信電力	10[dBm]

## 4.2 評価結果

次にシミュレーションの評価結果を示す。提案手法と既存手法の平均スループットの結果を図 6 に、平均到達率を図 7 にそれぞれ示す。横軸は全て 150~900kbps までの 1 つの通信フローの送信レートを表しており、縦軸は図 6 では平均スループット [kbps], 図 7 は平均到達率 [%] を表している。平均スループットでは 300kbps まで従来手法と提案手法は同等であるが、300kbps 以降では提案手法は既存手法を上回り、送信レートが 750kbps ではおよそ 1000kbps の開きが生じていることがわかった。また平均到達率では従来の CSMA/CA と比較して、300kbps まで従来手法と提案手法は同等である。300kbps 以降では全ての送信レートで提案手法が到達率を上回った。これは RSSI を用いた CTS/ACK の検知により隠れ端末問題を解決し、晒し端末問題を解決することで通信機会が損失されず、データの同時通信が行われたと考えられる。具体的には、左側の AP から送信されるデータフレームは右側の AP に到達するが、右側 AP は送信を抑制せず RTS もしくはデータフレームの送信を行うため、晒し端末問題が解決される。また左側 AP のデータフレームが到着中であるとき、右側 AP に CTS/ACK が到達した場合、RSSI によって CTS もしくは ACK の到達を検知するため、隠れ端末問題を解決できる。評価の結果から、提案手法では隠れ端末問題と晒し端末問題の両方について、ある程度解消していることが明らかに

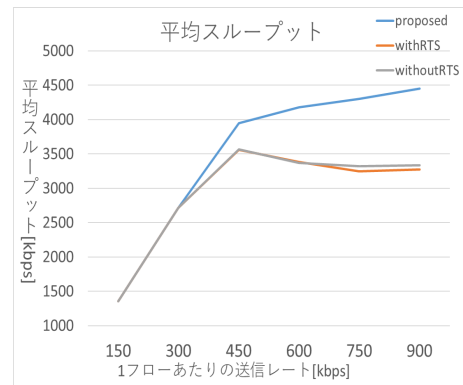


図 6: 平均スループットのグラフ

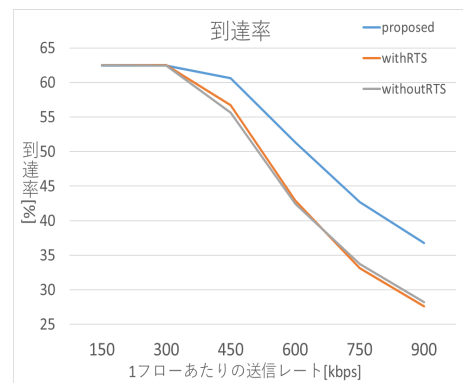


図 7: フレーム到達率のグラフ

なった。しかしながら、低い送信レートであっても、到達率が 63%程度であることから完全な解消には至っていないと考察できる。以上から、提案手法では既存手法と比較して、隠れ端末問題と晒し端末問題がある程度解消され、通信性能を向上していることが明らかになった。提案手法では衝突回避とデータの同時通信によって、ネットワーク全体の許容帯域が大きくなりスループットと到達率が向上した。

## 5. おわりに

本論文では、CSMA/CA を用いた無線通信において晒し端末問題を解決する手法を提案した。評価としてネットワークシミュレータ Scenargie ver2.1 を用いて、提案手法と既存手法を比較した。評価結果から、提案手法はデータの同時通信が行われ、隠れ端末問題と晒し端末問題をある程度解消し、性能が向上することを明らかにした。しかし、完全に解消されているわけではないため、今後は解決しきれなかった隠れ端末問題と晒し端末問題の発生状況などについても詳細に分析していく。また今回の提案手法は、ある環境での誤検知の影響や、フェージングの影響などについても議論の余地があると考えられるため、今後は MATLAB などを用いることで物理層を解析する必要があると考える。将来的には bladeRF などのソフトウェア無線機を用いた実機実験によって実環境での現実性の検討を

行っていく。

近年では、物理層技術によって無線通信を効率化する技術が提案されており、送信と受信を同時に行う全二重無線通信技術が提案されている。本研究は現在の半二重無線通信に留まらず、全二重無線通信技術に対する可能性を模索していきたいと考えている。

## 謝辞

本研究の一部は科研費 19K22845 の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- [1] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LAN's," in Proc. ACM SIGCOMM '94, pp. 212–225, 1994.
- [2] J.L. Sobrinho, R. de Haan, J.M. Brazio, "Why RTS-CTS Is Not Your Ideal Wireless LAN Multiple Access Protocol," In Proc WCNS '05, 2005.
- [3] K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, "Effectiveness of RTS/CTS Handshake in IEEE 802.11 Based Ad Hoc Networks," Ad Hoc Networks, Vol.1 Issue.1, pp.107-123, 2003.
- [4] M. Jainy et al., "Practical, Real-Time, Full Duplex Wireless," In Proc. ACM MobiCom '11, 2011.
- [5] D. Kim, H. Lee, and D. Hong A Survey of In-Band Full-Duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers Perspective of PHY and MAC Layers, IEEE Communications Surveys & Tutorials 17(4), 2017–2046, 2015.
- [6] Z. Ding, X. Lei, G.K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, V. Bhargava, A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 35(10), pp.2181-2195, 2017.
- [7] J.J. Garcia-Luna-Aceves, Carrier Resolution Multiple Access, In Proc. PE-WASUN '17, 2017.
- [8] J.J. Garcia-Luna-Aceves, "CTMA: A More Efficient Channel Access Method for Networks with Hidden Terminals," PE-WASUN'17, pp 9-16, 2017.
- [9] J.J. Garcia-Luna-Aceves, Busy-Tone Multiple Access with Collision Avoidance and Detection for Ad-Hoc Networks, In Proc. of IEEE ICNC2019, 2019.
- [10] J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Design and Analysis of Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection," Proc. ACM MSWIM '17, 2017.
- [11] bladeRF 2.0 micro, Nuand LLC, <https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro/> (2020年1月閲覧)
- [12] USRP B200, Ettus Research, <http://www.ettus.com/all-products/UB200-kit/> (2020年1月閲覧)