

コグニティブ無線における効率的なアクセス制御方式 An Effective Access Control Mechanism for Cognitive Radio

今野 功†
Isao Konno

西山 大樹†
Hiroki Nishiyama

加藤 寧†
Nei Kato

1 はじめに

近年の無線通信技術の発展に伴い、デジタルテレビ放送や無線 LAN (Local Area Network) といった様々な無線通信システムが登場してきた。これまでの無線通信システムは、無線帯域の固定割り当てを前提としているため、新しい無線通信システムが登場する度に、無線帯域を割り当てる必要がある。無線帯域の固定割り当ては安定した通信を可能にするが、新しい無線通信システムに割り当てるためのまとまった無線帯域を確保することが困難になるという無線資源の枯渇問題が深刻になってきている。一方、多くの無線通信システムに割り当てられた無線帯域の利用率は必ずしも 100% ではなく、ホワイトスペースと呼ばれる時間的・空間的な空きが存在する。そこで、このホワイトスペースを利用した無線帯域の二次利用により通信を行うコグニティブ無線に注目が集まってきた [1] [2]。コグニティブ無線とは、周辺の電波利用状況を認識し、状況に応じて最適な帯域や方式を自ら選択し、通信を行う方法である。CU (Cognitive radio User) が、無線帯域の優先的利用権を持つ PS (Primary System) が通信を行っていないホワイトスペースを利用して通信を行うことで、無線帯域の高効率利用が可能になる。

コグニティブ無線が注目を集めるようになった背景には、それを実現するための無線機の開発技術の進歩がある。ソフトウェア無線と呼ばれる技術により、制御ソフトウェアを書き換えることで、利用する帯域を切り替えることができ、単一のハードウェアで通常の無線機より幅広い帯域に対応することが可能になった。

コグニティブ無線において最優先されることは、CU が無線帯域を利用することにより起こりうる PS のパフォーマンスの悪化や電波干渉の発生を回避することである。PS への干渉を回避するためには、MAC (Media Access Control) 層による帯域管理が重要である [3]。帯域管理には、周辺の無線帯域利用状況の把握、無線帯域の切り替え、CU 間の周波数共用等が含まれる。本稿では MAC 層による帯域管理に注目し、効率性の高いアクセス制御方式の提案を行う。

本稿の構成を以下に示す。第 2 章ではコグニティブ無線の MAC 層に関する従来研究について述べる。第 3 章では、従来手法である HC-MAC とその問題点について述べる。第 4 章では、従来手法の問題点を改善する手法の提案を行う。第 5 章では、従来手法と提案手法の比較を行い、有効性を確認する。最後に、第 6 章でまとめを行う。

2 従来手法

本章では MAC 層の従来手法として、Transmitter detection と、IEEE802.22 で標準化が進められている WRAN (Wireless Regional Area Network) について述べる。

2.1 Transmitter detection

Transmitter detection とは、PS から発信される微弱な信号を検出する手法であり、Matched filter detection, Energy detection, Feature detection の 3 種類がある [4]。以下に、それぞれの特徴をまとめる。

2.1.1 Matched filter detection

各 CU は受信した信号のプリアンブルなどから PS の信号の検出を行う。検出力が高く、短時間で検出を行うことが可能である。ただし、PS の信号の変調方式やパケットフォーマットなどに関する事前知識が必要となる。また、PS の種類が増えるほど必要な事前知識も増える。

2.1.2 Energy detection

各 CU は受信した電波の電力 (受信電力) から信号の検出を行う。受信電力のみで判断するため、計算コストが低く、観測時間は短くて済む。ただし、電波ノイズの影響を受けやすく、信号を誤検出する可能性がある。

2.1.3 Feature detection

変調信号が周期性や周期定常性を持っているという特徴を利用して検出を行う手法である。検出力が高く、電波ノイズにも強い。ただし、信号の特徴を検出するために観測時間を長くする必要がある。

以上の通り、PS から発信される微弱信号の有無だけから無線帯域の空き状況を判断することには多くの困難が存在する。

2.2 IEEE802.22 WRAN

前述の通り、各 Transmitter detection を単独で行って無線帯域の空き状況を判断することには多くの困難が存在するが、WRAN ではそれらを組み合わせて利用することで、無線帯域の空き情報の推測を試みている。WRAN とは、半径数十 km 程度をカバーする地域無線ネットワークの MAC 層と PHY (PHYsical) 層の標準化技術である。そして、その中では、検出力の低い Energy detection と検出力の高い Feature detection を併用する手法が策定されている [5]。

図 1 に WRAN による通信の例を示す。各 CU は BS (Base Station) からの信号に合わせて Energy detection によ

† 東北大学大学院情報科学研究科, Graduate School of Information Sciences, Tohoku University.

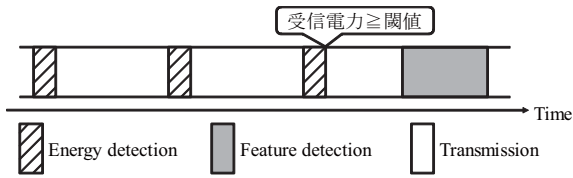


図 1: WRAN による通信の例

る検出を定期的に行い、受信電力が閾値を越えた場合は、Feature detection による検出を行う。図 1 では、3 回目の Energy detection で受信電力が閾値を越えたため、Feature detection による検出を行っている。Feature detection の結果を最終的な PS の検出結果とし、PS を検出した場合は帯域を切り替えるなどの対応をとる。このように 2 つの検出を組み合わせるにより検出力を高めると同時に、Feature detection の回数を少なくすることで計算コストと時間コストを抑えることが出来る。

なお、実際の通信は図 1 の Transmission において行われ、BS から CU へのダウンストリームには TDM (Time Division Multiplex) , CU から BS へのアップストリームには TDMA (Time Division Multiple Access) が用いられる。

Energy detection による検出では CU と PS の信号を区別することができないため、各 CU が BS と同期を取り、同じタイミングで検出を行う必要がある。従って、通信インフラが存在しないアドホックな環境では、BS の存在を前提とする WRAN の利用は困難である。

3 HC-MAC

3.1 特徴

HC-MAC (Hardware-Constrained cognitive MAC) は、各端末間で同期を必要とせず、アドホックな環境でも利用可能な自律分散型 MAC プロトコルである [6]。また、従来の MAC プロトコルではハードウェアによる制限の考慮が不十分であったが、HC-MAC では帯域観測のプロセスと多重化の概念を導入し、利用できる帯域幅についてハードウェアによる制限を考慮した仕様となっている。

HC-MAC では利用できる帯域として、単一の制御チャンネルと合計 N 個の近接したデータチャンネルを想定している。制御チャンネルは PS の利用帯域とは異なる周波数帯であり、CU が制御フレームの交換に用いる。一方、データチャンネルの周波数帯は PS のそれと重なっており、PS への干渉を避けながら利用しなければならない。また、データチャンネルは全て同じ帯域幅を持ち、それぞれのデータチャンネル同士は干渉しないものとする。なお、一回の帯域観測で観測可能な帯域幅はデータチャンネル 1 つ分である。また、利用可能な複数のデータチャンネルを束ねて利用する多重化に対応しているが、多重化できるデータチャンネル数に制限がある。

3.2 アクセス制御方式

HC-MAC は IEEE802.11 で標準化された DCF (Distributed Coordination Function) モードにおける RTS (Request To Send)/CTS (Clear To Send) 方式に準じて動作する

[7]。RTS/CTS 方式とは、隠れ端末問題のような CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) が有効に機能しない伝搬状況に対応するための方式である。RTS/CTS 方式では、送信端末が RTS を送信し、RTS を受信した目的端末が CTS を返信し、CTS を受信した送信端末が DATA を送信する。この時、RTS と CTS を受信した周辺端末は NAV (Network Allocation Vector) を設定し、その間の送信を自粛することで衝突を回避する。また、RTS を受信した目的端末が NAV 期間である場合や DATA を受信できない場合は、CTS の返信を行わない。

HC-MAC には競争期間 (Contention)、検出期間 (Sensing)、送信期間 (Transmission) の 3 つの期間が存在する。競争期間では、送信権の獲得競争により送信を行う CU が決定される。検出期間では、HC-MAC の帯域観測の終了条件に基づき、データチャンネルの観測とその結果の交換が行われる。送信期間では、検出期間で利用可能と判断されたデータチャンネルを多重化して通信が行われる。図 2 に HC-MAC による通信の例を示す。同図は検出期間の終了条件がデータチャンネル 2 の観測後に満足された場合であり、もし終了条件が満足されていなければ、検出期間が継続され、データチャンネル 3 以降の検出が行われることになる。なお、図を簡単にするため観測時間 T_0 やデータ送信可能時間 T_D の長さは実際とは異なっている。

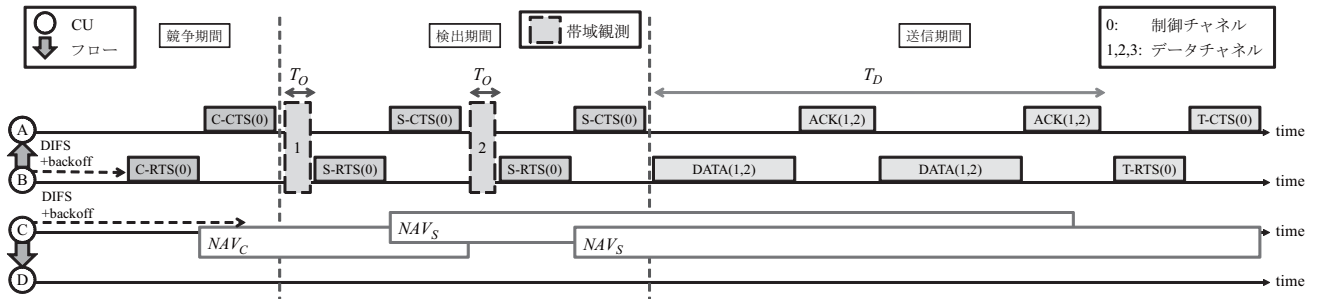
3.2.1 競争期間

競争期間では、送信権の獲得競争により送信を行う CU が決定される。データの送信を行いたい各 CU は、制御チャンネル上でまず DIFS (DCF Inter Frame Space) のキャリア・センスを行い、さらに乱数で決定したバックオフ時間のキャリア・センスを行う。そして、初めにバックオフ時間が終了した CU が送信 CU として制御チャンネルの利用を許可される。次に送信 CU は制御チャンネル上で、C-RTS (Contention-RTS) を送信する。C-RTS を受信した目的 CU は、自身が受信が可能な状況であれば、SIFS (Short Inter Frame Space) の待ち時間後に C-CTS (Contention-CTS) を制御チャンネル上で送信する。送信 CU が C-CTS を受信したところで、送信権の獲得が確定し、検出期間に移行する。なお、C-RTS/C-CTS による NAV を NAV_C とすると、その長さは T_0 と検出期間で送信する S-RTS (Sensing-RTS)/S-CTS (Sensing-CTS) の交換時間の和に等しい。

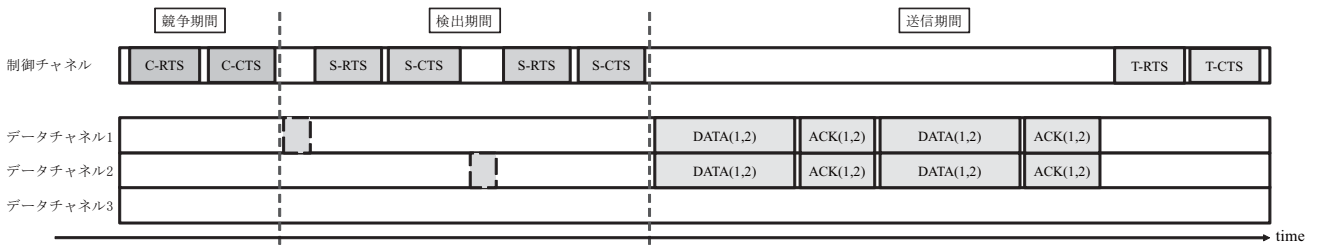
3.2.2 検出期間

検出期間では、送受信双方の CU がデータチャンネル 1 から順にチャンネルを観測し、その都度 S-RTS で観測結果を交換する。このとき既に送信権を獲得済みであるため、SIFS の待ち時間でフレームを送信可能である。データチャンネルの帯域観測は終了条件が満たされるまで繰り返され、終了条件が満足された時点で送信期間へと移行する。なお、S-RTS/S-CTS による NAV を NAV_S とすると、その長さは T_0 と T_D 、S-RTS/S-CTS の交換時間の和に等しい。

検出期間におけるデータチャンネルの観測では、PS への干渉を避けるために十分な観測時間 T_0 を割く必要がある。観測を長く続ければ、利用可能なデータチャンネルを多く検出できる可能性があるが、観測の度に T_0 と S-RTS/S-CTS の交換時間の待ち時間が生じるため、適切な



(a) メッセージ・データのやりとり



(b) チャンネルのアクセス状況

図 2: HC-MAC による通信

終了条件が必要となる。

HC-MAC では、1 つのデータチャンネルについて観測が終わる度に、報償関数と呼ばれる関数を用いて評価値と期待値が算出され、検出期間の終了条件に用いている。評価値とは、その時点での観測結果と観測回数から算出され、観測回数が少なく検出された利用可能チャンネル数が多いほど、その値は大きくなる。一方、期待値とは、次のチャンネルを調べた場合に確率的に予想される評価値に等しい。期待値が現在の評価値を下回った場合、次のチャンネルの帯域観測を実行しても多重化できるチャンネル数が増加する可能性が低いので、帯域観測を終了する。

3.2.3 送信期間

送信期間では、検出期間において利用可能と判断されたデータチャンネルを利用して、ACK による到着確認を行いながら DATA の送信が行われる。チャンネルを観測してから長時間が経過すると、チャンネルの利用状況は変化するため、送信期間に移行してからチャンネルを利用できる時間をデータ送信可能時間 T_D と定義すると、PS との電波干渉が生じる可能性を低減するために、 T_D は PS の 1 回当たりの平均利用時間より十分に短い必要がある。DATA と ACK の送信は T_D の時間内であれば、繰り返し送信することができる。

T_D が経過した後は T-RTS (Transmission-RTS)/T-CTS (Transmission-CTS) を送信し、周辺端末に通信完了を通知する。T-RTS/T-CTS を受信した周辺端末は NAV を終了させ、送信する DATA がある場合は競争期間に移行する。

3.3 問題点

HC-MAC では図 2 から明らかな通り、送信 CU 以外の待機 CU は NAV_S が終了するか T-RTS/T-CTS を受信す

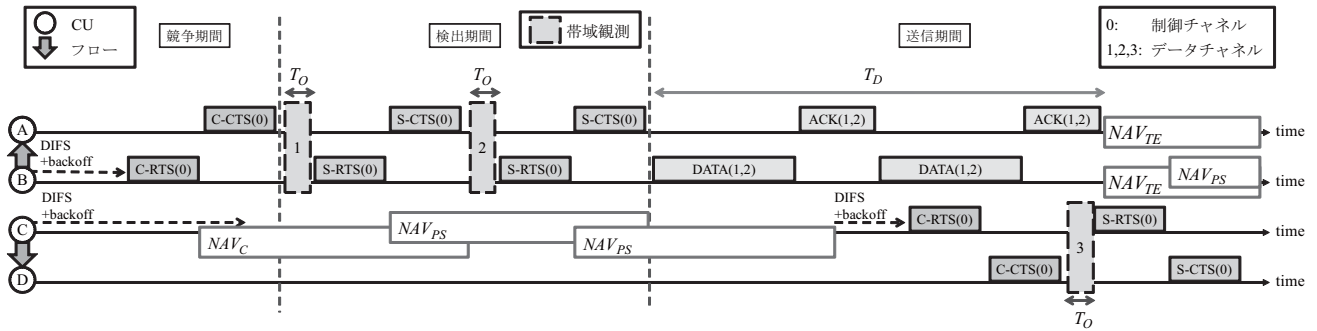
るまではデータチャンネルはもちろん制御チャンネルすら利用することができない。これにより、CU 間の衝突は確かに回避可能である。しかし、制御チャンネルが利用できなければ、待機 CU は競争期間を始めることができないため、空きデータチャンネルがある場合でも、それを待機 CU が使うことは出来ない。一般に、HC-MAC による通信においては送信期間が最も長くなる場合が多く、待機 CU の待ち時間も長いので、この影響は大きくなる傾向がある。帯域の有効利用を実現するためには、この問題の解決が重要である。

4 提案手法

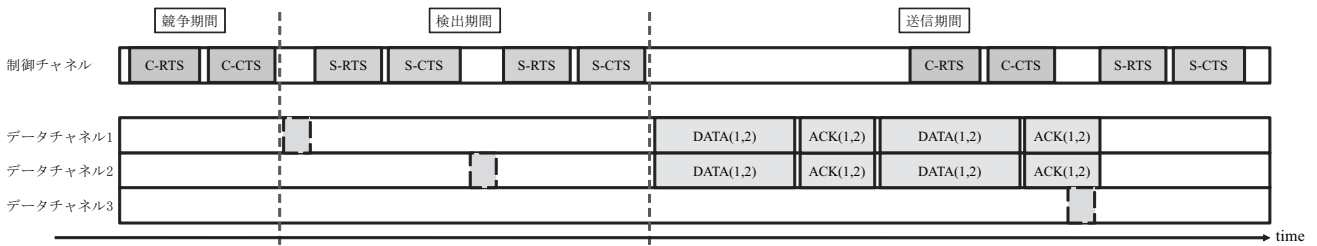
前章で述べた通り、HC-MAC には送信権の獲得に敗れた CU の待ち時間が長いという欠点がある。そこで、その時間を短縮することにより帯域利用率を向上させる手法を提案する。

4.1 フローの併行化

HC-MAC の送信期間に注目すると、図 2 から明らかな通り、DATA と ACK によるデータ送信中は、制御チャンネルは利用されていない。従って、この間、周辺端末は NAV_S により制御チャンネルを含む全チャンネルで送信を自粛しているが、制御チャンネルを利用して電波干渉による衝突は発生しない。そこで、 NAV_S を短縮することにより周辺端末が競争期間に移行するまでの時間を短くすることを考える。HC-MAC では NAV_S に T_D が含まれていたが、これを T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間の和 (NAV_{PS}) に変更する。 NAV_{PS} が終了すると、周辺端末は速やかに競争期間に移行し、新たに送信権を獲得した CU は検出期間、送信期間へと移行していく。大抵の場合、送信期



(a) メッセージ・データのやりとり



(b) チャンネルのアクセス状況

図 3: 提案手法による通信

間に対して競争期間と検出期間は短いため、これにより複数の CU が異なるデータチャンネルで同時に通信を行うことが可能になる。

HC-MAC では、 T_D の終了後、周辺端末の NAV を終了させるために T-RTS/T-CTS の送信を行っていたが、提案手法では周辺端末の NAV はこのとき既に終了しているため、T-RTS/T-CTS の送信は不要である。しかしながら、データを送信していた CU が T_D 終了直後にそのまま競争期間に移行してしまうと、バックオフ制御による競争原理の公平性が失われる恐れや、制御チャンネル上で他の RTS/CTS と衝突する恐れがある。そのため、 T_D の終了後に T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間分の NAV_{TE} を設定し、その終了後に競争期間に移行することとする。これにより、競争期間中や検出期間中である CU が存在すれば NAV_{TE} による待機中に必ず一度はその CU の RTS/CTS を受信できるため、公平性の消失や衝突を回避できる。

以上のように複数のフローの同時通信を可能にする仕組みをフローの併行化と呼ぶこととする。

4.2 チャンネル観測の効率化

フローの併行化により、複数のフローが併行する提案手法においては、帯域観測時にチャンネルを利用している端末が PS ではなく CU のフローである場合も存在する。CU のフローが利用しているデータチャンネルを観測することは時間の無駄であるため、先行するフローが送信期間を終了する時間を予測し、その時刻まではそのチャンネルの観測を避けるべきである。

そこで、S-RTS/S-CTS を受信した時、その受信時刻と、そのメッセージ内に記録されたチャンネル番号(メッセージを送信した CU によって利用される可能性があるチャンネル)を記録し、受信した時刻から利用予測時間 T_C

が経過するまで、そのチャンネルを利用しないという制約を加える。この制約により、新しく検出期間を開始する CU は、先行する CU のフローによって利用されていないデータチャンネルから帯域観測を始めることが可能になる。ただし、全てのデータチャンネルについて T_C 時間が経過していない場合は、データチャンネル 1 から順に帯域観測を行うこととする。なお、データチャンネル上の NAV の役割を担う T_C の長さとしては、先行するフローがデータチャンネルを利用する時間の予測値、つまり観測開始チャンネルで S-RTS/S-CTS を送信してから T_D が終了するまでの時間が適当であると考えられる。以上のように無駄なチャンネル観測を省く仕組みを、チャンネル観測の効率化と呼ぶこととする。

4.3 提案手法におけるアクセス制御方式

図 3 に提案手法による通信の様子を示す。各期間における制御は次に述べる通りである。

4.3.1 競争期間

HC-MAC と同様に、C-RTS/C-CTS による送信権の獲得競争を行う。ただし、チャンネル観測の効率化により C-RTS/C-CTS には観測を開始するチャンネル番号を記載して送信し、チャンネル番号の大きい方を観測開始チャンネルとする。

4.3.2 検出期間

帯域観測と観測結果の交換は HC-MAC と同様であるが、待機 CU が設定する NAV は NAV_{PS} であり、待機時間が短縮される。また、HC-MAC の観測開始チャンネルはデータチャンネル 1 で固定であったが、提案手法ではチャ

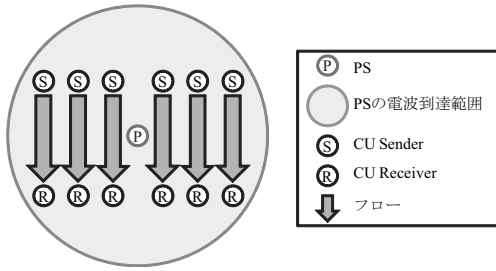


図 4: 実験トポロジ

表 1: シミュレーションパラメータ

データチャンネル数 N	12
データチャンネルのビットレート	1[Mbps]
データチャンネルの有効確率	50[%]
PS の 1 回当たりの平均利用時間	0.250[s]
帯域観測時間 T_O	0.001[s]
多重化可能チャンネル数	6
シミュレーション時間 τ	50[s]
シミュレーション回数	100

ネル観測の効率化により、競争期間で決定したチャンネルから観測を開始し、データチャンネルの番号順に帯域観測を行う。検出期間の終了条件は HC-MAC と同じである。

4.3.3 送信期間

HC-MAC と同様に、 T_D の時間内であれば DATA, ACK を連続して送信可能である。ただし、待機 CU の NAV を NAV_{PS} に変更して待機時間を短縮したため、T-RTS/T-CTS は送信しない。待機 CU は NAV_{PS} が終了したところで、競争期間へと移行できる。

5 性能評価

5.1 シミュレーション環境

提案手法の性能を評価するために、ネットワークシミュレータ NS-2[8] による実験を行った。なお、提案手法については、フローの併行化のみを利用した手法を Proposal、フローの併行化とチャンネル観測の効率化を利用した手法を Proposal+ とし、それぞれの比較も行った。図 4 に実験トポロジを示す。PS を中心とし、その電波到達範囲内の CU のフロー数を 1 から 6 へと増加させる。CU のフロー同士は近くに位置しているため、周辺 CU の各 RTS/CTS による NAV の影響を受ける。また、端末は移動しないものとした。比較対象には HC-MAC を用いた。

表 1 にシミュレーションパラメータを示す。1 回の通信における PS の平均利用時間と、チャンネル有効確率は、全データチャンネルで等しい。データ送信可能時間 T_D は、HC-MAC における定義に従い 10 回分の T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間とした。また、データチャンネルの利用予測時間 T_C は、 T_D と 5 回分の T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間の合計とした。これは、多重化可能チャンネル数が 6 であるため、検出期間中に観測するチャンネル数は 6 前後になる場合が多く、その場合は、観測開始チャンネルの S-RTS/S-CTS を送信してから検出期間を終了するまでに帯域観測を 5 回行われるからである。なお、IFS やバックオフ制御に用いるタイムスロットなどのパラメータは IEEE802.11b[7] における値と同じである。

評価指標には総スループットと帯域利用率を用いる。総スループットとは、各フローのスループットの合計で

あり、式 (1) で定義される。

$$B_{sum} = \sum_{i=1}^f \frac{S_{D,i}}{\tau} \quad (1)$$

ここで f はフロー数、 $S_{D,i}$ はフロー i が受信した DATA フレームの合計サイズ、 τ はシミュレーション時間である。帯域利用率は、各データチャンネルで PS が利用していない時間において、CU が通信に利用した時間の平均であり、式 (2) で定義される。

$$R_{ave} = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^N \frac{U_{C,j}}{\tau - U_{P,j}} \times 100 \quad (2)$$

N はデータチャンネル数、 $U_{P,j}$ と $U_{C,j}$ はそれぞれデータチャンネル j を PS が利用した時間と CU が利用した時間である。なお、CU 同士、または PS と CU で電波干渉による衝突が発生した時間分は、 $U_{C,j}$ に含めていない。

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 性能比較

図 5(a) に総スループットを、図 5(b) に帯域利用率を示す。まず HC-MAC において、フロー数が増加しても結果が変わらないことが確認できる。これは、1 つのフローが完全に終了するまで、他の CU が通信できないためである。一方、フローの併行化を可能にした提案手法では、フロー数が 2 以上の場合において HC-MAC より高い性能を達成出来ていることが分かる。また、Proposal+ と Proposal の比較から、チャンネル観測の効率化を有効にすることにより性能の向上が可能であることが分かる。なお、フロー数が 1 の場合においては性能がほんの僅かに下がっているが、これは T_D の終了後に設定している NAV_{TE} が HC-MAC における T-RTS/T-CTS の交換時間よりも若干長く、待機時間が微増するためである。

Proposal 並びに Proposal+ では、両指標においてフロー数 3 でほぼグラフが頭打ちになり、フロー数 4 以上は僅かに減少していることが確認できる。フロー数 3 で頭打ちになるのは、フローの併行化により併行化できるフロー数の最大数が 3 であることに起因しており、これについては後述する。一方、フロー数が 4 以上になると僅かに減少するのは、フロー数が増加することにより競争期間内における C-RTS の衝突回数が増加し、競争期間が長くなるためである。

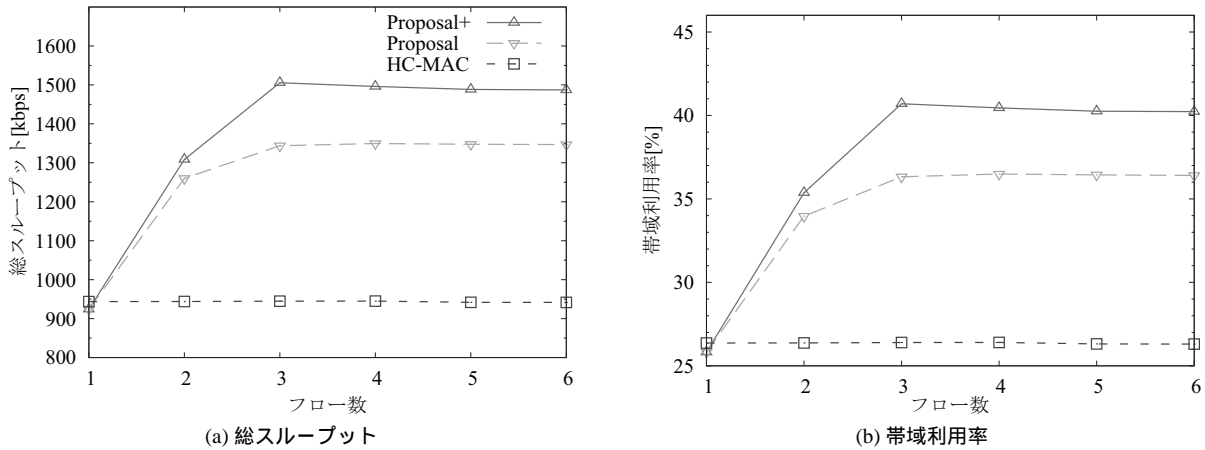


図 5: 実験結果

5.2.2 併行可能な最大フロー数

併行可能な最大フロー数とは、同時刻に検出期間中または送信期間中である CU のフロー数の最大値を指す。一方、提案手法においては、同時刻に検出期間中であるフローの最大数は 1 で不変であるのに対し、同時刻に送信期間中であるフローの最大数は T_D と検出期間の長さに依存する。つまり、 T_D が長い場合、またはチャンネル観測回数が少なく検出期間が短い場合、併行化できるフロー数が増加する。

実験では、 T_D の長さは 10 回分の T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間とした。また、提案手法では第 1 のフローが送信期間に移行してから第 2 のフローの競争期間が始まるまで、 NAV_{PS} の分だけ時間がかかる。このため、第 1 のフローと併行化できる残り時間は 9 回分の T_O と S-RTS/S-CTS の交換時間となる。ここで、第 2 のフローが検出期間中に行う帯域観測について考えると、その回数は多重化可能チャンネル数 6 と同程度になると考えられるため、残り時間の多くが消費されてしまう。それ故、第 3 のフローと第 1 及び第 2 のフローの併行化は可能であるが、それが上限となることは容易に想像できる。また、第 1 と第 2 のフローの併行化による性能の向上度合と、それに加えて第 3 のフローが併行化された時の性能向上度合を考えると、前者が後者より大きいことは明らかであり、実際に図 5 の実験結果も同様の傾向を示していることが確認できる。

6 おわりに

近年、無線通信技術の発展と無線通信システムの増加により、新たにまとまった無線帯域を確保することが困難になるという無線資源の枯渇が問題になってきている。そこで、本稿では無線帯域の二次利用を試みるコグニティブ無線に注目した。コグニティブ無線においては、MAC 層による帯域管理が重要であり、本稿では自律分散型である HC-MAC に注目した。HC-MAC には、同時に複数のフローが通信できないため、帯域利用率が低いといった問題があった。そこで、提案手法では HC-MAC に改良を加え、複数フローが併行して通信可能な方式を提案し、性能評価実験により、帯域利用率の向上を実現

できることを示した。

今後は、実際に存在する PS を想定した上での、フロー間の公平性や遅延に関する検討が課題である。また、今回提案手法では HC-MAC と同様の検出期間終了条件を利用したが、これには併行化されたフローの存在によるチャンネルの有効確率の低下が考慮されておらず、無駄な観測を誘発する原因となっている。従って、チャンネルの有効確率の変化に対応した終了条件の導入により、さらなる性能の向上が期待できる。

参考文献

- [1] Joseph Mitola III et al., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," IEEE Personal Commun., Vol.6, No.4, pp.13–18 (1999).
- [2] Simon Haykin, "Cognitive radio: Brain-Empowered Wireless Communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol.23, No.2, pp.201–220 (2005).
- [3] Ian F. Akyildiz et al., "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," IEEE Commun. Mag., Vol.46, No.4, pp.40–48 (2008).
- [4] Danijela Cabric et al., "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios," Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems and Comput., Vol.1, pp.772–776 (2004).
- [5] IEEE 802.22-06/0003r3 "A PHY/MAC Proposal for IEEE 802.22 WRAN Systems, Part 2: The Cognitive MAC," (2006).
- [6] Juncheng Jia et al., "HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management," IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol.26, No.1, pp.106–117 (2008).
- [7] 守倉正博, 久保田周治, "改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書," インプレス (2005).
- [8] ns2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.