

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：14701

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22845

研究課題名（和文）全二重無線通信を用いて隠れ・晒し端末問題を解決する高効率通信プロトコルの開発

研究課題名（英文）A Communication Protocol to Eliminate Hidden/Exposed Terminal Problem with Full-duplex Wireless Communications

研究代表者

吉廣 卓哉（Yoshihiro, Takuya）

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：80362862

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広く普及しているIEEE802.11等の無線通信技術に採用されている媒体アクセス制御（MAC）手法であるCSMA/CAを、全二重無線通信技術と新開発のAck多重技術を組み合わせて拡張することで、無線通信黎明期より課題となってきた隠れ端末・晒し端末問題の影響を大幅に低減し、低遅延・高スループット通信を実現する手法を提案した。ソフトウェア無線機を用いた実機実験によりAckやCTSを変調せずに受信強度のみを用いて高精度に検知できることを示した。その上で、実機実験により求められた検知しきい値を用いたシミュレーション評価により、提案MACプロトコルが高い性能を持つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、世界で広く用いられているIEEE802.11において通信効率を著しく低下させている隠れ・晒し端末問題の悪影響を大幅に低減し、これまで以上に通信速度が求められる将来の通信方式を実現するための選択肢の一つとして、新たな技術を開発した。技術的にも新たな方法論として価値があり、波及効果が期待されるため社会的意義がある。本研究において提案した、全二重通信を応用したAckやCTSの多重受信技術の新規性は高く、本技術によってIEEE802.11を大幅に性能向上できる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a method to extend CSMA/CA, a medium access control (MAC) method used in widely used wireless communication technologies such as IEEE802.11, by combining full-duplex wireless communication technology and newly developed Ack multiplexing technology, to significantly reduce the effects of hidden and exposed terminals. The proposed method significantly reduces the impact of the hidden/exposed terminal problem, which has been an issue since the early days of wireless communications, and achieves low latency and high throughput communications. Experiments using a software radio system showed that the method can detect Ack and CTS with high accuracy using only the reception radio strength without modulation. Simulation evaluation using the detection thresholds obtained from the actual experiments showed that the proposed MAC protocol has high performance.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：CSMA/CA IEEE802.11 MACプロトコル 受信電波強度

### 1. 研究開始当初の背景

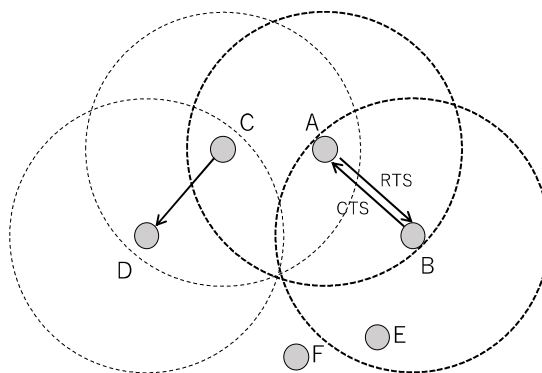
広く普及している IEEE 802.11 (Wi-Fi) を筆頭に、ISM バンドを用いる多くの通信プロトコルが CSMA/CA 方式に基づいたアクセス制御を採用している。しかし、CSMA/CA には隠れ端末問題・晒し端末問題と呼ばれる問題があり、特に通信端末の密集時には、通信帯域や遅延等の通信性能を著しく低下させる。しかし、無線通信の黎明期から現在に至るまで、隠れ端末・晒し端末問題は解決、あるいは本質的な改善がなされることなく、CSMA/CA がそのままの形で利用されている。一方、近年では全二重無線通信技術により送受信の同時実行が可能であることが示され、最大で2倍のスループットを実現できると期待されている。しかし、1ノード内で同時に送受信を実現する機能だけでは、隠れ端末・晒し端末問題に対する寄与はほとんどなく、単体ではアクセス制御効率の向上は期待できない。

### 2. 研究の目的

本研究では、全二重無線通信に、新開発する Ack 多重化技術を組み合わせることで、隠れ端末・晒し端末問題を完全解決するアクセス制御技術の開発を目指す。Ack 多重化は、簡単に言うと、他ノードからの電波信号を検知中であっても、受信信号強度 (RSSI) の変動から Ack を認識できる技術であり、近隣ノードが通信中でも Ack フレームの送受信を可能にする。全二重無線通信を組み合わせ、送信中でも周囲の送受信状況を監視することで、Ack 多重化によりフレーム送信が成功する状況を的確に判断し、適切なタイミングで送信を開始させる MAC プロトコルの設計が可能になる。設計する MAC プロトコルはフレーム衝突をほぼ起こさず、時空間利用効率を最適化できるため、有線通信に近い理想的な通信特性を実現する。

### 3. 研究の方法

まず、右図の例を用いて Ack 多重化の効果を説明する。ノード A から B にフレーム送信するとき、まず、A と B は RTS/CTS を交換し、これらを受信したノード C と E が送信を抑制する間に A が B にデータフレームを送り、B から A に Ack フレームが返る。通信 A B と C D は、A と C が同時に送信しても B と D は干渉せず受信可能なので同時実行できるはずだが、RTS/CTS の効果により C は送信を抑制してしまう。これが晒し端末問題である。実際には、D からの Ack は A の電波と干渉して C に受信されないため、RTS/CTS



の動作は妥当である。しかし、D C の Ack さえ受信できればこの問題は解決し、A B と C D の同時通信により通信の空間利用効率が向上する。Ack 多重化技術は、A B にフレーム送信中 (電波は C にも届く) でも、D C への Ack を受信できるようにする技術である。C が A の電波を検知中でも、(i) D から C への Ack フレーム送信タイミングで、(ii) C の受信電波強度が上昇すれば、D から Ack が送信されたことが判定できる。各シンボルの受信電力が確率的に変動すると仮定すれば、1%の確率的有意差で検定すれば、99%の確率で正しく Ack を検知できる。この Ack 多重化により、空間利用効率が大幅に向上し、CSMA/CA の通信効率が大幅に上がる。

上記は単純な例であり、この場合の空間利用効率の改善もせいぜい2倍程度である。しかし、全二重無線通信と Ack 多重化を併用すれば、隠れ・晒し端末問題が大幅に解消され、フレーム衝突が低減し、性能が大きく向上する MAC プロトコルが実現できる可能性がある。本手法では、データフレーム受信ノードの干渉範囲外 (図では B の円の外部) であれば、送信ノードのキャリアセンス範囲内 (図では A の円内) であっても、フレーム送信が可能である。全二重無線通信により、送信中でも近隣ノードの動作を監視できるため、例えば A は通信終了時に C がデータ送信中であることがわかり、適切に状態遷移できる。本手法では、受信ノードの干渉範囲のみに集中すれば良いため、干渉に関わる物理現象を簡潔にモデル化でき、例えば CTS の送信電力を調節するような方法で干渉によるフレーム衝突の有無を的確に判定できるようになる。従来は図の F の送信が B の受信に干渉するようなことが頻発するが、的確な衝突判定により通信損失が格段に減り、通信性能が格段に改善する。

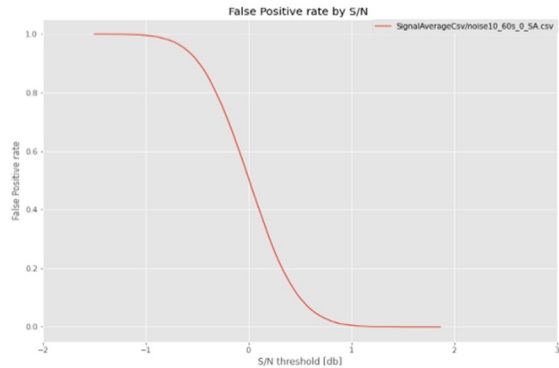
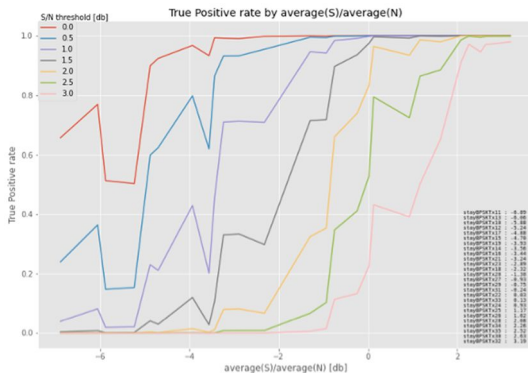
本課題は、大きく2つの部分に分かれる。(1)Ack 多重化法の確立と(2)理想的 MAC プロトコルの設計である。(1)は、ソフトウェア無線機を用いた物理層実験を通じて、他ノードの電波を受信中でも、受信した Ack/CTS フレームの RSSI が一定条件を満たせば Ack の送達判定が高精度で実現できることを実証する。(2)は、(1)で求めた Ack/CTS 送達可能条件や電波特性等を考慮してプロトコルの状態遷移を設計し、プロトコル仕様を確定した上で、Scenargie 等のネットワークシミュレータを用いてネットワークにおける通信性能を評価する

#### 4. 研究成果

(1)に関して、物理層における ACK や CTS の受信電波強度の特性を調べるために、我々はソフトウェア無線機を用いて IEEE802.11 の ACK や CTS を模倣し、送信機・受信機・ノイズ発生機として National Instruments 社の USRP2921 を用いた実機実験を行った。送受信コードは GNU Radio version 3.8 を用いた。IEEE802.11 の制御フレームを模倣するために、周波数帯域は 2.42GHz、帯域幅 20MHz、変調方式は BPSK と QPSK、冗長率は 1/2 とした。通信速度はそれぞれ 6Mbps 及び 12Mbps となる。送信時間は Ack フレームの送信時間である 76 マイクロ秒とし、送信ビット列はランダム生成した。実験には 3 台のソフトウェア無線機を用いた。送信機と受信機以外にノイズ発生器を設置し、IEEE802.11 を模した OFDM 信号を発生させた。外部からの電波を完全に遮断できる室内において、送信機と受信機を 5m 離れた位置に設置した。ノイズ発生機は送信機の隣、受信機から 5m の位置に設置した。USRP はいずれも、1.2m の台の上に設置した。

送信用無線機からは 76 マイクロ秒の周期で送信・停止を繰り返すように電波を発信した。ノイズ発生器は、ノイズ発生強度を変化させながら一定パターンで電波を発信した。その結果、受信ノードでは、少しずつ信号とノイズの比を変えながら、信号のみ・ノイズのみの場合の受信信号レベルを測定した上で、76 マイクロ秒の信号及び受信する前後の送信停止時間を 20M サンプル測定する操作を、数万回ずつ行った。数万回の試行から、信号部と停止部の平均値をとり、指定したしきい値を用いて Ack 検出判定を行った場合の Ack 検出割合を、正しく Ack 検出できた割合とした。また、ノイズのみの信号を用いて、ランダムな位置に 76 マイクロ秒の Ack が来たと想定した場合の Ack 検出割合を、Ack の誤検出割合とした。

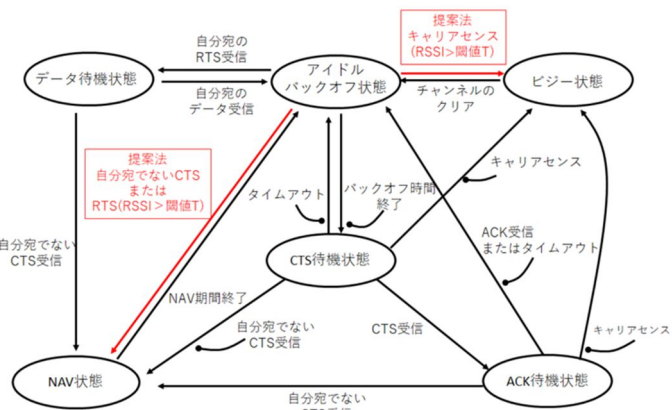
結果を下図に示す。下図(左)は、検出しきい値を様々に変化させた場合の Ack 検出割合である。しきい値を 0~3 dB の間で変化させたところ、どのしきい値でも、実際の SN 比(横軸)が大きくなれば、ほぼ 100%の確率で Ack 受信を判定できることがわかる。下図(右)はノイズのみの場合の Ack 誤検出割合であるが、これは、しきい値(横軸)を 1 dB 以上にすれば、誤検出はほぼ 0 になることがわかる。これらの結果から、しきい値は 1 dB 以上であればほとんど誤検出や検出漏れなく Ack を検出できることになる。実際には、念の為にしきい値をもう少し大きい値に設定するとすれば、しきい値は 2 dB 或いは 3dB 程度に設定すれば良いと考えられる。



次に、上記の Ack 検出手法を用いて CSMA/CA を効率化するプロトコルを設計し、その性能をネットワークシミュレータ Scenargie を用いて評価した。

提案プロトコルの設計は、従来の CSMA/CA を少し変更することで実現できる。CSMA/CA の状態遷移に対する、提案手法の変更点を右図に示す。

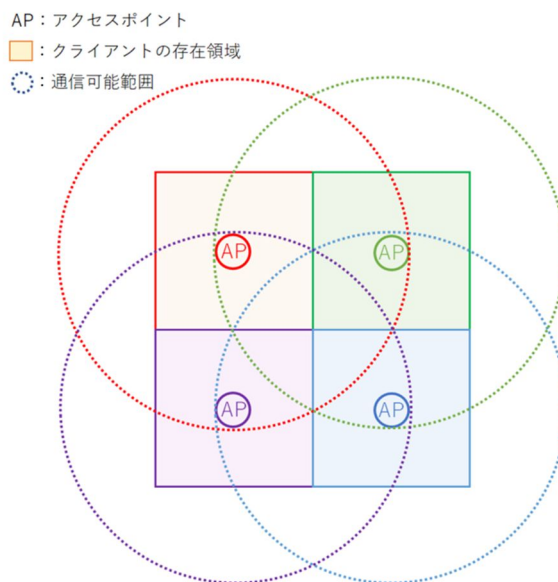
ノードは電源を投入したタイミグでアイドル・バックオフ状態から始まる。CSMA/CA と提案手法で異なる点は自分宛でない RTS を受信したときの動作とキャリアセンスの動作が異なる。CSMA/CA ではバックオフ、データ待機、CTS 待機、ACK 待機状態のいずれかであるときに自分宛でない RTS または CTS を受信したとき、NAV 状態へ遷移する。これに対して提案手法では、バックオフ状態にあるとき自分宛でない RTS を受信した送信ノードは、RSSI が閾値 T 以下であればビジー状態へ遷移せず、バックオフ状態を続行する。もし閾値 T 以上であれば、この後に送信されるデータフレームの RSSI も閾値 T 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 T 以上の場合、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、ビジー状態へと



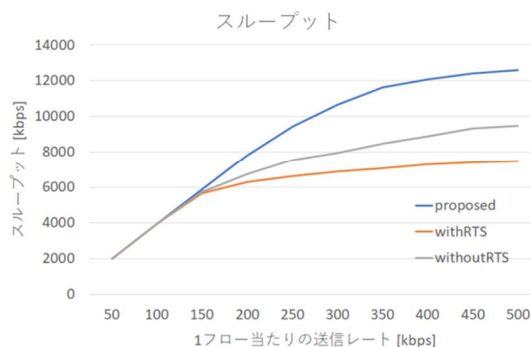
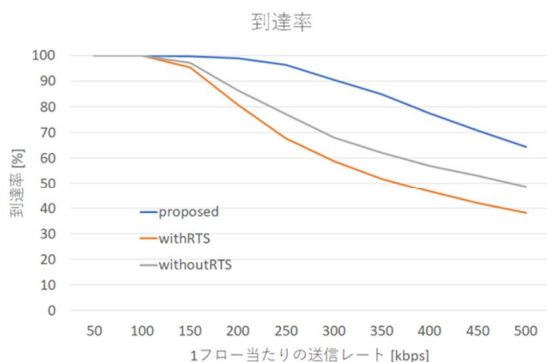
遷移する。

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 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 T 以上であれば、RSSI による ACK の検知ができない可能性があるため、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。

提案プロトコルをネットワークシミュレータ Scenargie に実装し、シミュレーション評価を行った。右図のように一辺 100m の正方形を 4 つ接続した形の領域に対して、それぞれ中央にアクセスポイント (AP) を設置する。各正方形領域にノードを 20 個ずつ設置し、送信レートを 50 kbps から 500 kbps まで、50 kbps 間隔で上昇させシミュレーションする。通信は CBR、通信規格は IEEE802.11g、通信速度は 6Mbps、送信電力は 10[dBm]とした。提案手法における RSSI のしきい値 T は 3 dB とした。



評価結果を下図に示す。RTS/CTS を伴わない CSMA、及び RTS/CTS を伴う CSMA/CA と比較した結果、通信フレームの到達率及びスループットともに、提案手法が大幅に性能向上していることがわかる。本報告に記載する結果以外にも、種々のパラメータ、及びシナリオでシミュレーション評価を行った。いずれの結果も、提案手法が性能向上できることを示すものであった。



以上のように、本研究では、Ack 多重化手法を新たに提案し、物理層における評価によって、しきい値 T を 1 dB 以上 (実際には余裕をもって 2~3 dB に設定すると良い) に設定すれば、高精度に Ack の検出が可能となり、誤り確率も十分に低くなることを検証した。また、提案手法をネットワークシミュレータ Scenargie に実装した。シミュレーション評価を通じて、しきい値 T を 3 dB に設定した場合に、従来手法と比較して大きく性能向上できることを検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoshito Umezawa, Takuya Yoshihiro
2. 発表標題 On improving efficiency of CSMA/CA with RSSI-based control-frame detection
3. 学会等名 International Workshop on Informatics (IWIN2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅澤良斗, 吉廣卓哉
2. 発表標題 RSSIを用いた制御フレーム検知によるCSMA/CAの高効率化に関する一検討
3. 学会等名 第94回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム研究会 (MBL)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅澤良斗, 吉廣卓哉
2. 発表標題 RSSIを用いた制御フレーム検知によるCSMA/CAの高効率化に関する一検討
3. 学会等名 2019年度情報処理学会 関西支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅澤良斗, 吉廣卓哉
2. 発表標題 RSSIを用いた制御フレーム検知によるCSMA/CAの高効率化
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM02019)シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八田海, 吉廣卓哉
2. 発表標題 CSMA/CAにおける受信信号強度による制御フレーム検知手法への動的しきい値導入の一検討
3. 学会等名 第101回情報処理学会モバイルコンピューティングと新社会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅澤良人, 吉廣卓哉
2. 発表標題 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の実機評価
3. 学会等名 第190回情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八田海, 吉廣卓哉
2. 発表標題 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手法への動的しきい値の導入
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOM02022)シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------