G-09

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
On Improving Efficiency of CSMA/CA with RSSI-based Control-frame Detection

梅澤 良斗 †　　吉廣 卓哉 ‡
Yoshito Umezawa　Takuya Yoshihiro

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通信規格の 1 つである．この IEEE802.11 では CSMA/CA と呼ばれる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あ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．

これら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, 現在でも端末が多数集まった場合には通信性能が大きく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/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．また，提案手法をネットワークシミュレータ Scenargie に実装し，既存手法の CSMA/CA と比較して評価実験を行った．評価実験の結果，従来手法よりもスループットと到達率が概ね 2 倍程度に向上した．これは RTS またはデータフレームによって通信が抑制されず，データの同時通信が行われていることを示している．以上から，提案手法は晒し端末問題を解消する手法として有効である可能性を示した．

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 章ではネットワークシミュレータ Scenargie を用いた性能比較により，提案手法の評価を行う．第 5 章では本研究についてまとめる．

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 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，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 5G にも採用されている．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 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 を提案したが [7]，論文では理論的解析に終始し，実際の無線通信環境において有効であるかどうかは明らかにされていない．

J.J.Garcia-Luna-Aceves は近年，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複数の提案をしている．ビジートーンやパイロット信号を用いた提案などがあるが [8][9][10]，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．

本論文の提案は，Garcia-Luna-Aceves と同様に隠れ端

† 和歌山大学大学院 システム工学研究科, Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University
‡ 和歌山大学 システム工学部, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

末・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 ACK と CTS 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 ACK と CTS 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) を観測し，本来はビジー状態へ遷移する RSSI であっても，一定条件を満たす場合であれば，ビジー状態へと遷移せず RTS/CTS の交換と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 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・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 を送信して，r_2 は 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 の上昇を確認することで，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，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 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通信チップの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 を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，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 の変動を詳細に観測できることを想定している．

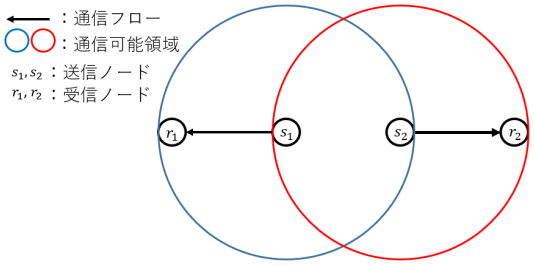


図 1: 動作例における配置図

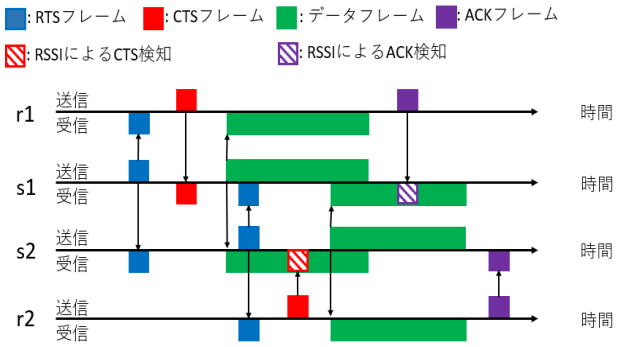


図 2: 提案手法における各ノードの動作例

3.3 RSSI による CTS・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/CTS を送信するだけでは CTS・ACK とデータフレームが干渉し CTS と ACK の復調できず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

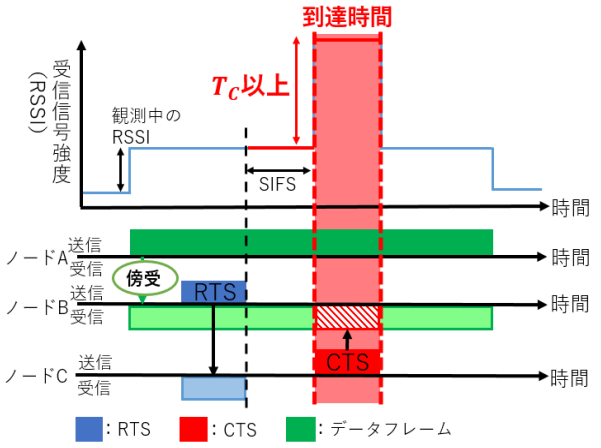


図 3: RSSI による CTS の検知

て CTS/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 またはデータに対する CTS や ACK が返信されるタイミングは 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，受信ノードからフレームが返信されたと見なすことができる．CTS と ACK を正常に復調することはできないが送信ノードは内容を読み取る必要はなく，CTS と ACK の到達したことが判断できればよい． 図 3 を用いて説明する．ノード A はノード C へのデータを持つが，このとき A は近隣ノード B からのデータフレームを受信中である．A は B の平均電波強度 S_B[dBm] を保持している．このとき，閾値 T_C[dB] として観測中の電波強度が S_B+T_C[dBm] 以下であれば A 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 A 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 A ではノード B 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，A が観測した電波強度が S_B+T_C 以上ならば従来の CSMA/CA と同様に NAV 期間通信を待機する．

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/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 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・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 CSMA/CA と提案手法において共通する部分について述べる．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とき，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 を受信したノードは NAV 状態へ遷移する．これは 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 を受信した場合では，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

今回の提案手法と従来の CSMA/CA を性能比較するた

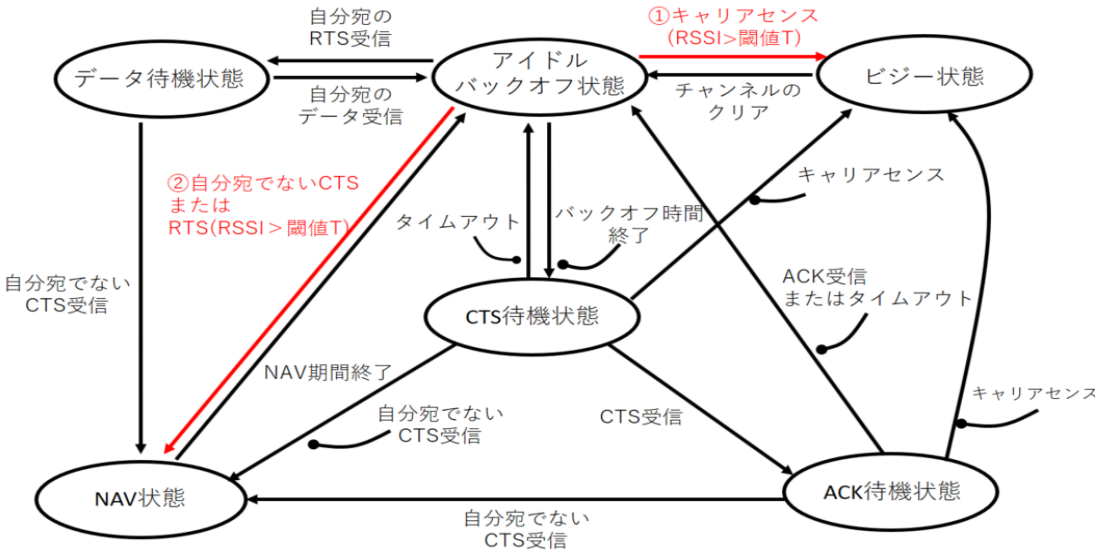


図 4: 提案手法の状態遷移図

め，ネットワークシミュレータ上でシミュレーション実験を行った．シミュレータは Scenargie を使用し，実験では提案手法による晒し端末問題の解決によって提案手法が従来手法よりも通信性能が向上しているか調査するため，平均スループットと到達率の点に着目し評価を行う．フレーム到達率は全フレームのうちどれだけ宛先端末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間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は図 5 のように一直線上に等間隔で配置された 4 個のノードで通信を行う．今回の評価実験では基礎研究として実験を行ったため，晒し端末問題の発生する最小の個数である 4 個のノードと 2 つの通信フローのシナリオとした．ノード間隔は 275m で統一し，隣接ノードのみの電波が到達できるようにしている．シミュレーション時間は 120 秒とし通信フローの発生を 10̃10 秒とする．通信方式は一般的な無線通信方式の一つである IEEE802.11g を用い，ノードの通信速度は 6Mbps とする．通信フローは CBR 通信としフレームサイズは 1500Bytes とした．そして送信レートを 0 から 11000kbps まで 200kbps 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．

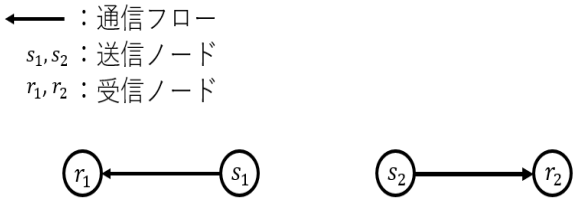


図 5: 評価におけるノード配置

表 1: シミュレーションにおける共通条件

パラメータ	値
シミュレーション時間	120[秒]
ノード数	4 個
ノード間隔	275[m]
データフロー種別	CBR
データフロー数	2[本]
送信ビットレート	0̃1000[kbps]
発生時間	100[秒]
フレームサイズ	1500[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評価の結果を示す．従来手法と提案手法の平均スループットの結果を図 6 にフレーム到達率を図 7 にそれぞれ示す．横軸はすべて 0 から 11000kbps まで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を，図 7 ではフレーム到達率をそれぞれ表している．

平均スループットでは 5400kbps までは従来手法と提案手法ともに同等である．5400kbps 以降では送信レートが大きくなるにつれ差が開いていき, 送信レートが 10000kbps のときは概ね 2 倍ほどの開きが生じていることがわかった，到達率は従来手法と提案手法では 5400kbpd 時点で同等の 100%，それ以降はどの送信レートでも提案手法が上回る結果となった．これはネットワークの許容帯域を超え送信キューによる影響で飽和したことが推測できる．データの同時通信が可能となればネットワークの許容帯域がおよそ 2 倍になることから，提案手法ではノードの送信抑制が発生せず同時通信が行われたと考えられる．以上から提案手法では晒し端末問題を解消していることが明らかに

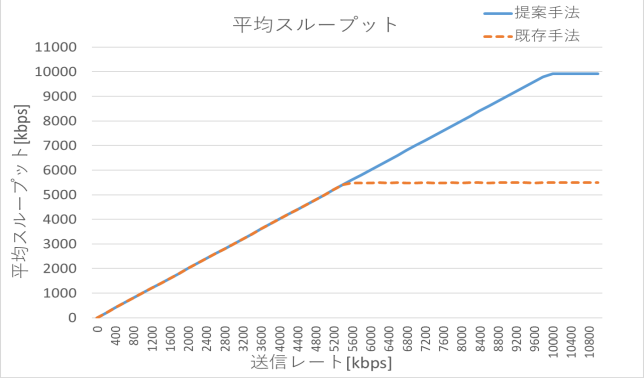


図 6: 平均スループットのグラフ

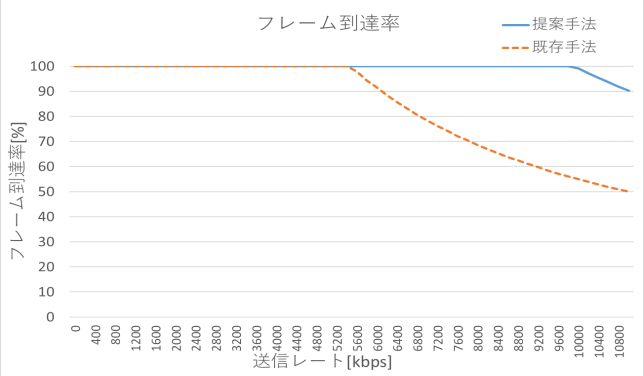


図 7: フレーム到達率のグラフ

なった．

上記の結果から，提案手法では晒し端末問題が解消され通信性能が向上していることが明らかになった．提案手法ではデータの同時通信が行われているため，許容帯域が既存手法よりも大きくなり，およそ 2 倍の差が出た．

5. おわりに

本論文では晒し端末問題を解決する手法を提案した．評価ではネットワークシミュレータ Scenargie ver.2.1 を用いて，直線上に等間隔で並ぶ 4 個のノードに提案手法と既存手法を取り入れた実験をそれぞれ行い，通信性能を比較した．評価の結果，提案手法は既存手法に比べ，概ね 2 倍程度のスループットの向上した．データの同時通信が行われるとネットワークの許容帯域が 2 倍程度まで引き上げられることから，晒し端末問題を解消し通信性能が向上することを明らかにした．

今後の課題として，今回評価を行ったのはノード数 4 個という非常に簡潔なネットワークである．実験に使用するノード数やフロー数を増加し，様々なトポロジや通信パターンでの評価を行う必要がある．将来的には USPR 等のソフトウェア無線機を用いた実機実験が必要であると考えられる．

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，その 1 つとして 5G のを構成要素となっている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探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/ (2019 年 7 月閲覧)

[12] USRP B200, Ettus Research, http://www.ettus.com/all-products/UB200-kit/ (2019 年 7 月閲覧)