Vol.2022-DPS-190 No.10
Vol.2022-CSEC-96 No.10
2022/3/10

CSMA/CAにおける受信電波強度に基づいた制御フレーム検知に関する物理層特性の実機評価

吉廣 卓哉[1,a)]　梅澤 良斗[2]

概要：我々は，CSMA/CA における隠れ端末，および晒し端末問題を解消するために，CSMA/CA の CTS および ACK フレームの到達を，受信電波強度を観測するだけで通信フレームを復号することなく高精度に判定する手法の開発を行なっている．本手法を用いて CSMA/CA を改良する提案も行なっており，これにより大幅に通信性能を向上することが可能であることが，シミュレーション評価により確認されている．しかし，シミュレーションでは，簡単な確率モデルを用いて受信電波強度をモデル化した，ある程度理想化した前提における評価であり，物理層において本当に想定される性能が出ることは確認されていなかった．本稿では，ソフトウェア無線機と GNU Radio を用いて受信電波強度を用いた ACK フレームの受信を試み，受信したと見做すしきい値と受信精度の関係を評価した．

1. はじめに

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。

この問題に対して我々は、CSMA/CA において晒し端末問題を解消するために、CTS や ACK フレームを復調することなく受信電波強度によって検知する技術を開発している [2]。周辺ノードがデータフレームを送信中であっても、CTS/ACK フレームを受信することができるような制御フレームの多重化技術である。本技術を用いて CSMA/CA を拡張した MAC プロトコルを設計することができるため、標準化が進んでいる IEEE802.11 に対しても適用でき、実用化できる可能性がある。本技術をネットワークシミュレータ Scenargie に実装して評価した結果、大幅なスループットの向上が実現できるという結果を得ている。

しかし、シミュレーションにおいては、制御フレームが受信された場合に、S/N 比が 3dB 以上であれば、その制御フレームを確実に検知できる、という仮定をおいている。この仮定は無線通信の物理特性に基づいて簡単な統計的計算により導かれたものであるが、実際の特性は変復調方式や物理層特性に依存するため、実機を用いた評価が必要である。そこで本研究では、ソフトウェア無線機上に IEEE802.11 の制御フレームと同等の変復調方式を実装した上で、制御フレームを高い信頼性で復調せずに検知するためにはどの程度の S/N 比が必要であるかを評価する。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章には関連研究を述べる。第 3 章には提案している制御フレームの多重化手法と、提案 MAC プロトコルを述べる。第 4 章にはソフトウェア無線機を用いた評価実験の方法と結果を述べる。最後に第 5 章で本論文をまとめる。

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/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が知られており [3][4]，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

[1] 和歌山大学システム工学部
Wakayama University, 930 Sakaedani, 640-8510, Japan
[2] 和歌山大学大学院システム工学研究科
Wakayama University, 930 Sakaedani, 640-8510, Japan
[a)] tac@wakayama-u.ac.jp

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

提案した。この技術は全二重無線通信 [5][6] として知られ，活発に研究されている。また，NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)[7] 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 [8]。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 [9][10][11] 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．我々の提案方式は、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 を受信できると考えている。もしそれが検証されれば、従来法と比較して大幅に MAC プロトコルの効率を向上できる可能性が拓ける。

3. 提案中の MAC プロトコル

3.1 プロトコルの概要

本節では、文献 [2] 等で我々が提案中の MAC プロトコルを説明する。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 を用いて説明する。図 1 左はノードの配置と通信フローを示し，図 1 右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。s2 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 RSSI による制御フレームの検知

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 の到達したことのみを判断できればよい.

図 2 を用いて説明する。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

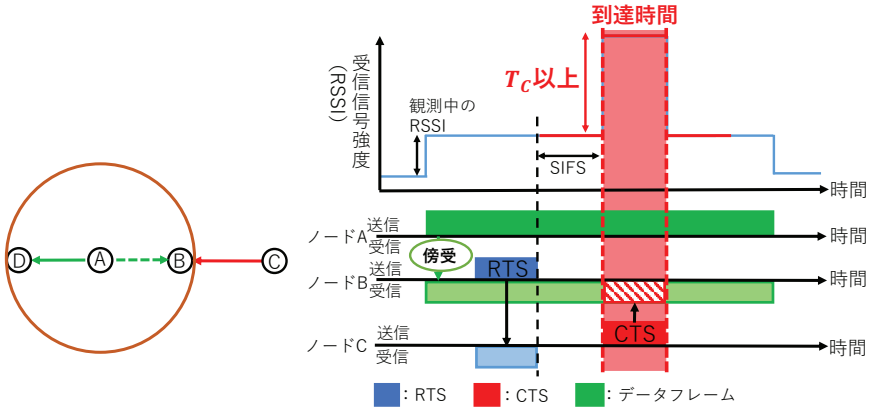

図 1　提案プロトコルの動作例

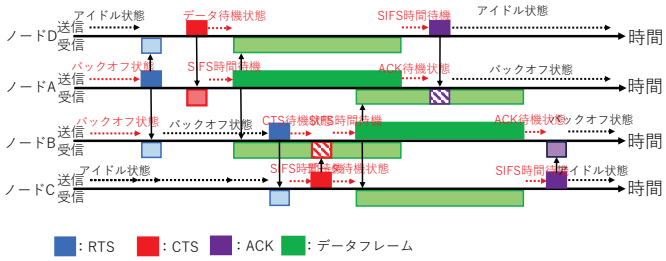

図 2　RSSI による制御フレームの検知

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．

3.3　MAC プロトコル

提案プロトコルでは、先述の 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 3 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 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，または先述の、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 が閾値以上の値であれば，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

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

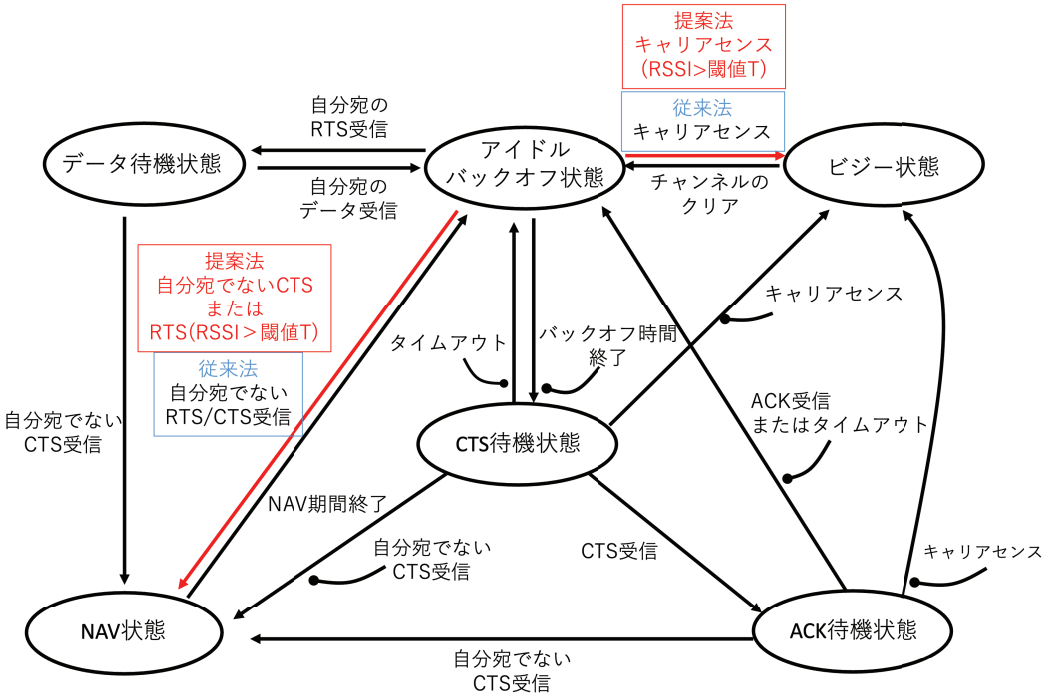

図 3　提案 MAC プロトコルの状態遷移

表 1　実機実験諸元

パラメータ	値
送信サンプリングレート	20 [MHz]
受信サンプリングレート	20 [MHz]
ACK 送信時間	76 [μs]
ACK サンプル数	1520 [サンプル]
FFT サイズ	64
通信帯域	2.42 [GHz]
通信帯域幅	20 [MHz]
サブチャンネル数	52
パイロットシンボル数	4
変調方式	BPSK/QPSK
冗長率	1/2

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. ソフトウェア無線機による物理層特性の評価

4.1 評価方法

ソフトウェア無線機により制御フレームの送信を模したデータ送信を行い、どの程度の S/N 比であれば受信電波強度（RSSI）に基づいた制御フレームの受信判定が可能であるかを評価した。ソフトウェア無線機として National Instruments 社の USRP-2921 を用い、オープンソースの GNU Radio version 3.8 を用いて IEEE802.11 の制御フレームを模した電波送信をした。制御フレームの送信は GNU Radio Companion を用いて送信プログラムを作成した。IEEE 802.11 を模倣するために、周波数帯域は 2.42 GHz とし、帯域幅は 20 MHz とし、制御フレームの変調方式として BPSK と QPSK を用いた。冗長率は 1/2 で固定したため、通信速度は 6 Mbps 及び 12 Mbps となる。Ack の送信サンプル数は、BPSK で冗長率 1/2 の場合には 1520 サンプルとなり、6 Mbps の通信速度では 76μsec の送信時間となる。Ack を模倣するためのデータのビット列はランダム生成した。その他、信号処理に用いたパラメータを表 1 に示す.

実験は、3 台のソフトウェア無線機を用いた。送信用、受信用、ノイズ発生用にそれぞれ 1 台ずつを用いた。外部からの電波を完全に遮断できる室内において図 4 のように、送信機とノイズ発生機を横並びに配置し、5m 離れた位置に受信機を配置した。これらは、高さ 1.2m の台の上に設置した。使用した部屋は、電波を吸収する電波暗室ではなく、通常のオフィスのような壁になっており、道具を置く棚等も配置されている（図 5）。

送信用無線機からは一定パターンの電波を送信する。具体的には、送信用無線機は 76μs の ACK に模した電波を送信した後、同じ時間だけ何も送信しない時間をとり、これを繰り返す。これは、ACK フレームの送信を模倣しており、何度も繰り返すことで、ACK フレームの検知確率を調べることができる。ノイズ発生用無線機からは、常に同じ電力で電波を送信する。ノイズ発生用無線機は、送信用無線機の近隣でデータフレームを送信中のノードを模倣する。従って、ノイズ送信は送信用無線機と同様に、IEEE802.11 を模したデータ送信を行う。つまり、表 1 にある送信パラ

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

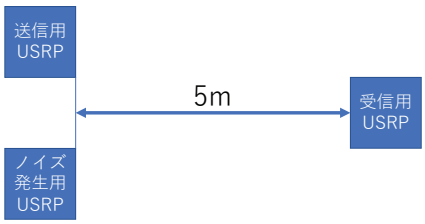

図 4　ソフトウェア無線機の配置図

図 5　ソフトウェア無線機の配置（写真）

メータを用いて、48 のサブチャンネルでランダムなデータ系列を送信する。送信用無線機とノイズ発生用無線機が発生した電波を受信用無線機が受信したときの受信電力パターンの一例を図 6 に示す。左半分には送信用無線機が一定時間間隔で送信した、ACK フレームを模倣した通信を受信したパターンが見える。また、図 6 の全体にわたって常に一定の電力が受信されているのがわかる。これは、ノイズ発生用無線機から発生された送信電波に熱雑音が加わった受信パターンである。つまり、左半分は送信用無線機とノイズ発生用無線機の送信信号が混ざった信号を受信した場合の受信電波強度のパターンである。

実験では、初めの約 10 秒は送信用無線機のみが電波を発し、続く約 10 秒はノイズ発生用無線機も同時に電波を発する。最後の約 10 秒は送信用無線機の電波を止め、ノイズ発生用無線機の電波のみを発信する。このような約 30 秒の通信を行い、受信用無線機で 20Mbps の周波数でサンプリングを行う。上記の操作を、ノイズ発生用無線機の送信電力値を様々に変更しながら繰り返すことで、様々な S/N 比の場合の測定値を得ることができる。

はじめの 10 秒の観測値を周期に合わせて集計することで、ACK を送信している時間帯のみを抽出し、平均電波強度を測定できる。最後の 10 秒の観測値の平均電波強度は、ノイズの電波強度である。これらの比 R が S/N 比を表す。中間の 10 秒は、一定レベルのノイズの中で、繰り返し ACK 信号を送信している。従って、山部分の平均電波強度と、その前後の谷部分の平均電波強度のそれぞれの平均を取り、その差 D を取得する。提案プロトコルでは、この差がしきい値 T_c 以上であれば ACK を検出する。中間の 10 秒には数万回の ACK 送信（の模倣）が含まれるため、T_c を適当な値（例えば 3 dB）に設定すると、S/N 比

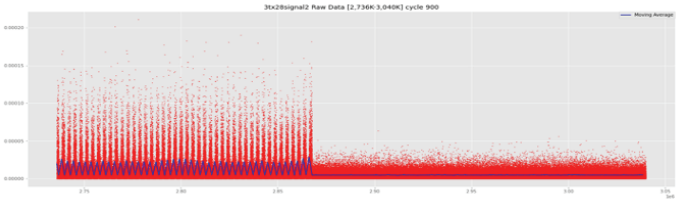

図 6　送信する信号パターンの例

が R のときに、正しく ACK を検出した割合、つまり真陽性の割合を計算できる。一方で、ノイズ信号のみを受信している場合に、ランダムな時刻を設定して ACK 検出を試みることで、ACK が送信されていないのに ACK を検出する誤り、つまり偽陽性の割合を計算できる。様々な S/N 比の場合に真陽性と偽陽性の割合を調べることで、提案手法が ACK を検出する精度を明らかにすることができる。

4.2　評価結果

BPSK (6 Mbps) を用いた場合の偽陽性に関する結果を 7 に示す。横軸は S/N 比に設定したしきい値 T_c の値であり、縦軸が ACK を検出する割合、つまり偽陽性の割合である。この図の実験ではノイズのみを受信したため、ACK は送信されていない。このときに誤って ACK を検出しないためには、T_c は概ね 1 dB よりも大きい必要があることがわかる。逆に、T_c を 1 dB よりも大きくとっておけば、近隣ノードがデータフレームを送信中に、ACK が送られていないのに誤って ACK を検出する可能性はほぼゼロであると見做せる。

次に、BPSK (6 Mbps) を用いた場合の真陽性の結果を 8 に示す。この図では、横軸は S/N 比 R であり、縦軸が ACK を検出した割合、つまり真陽性の割合である。各折線はしきい値 T_c の値を示しており、0 から 3.0 dB の値を 0.5 dB 刻みで設定した。本結果を見ると、T_c を 1 dB に設定した場合には、実際の S/N 比が 0 dB 程度あれば、100% 近い確率で ACK を検出できることになる。0 dB とは、信号とノイズが等倍であることを表すので、同程度の強度であれば、ほぼ ACK を検出できることになる。

しかし、この折線を見ると、各実験では 10000 回以上の ACK 信号（の模倣）から割合を計算しているにも関わらず、折れ線の形状が安定していない。これは、外部からの電波を遮断しているにも関わらず、電波には一定の不安定性が含まれていることを意味する。このため、一種の保険として T_c を 2 dB、或いは 3 dB とすることが考えられる。この場合には、実際の S/N 比が 2 dB、或いは 3 dB 程度なければ、ほぼ確実な ACK の受信は期待できないことになる。

図 9 に、QPSK (12 Mbps) の場合の真陽性の結果を示す。折線の形状が一層いびつになっており、不安定さが増すことがわかる。また、ACK を検出するために必要な S/N

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

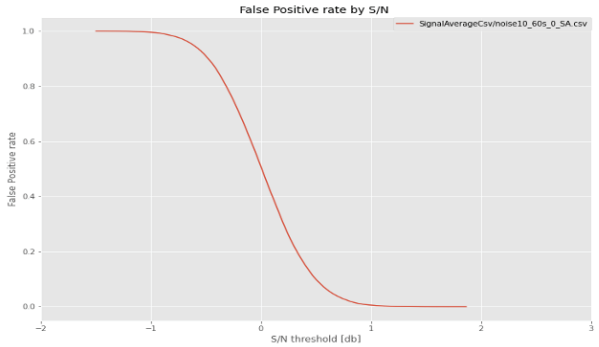

図 7　偽陽性（BPSK）

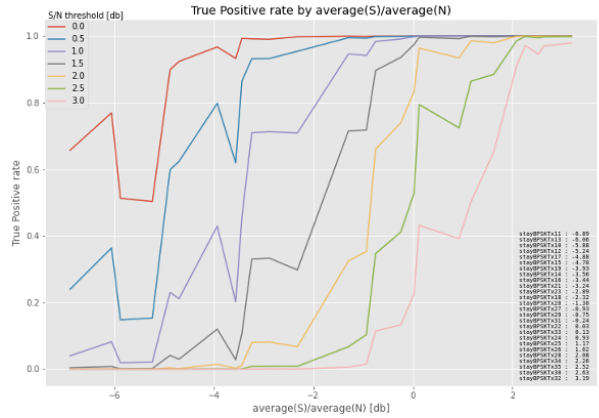

図 8　真陽性（BPSK）

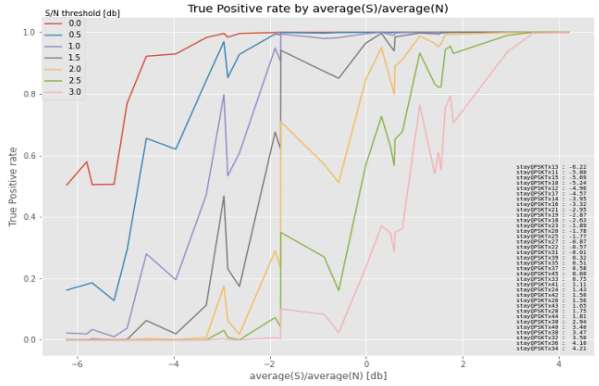

図 9　真陽性（QPSK）

比の値が上がり、T_c を 1 dB とした場合には 0〜1 dB、T_c を 3 dB とした場合には 4 dB 程度の S/N 比がなければ、確実に ACK を検出することができないことがわかる。一方の偽陽性であるが、これは、QPSK の場合でも図 7 に示した BPSK の場合とほぼ同じであった。つまり、本結果からは、偽陽性から判断すると T_c は 1 dB、或いは保険をとって 2〜3 dB でも良いが、QPSK の場合には、真陽性が下がる傾向にあると言える。

5. おわりに

本研究では、受信電波強度を用いて復調することなく ACK の到達を検知する技術に関して、ソフトウェア無線機を用いた実機実験を通じて、物理層における特性を測定した。外部の電波を遮断した室内で IEEE802.11 の ACK 信号を模した電波を発生させ、信号とノイズの比（S/N 比）を様々に変えて受信信号を測定した。測定データを基に ACK フレーム受信の真陽性と偽陽性を調べた。偽陽性については、ACK フレーム受信判定のしきい値 T_c を 1 dB とすれば、ACK フレームの誤検知は、実験結果からの数値上は、ほぼ 100%防げることが示された。一方で、真陽性に関しては、T_c を 1 dB とした場合には、S/N 比が 0 dB 程度であれば、実験結果からの数値上は、ほぼ 100%の ACK フレーム検知が可能であることが示された。しかし、無線測定の結果が不安定であることを考慮すると、ある種の保険として、T_c は 2〜3 dB 程度に設定した方がよい可能性も考えられた。また、QPSK の場合には、ACK フレームの検知にはより高い S/N 比が必要である可能性が示された。

結果としては、これまで我々がシミュレーションで用いてきた値である 3 dB は、T_c の値として適切であることが示された。一方で、電波を遮断した室内であるにも関わらず電波の不安定さが際立っており、実用にあたっては一定の ACK 検知誤りを想定しなければならない可能性は否めない。

今後の課題としては、電波の不安定さの程度を調べることが挙げられる。また、本技術をモバイル通信に適用することは自然であると考えられるため、基地局が移動した場合の性能を調べることも課題として挙げられる。

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 LANs,” in Proc. ACM SIGCOMM ’94, pp.212–225, 1994.
[2] 梅澤良斗, 吉廣卓哉, ”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,” 情報処理学会研究報告, Vol.2020-MBL-94, 2020.
[3] J.L. Sobrinho, R. de Haan, J.M. Brazio, “Why RTS-CTS Is Not Your Ideal Wireless LAN Multiple Access Protocol,” In Proc WCNC ’05, 2005.
[4] K. Xu, M. Garla, 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.
[5] M. Jainy et al., “Practical, Real-Time, Full Duplex Wireless,” In Proc. ACM MobiCom ’11, 2011.
[6] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, “A Survey of In-Band Full-Duplex Transmission: From the Perspective of PHY and MAC Layers, IEEE Communicationns Surveys & Tutorials, 17(4), 2017-2046, 2015.
[7] Z. Ding, X Lei, G.K. Karagiannidis, R. Schober, J¿Yuan, V. Bhagava, “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.

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

[8] J.J Garcia-Luna-Aceves, “Carrier Resolution Multiple Access,” In Proc. of PE-WASUM’17, 2017.
[9] J.J. Garcia-Luna-Aceves, “CTMA: A More Efficient Channel Acces Method for Networks with Hidden Terminals,” PE-WASUN’17, 2017.
[10] J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Busy-Tone Multiple Access with Colllision Avoidance and Detection for Ad-hoc Networks, In Proc. of IEEE ICNC2019, 2019.
[11] J.J. Garcia-Luna-Aceves, “Design and Analysis of Carrier-Sense Maultiple Access with COllision Avoidance and Detection,” Proc. ACM MSWIM’17, 2017.

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan