

An Adaptive Media Access Control Mechanism for Cognitive Radio

This material is presented to ensure timely dissemination of scholarly and technical work. Copyright and all rights therein are retained by authors or by other copyright holders. All persons copying this information are expected to adhere to the terms and constraints invoked by each author's copyright. In most cases, these works may not be reposted without the explicit permission of the copyright holder.

Citation:

Isao Konno, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "An Adaptive Media Access Control Mechanism for Cognitive Radio," *IEICE Transactions on Communications*, vol. J94-B, no. 2, pp. 253-263, Feb. 2011.

URL:

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j94-b_2_253&category=B&year=2011&lang=E&abst=j

コグニティブ無線のための適応型メディアアクセス制御方式

今野 功^{†*} 西山 大樹[†] 加藤 寧[†]

An Adaptive Media Access Control Mechanism for Cognitive Radio

Isao KONNO^{†*}, Hiroki NISHIYAMA[†], and Nei KATO[†]

あらまし 無線通信システムの多様化と利用拡大を受け、限りある無線資源の有効利用が叫ばれるようになった今日、コグニティブ無線への期待が高まっている。ホワイト・スペースと呼ばれる周波数的・時間的・空間的な空白を有効利用するコグニティブ無線では、周辺の電波利用状況を認識して適切な周波数帯域や通信方式の選択を行う MAC プロトコルが重要である。コグニティブ無線のための MAC プロトコルはこれまでに複数提案されているが、周辺の電波利用状況に関する事前知識を保持していることを前提としたものがほとんどであり、事前知識が無い場合や集中管理局が存在しないアドホック環境などを考慮に入れた手法は極めて少ない。そこで本研究では、そのような環境においても有効に動作する自律分散型 MAC プロトコルの提案を行う。特に、数少ない先行研究の中でもハードウェアの制限を考慮するなど実効性を重視した HC-MAC に着目する。本論文では、HC-MAC の問題点を指摘し、その改善方法について述べるとともに、忘却曲線の利用により事前知識を必要とすることなく周囲の環境に適応可能な MAC プロトコルを提案する。さらに、シミュレーションにより提案手法の有効性を評価する。

キーワード コグニティブ無線, MAC, アドホック, 忘却曲線.

1. ま え が き

インターネットの爆発的な普及に伴い、ユビキタスネットワークの実現が現実味を帯びてくる中、無線通信システムは高速・大容量化と多様化の道を突き進んでいる。既に広く普及した WLAN (Wireless Local Area Network; IEEE 802.11) [1] をはじめとし、WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access; IEEE 802.16) [2] の展開が進む一方、携帯電話に至っては LTE (Long Term Evolution) [3] に代表されるように第 3 世代から第 4 世代に向けた動きが活発化している。一般に、無線通信において高速・大容量通信を実現するためには、広くまとまった周波数帯の固定割り当てが必要となる。しかし、無線通信に利用しやすい周波数帯のほとんどは既に既存の無線通信システムに割り当てられており、新たにまとまった帯域を確保することが困難な状況にある。これに伴い、ホワイ

ト・スペースと呼ばれる時間的・空間的・周波数的な空きを二次利用を試みるコグニティブ無線 [4, 5] に注目が集まっている。

コグニティブ無線では、既存の無線通信システムを PS (Primary System) と呼び、PS が利用する周波数帯におけるホワイト・スペースを利用して通信を行うユーザを CU (Cognitive radio User) と呼んで区別する。PS が周波数帯の優先的な利用権を持つため、CU は PS に影響を与えることなく通信を行う必要がある。特に、CU が発する電波による干渉など、PS の通信効率や通信品質の低下を招く行為は避けなければならない。そのためには、周辺の電波利用状況を正確に把握して適切な周波数帯域や通信方式を決定する MAC (Media Access Control) プロトコルが必要となる [6]。本研究では、このコグニティブ無線のための MAC プロトコルとして、集中管理局を必要としない自律分散型 MAC プロトコルである HC-MAC に着目した。HC-MAC の特徴は実装時のハードウェアレベルでの制限を考慮して設計されている点にあるが、同時に通信可能な CU 数が限られているといった問題を抱えている。そこで、この問題の改善策について検討・提案を行ったが [7, 8]、実環境での利用を想定した

[†] 東北大学 大学院情報科学研究科
〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Aramaki-aza Aoba 6-3-09, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan.

* 現在, (株) 日立製作所.

場合、CU が周辺の電波利用状況に関しての正確な事前知識を保持していなければ提案手法が有効に動作しないなどの問題が残されていた。そこで本論文では、事前知識を必要とすることなく通信を行う方法として、直近の電波利用状況の履歴を用いた忘却曲線による学習を取り入れた MAC プロトコルの提案を行う。

本論文は次のように構成される。2. では、自律分散型の先行研究でありハードウェアレベルの制限までも考慮に入れたプロトコルである HC-MAC について、その概要と問題点について述べる。3. では、HC-MAC が抱える問題を解決する一手法として、複数のフローを併行化する方法を示し、更に同手法を事前知識なしでも有効に動作させるための改善方法の提案を行う。4. では提案手法の有効性について評価・検証を行い、最後に 5. で本論文を総括する。

2. 関連研究

本節では、はじめに任意の PS をモデル化する一般的な方法について述べた後、HC-MAC について詳しく紹介する。

2.1 PS のモデル化

対象とする PS を特定のものに限定しないコグニティブ無線方式では、PS の通信によって生じる電波利用状況の変化を考慮するために、PS のモデル化を行う必要がある。既存の無線通信システムの多くは、利用できる周波数帯を帯域幅が等しいいくつかのチャンネルに分割して使用している。そのため、PS がチャンネルを占有している状態を占有 (Busy) 状態、PS が利用しておらず CU が利用可能な状態を有効 (Idle) 状態とする 2 状態マルコフモデル (図 1) が PS のモデルとして一般に用いられる。また、状態の遷移が頻繁に起こる場合を考慮する際には、遷移確率が指数分布に従う連続時間マルコフ連鎖モデルを用いるのが一般的であり、コグニティブ無線に関する数多くの研究で用いられている [9, 10]。本研究でも、頻発する状態遷移によって CU がチャンネルを長時間利用できない環境、つまりはコグニティブ無線にとって効率的な通信が困難な環境を考慮するために、従来研究と同様、遷移確率が指数分布に従う連続時間マルコフ連鎖モデルを用いる。図 1 において、 λ と μ は連続時間マルコフ連鎖モデルの遷移速度を表し、この値を変更することにより様々な無線通信システムの電波利用状況を再現することができる。なお、連続時間マルコフ連鎖モデルの状態確率や遷移確率などは、遷移速度を用いた時

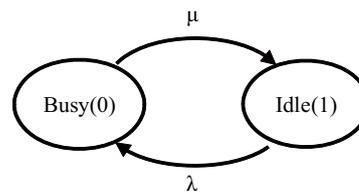


図 1 マルコフ連鎖モデル
Fig. 1 Markov chain model

間の関数として表される [11, 12]。

2.2 HC-MAC の概要

アドホックな環境での利用を考慮した HC-MAC (Hardware-Constrained cognitive MAC) [13] は、各端末間で同期を必要としない自律分散型の MAC プロトコルである。また、従来の MAC プロトコルではハードウェアにおける制限の考慮が不十分であったのに対し、HC-MAC ではチャンネルのセンシングプロセスや多重化において、ハードウェアレベルでの制限を考慮した仕様となっている。HC-MAC は、単一の制御チャンネルと複数の重複しない隣接したデータチャンネルを用いて通信を行う。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 間で制御フレームを交換するために用いられる。一方、後述の通り PS との干渉を避けるように設計されているため、各データチャンネルは PS の利用帯域と重なっていても構わない。なお、全てのデータチャンネルは同じ帯域幅であり、複数チャンネルの多重化にも対応することができる。

HC-MAC の最大の特徴は、ハードウェアにおける制限を考慮している点であるが、具体的には次のような制約条件を考慮した設計となっている。1 つ目は、データチャンネルのセンシングに関する制約である。コグニティブ無線の中には、1 回の観測で一度に複数のチャンネルのセンシングを行うことを前提とするものがあるが、これは必ずしも一般的とは言えない。多くの無線機では 1 回の観測でセンシング可能なチャンネル数は 1 であり、広い周波数帯をセンシングする際には 1 チャンネルずつ順番にセンシングするために長い時間が必要となる。HC-MAC は、このような制約条件を前提として考慮している。2 つ目は、多重化できるチャンネルの帯域幅とフラグメント数に上限を設けている点である。ここで、フラグメントとは連続したデータチャンネルの集合であり、例えばデータチャンネル 1 から 4 の内、1 と 2 と 4 が利用可能であれば、フラグメント数は 2 である。この制約条件は、チャンネルの多重化

において存在する実際の制約を一般化させて反映させたものである。

HC-MAC におけるアクセス制御手順は、IEEE 802.11 で標準化されている RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 方式 [1, 14] に準じている。RTS/CTS 方式は、送信を自粛する期間 (NAV: Network Allocation Vector) を利用することにより、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) が有効に機能しない隠れ端末問題などへの対応を可能にした方式である。RTS/CTS 方式では、まず DATA を送信したい端末が RTS を送信し、受信側が CTS を返信する。送信側は CTS を受信した時点で送信権を得ることになり、続いて DATA の送信が行われる。この際、RTS または CTS をオーバーヒヤリングした周辺端末は NAV を設定し、その期間中の送信を自粛することで衝突の回避を試みる。ここで、オーバーヒヤリングとは、DATA を送受信する端末の通信範囲内に位置する端末が RTS/CTS などのフレームを受信することである。以下では、HC-MAC のアクセス制御手順の重要な部分について詳しく述べる。

図 2 に HC-MAC における通信の例を示す。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、仮に終了条件が満足されなければ、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、図の簡略化のために、観測時間 T_O やデータ送信可能時間 T_D の長さの相対的な長短は無視している。各期間における制御は以下に述べる通りである。

2.2.1 競争期間 (Contention)

競争期間では、前述の RTS/CTS 方式に準じ、C-RTS/C-CTS (Contention-RTS/Contention-CTS) を用いて制御チャンネル上で送信権の獲得競争が行われ、送信を行う CU が決定される。競争に勝った CU が C-CTS を受信したところで CU の送信権獲得が確定し、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_O と検出期間で送信する S-RTS/S-CTS (Sensing-RTS/Sensing-CTS) の交換時間 T_S の和に等しい。C-RTS の NAV は C-CTS が返信される時間を含むため、実際には C-CTS の NAV よりも長い。以下ではこの差分を省略する。

2.2.2 検出期間 (Sensing)

検出期間では、送受信双方の CU がデータチャンネル 1 から順に観測を行い、その都度 S-RTS/S-CTS によ

り観測結果を交換するとともに、終了条件が満足されるか否かを確認し、満足されていれば検出期間を終了して送信期間へと移行する。観測を行ったとき、送受信双方の CU で信号を検出しなかった場合、当該チャンネルは利用可能な Idle 状態であると判断される。一方、送受信の CU のどちらか片方でも信号を検出した場合は、当該チャンネルは利用不可な Busy 状態であると判断される。なお、S-RTS/S-CTS による NAV を NAV_S とすると、その長さは T_D と T-RTS/T-CTS (Transmission-RTS/Transmission-CTS) の交換時間 T_T の和に等しい。各データチャンネルの観測においては、PS への干渉を避けるために十分な長さの観測時間 T_O を割く必要がある。検出期間を長くすれば利用可能なチャンネルをより多く検出できる可能性があるが、観測の度に T_O と T_S の待ち時間が生じるため、適切な終了条件が必要となる。この検出期間における終了条件については後で詳しく述べる。

2.2.3 送信期間 (Transmission)

送信期間では、検出期間において送受信双方において Idle 状態と判断されたデータチャンネルを利用し、ACK による到着確認を行いながら DATA の送信が行われる。DATA と ACK の送信はデータ送信可能時間 T_D の時間内であれば、繰り返し行うことができる。ここで、データ送信可能時間は、送信期間に移行してからデータチャンネルを利用できる時間を意味する。データチャンネルを観測した時刻から長い時間が経過すると周囲の電波利用状況は変化すると考えられるため、PS との電波干渉が生じる可能性を低減させるためには、 T_D は十分に短い必要がある。 T_D が経過した後は T-RTS/T-CTS を送信し、周辺の CU に通信が完了したことを通知する。T-RTS/T-CTS をオーバーヒヤリングした周辺の CU 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。

以上のように、HC-MAC では、各 CU は競争期間により公平に送信権を取得し、検出期間では送受信者間で利用可能なデータチャンネルを特定し、そのチャンネルを用いて送信期間で DATA 送信と通信完了通知を行う。そのため、各期間において集中管理局が不要であり、アドホックな環境にも適用可能である。

2.2.4 検出期間の終了条件

ここでは、検出期間の終了を判断するための終了条件について述べる。検出期間において、多重化するデータチャンネル数とその観測に必要な時間のトレードオフを考慮した適切な終了条件が必要であることは先

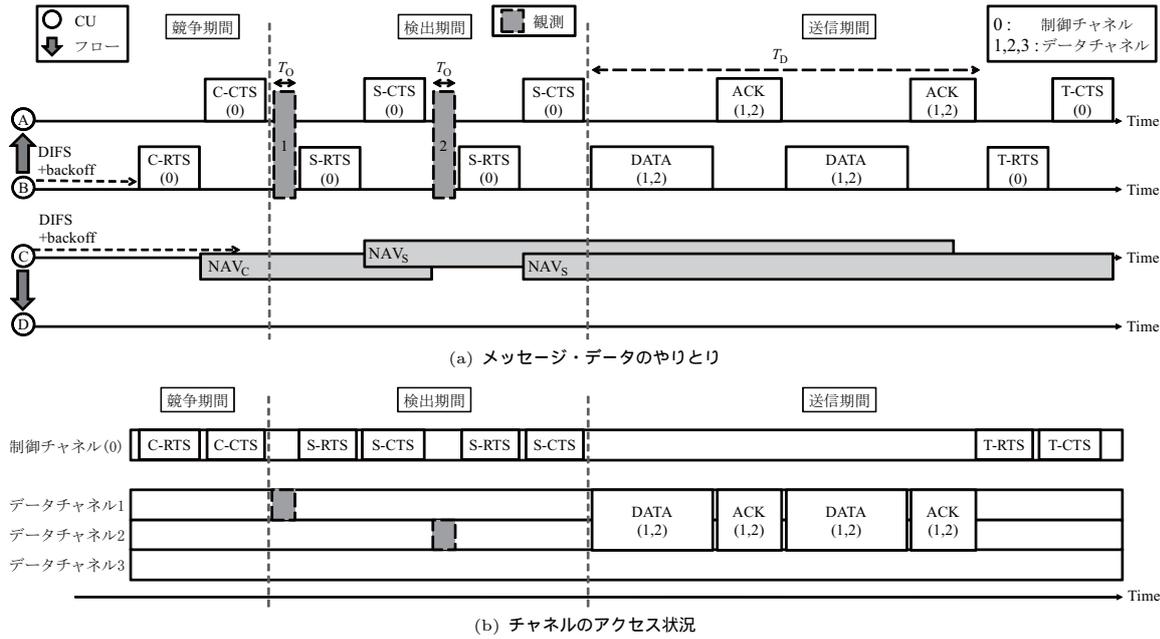


図 2 HC-MAC による通信の例
Fig. 2 Message exchange and channel access in HC-MAC

に述べた通りである．実際に HC-MAC では，各データチャンネルについて S-RTS/S-CTS を用いて観測結果を交換する際，次の観測により空きチャンネルを発見できる可能性を定量評価するために，報償関数を用いて評価値と期待値を算出し，その大小関係により検出期間を終了するか否かを決定している．評価値とは，その時点において観測により検出された Idle 状態のチャンネル数とそれまでに行った観測の回数から算出され，観測回数が少なく，検出された Idle 状態の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，次のチャンネルを観測した場合に期待される評価値に相当する値であり， n 回の観測を行った時点における評価値を $V_n(x_1, \dots, x_n)$ とすると，期待値 E は，チャンネルが Busy 状態である確率（占有確率 P_B ）と Idle 状態である確率（有効確率 P_I ）を用いて次式により算出される．

$$\begin{aligned}
 E[V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, X_{n+1})] \\
 &= P_B \cdot V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 0) \\
 &\quad + P_I \cdot V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 1)
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで， x_n は各データチャンネルの観測結果であり，0 ならば Busy 状態，1 ならば Idle 状態を意味する．HC-MAC では，算出した期待値が現在の評価値を下

回った場合，次のデータチャンネルは Busy 状態である可能性が高く，観測を行っても多重化可能なデータチャンネル数が増えることは期待できないと判断し，検出期間を終了する．

2.3 HC-MAC の問題点

図 2 から明らかな通り，HC-MAC では，ある 1 つの CU が通信を行っている間，他の全ての CU は待機中であり，NAV_S が終了するか T-RTS/T-CTS をオーバーヒヤリングするまでは，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．このため，CU 間の衝突は確実に回避可能であるが，その一方で，待機 CU が利用可能な空きデータチャンネルが存在する場合であっても，制御チャンネル上で待機 CU 同士が送信権獲得競争を行うことができないため，どの待機 CU も空きデータチャンネルを利用することができない．一般に，HC-MAC における通信では送信期間が占める割合が大きいため，待機 CU の待ち時間も長く，結果としてこの問題がチャンネルの利用効率に与える影響も大きくなる．

以上の通り，HC-MAC の最大の問題は，データチャンネルの空き具合に関わらず常に 1 つの CU しか通信を行うことができないことであり，競合する CU のフロー（送信 CU と受信 CU のペア）の数が増加するに

従い、1 フロー当たりのスループットは大きく減少してしまう。コグニティブ無線のそもそもの目的であるホワイト・スペースの有効利用を実現するためには、HC-MAC において複数フローの同時通信を可能にする方法の開発が急務であり、本研究はこの実現を目指すものである。なお、HC-MAC が抱える別の問題として、CU が移動する場合に隠れ端末問題が発生する可能性があることが挙げられるが、本研究では CU が移動しない場合を想定し、隠れ端末問題については扱わないこととする。

3. 適応型 MAC プロトコルの提案

前節で述べた HC-MAC の問題点を解決する方法として、まずは NAV の長さの調整により複数フローの同時通信を可能にする手法について提案する。続いて、その手法を周辺の電波利用状況に関する事前知識が無い環境においても有効に動作させる技術を提案する。なお、本論文では、第一の提案技術を「フローの併行化」、第二の提案技術を「適応型選択法」と呼ぶこととする。

3.1 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、 T_D の期間は制御チャンネルは通信中の CU によって利用されていない。つまり、この間は待機 CU が制御チャンネルを利用しても、PS はもちろん通信中の CU に対して電波干渉や衝突といった影響を全く与えない。そこで、HC-MAC においてはこの期間ずっと待機 CU 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、フローの併行化では図 3 に示すように待機 CU が競争期間に移行して制御チャンネル上で送信権の獲得競争を行えるようにする。これは、 NAV_S を短縮することにより実現することができる。HC-MAC では NAV_S に T_D が含まれていたが、これを T_O と T_S の和 NAV_{PS} に変更する。 NAV_{PS} が終了すると、周辺の CU 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。多くの場合、送信期間は競争期間と検出期間に対して十分長いため、以上のプロセスの繰り返しにより、複数の CU のフローが異なるデータチャンネルを用いて同時に通信を行うことを実現することができる。

フローの併行化を導入した時は、T-RTS/T-CTS の送信は不要となる。これは、T-RTS/T-CTS はそもそも HC-MAC において T_D の終了後に周辺の CU に

表 1 NAV の長さ
Table 1 The length of NAVs

	HC-MAC	提案手法
C-RTS/C-CTS	$T_O + T_S$	$T_O + T_S$
S-RTS/S-CTS	$T_D + T_T$	$T_O + T_S$
T-RTS/T-CTS	NAV を終了	不要
NAV_{TE}	不要	$T_O + T_S$

NAV_S を終了させるように通知を出すために用いられていたためであり、フローの併行化の下では周辺の CU はこの時既に NAV_{PS} を終了しているために通知を出す必要がないからである。しかしながら、DATA の送受信をしていた 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危険性や、制御チャンネル上で他の RTS/CTS と衝突する可能性がある。そこで、フローの併行化導入時は、 T_D の終了後に T_O と T_S の和に相当する 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 が存在する場合は、 NAV_{TE} による待機中に必ず一度はその CU の RTS/CTS を受信することになるため、公平性の消失や衝突の発生を回避することが可能になる。表 1 に、提案手法と HC-MAC における各 NAV の長さの違いを示す。

フローの併行化により、チャンネルの利用効率と 1 フロー当たりのスループットの増加を実現することができるが、新たな問題も発生する。それは、Busy 状態のデータチャンネルを利用しているのが PS の場合と CU の場合の 2 つが起こり得ることである。HC-MAC においては、いかなる時も 1 つの送受信 CU のペアのみがデータチャンネルを観測・利用できるため、もしチャンネルが Busy 状態と判断されれば、それは PS がチャンネルを利用していることを意味した。しかし、フローの併行化の下においては、Busy 状態のチャンネルを使用している端末が CU である可能性は十分ある。チャンネルを利用しているのが PS であるか CU であるかは、観測の効率性や検出期間の終了条件の算出に大きな影響を及ぼす。一方、一般にチャンネルの観測は受信電力の強さに基づくキャリア・センスで行われるため、PS の信号と CU の信号を区別することは困難であり、他の何らかの対策が求められることになる。実際、著者らはこれまでに、データチャンネル毎に有効確率を算出して有効確率が高い順に観測を行うことにより、チャンネルの観測効率を高める方法などについて検討を行ってきた [8]。しかし、PS 及び CU によるデータチャネ

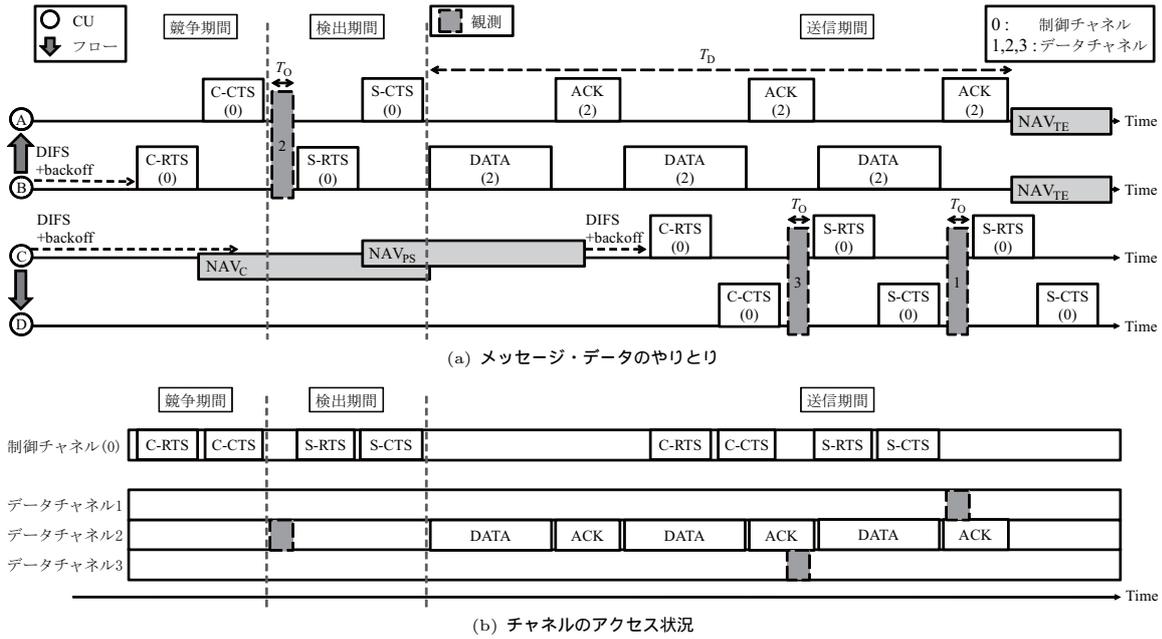


図 3 適応型選択法による通信の例
 Fig. 3 Message exchange and channel access in the proposed adaptive channel selection

ルの利用をマルコフ連鎖モデルでモデル化できること、あるいは遷移速度などのパラメータ値が既知であることなどを前提としており、実用上の観点から、周囲の電波利用状況に関する事前知識を必要としない新たな方法の考案が求められていた。次小節では、この問題を解決するための適応型選択法について述べる。

3.2 適応型選択法

周囲の電波利用状況に関する事前知識を用いず、その時々電波利用状況を予測する方法として、過去の観測履歴からチャンネルの有効確率を算出し、観測チャンネルの選択や検出期間の終了条件判定に利用する手法を提案する。

まず、チャンネルの有効確率を求める方法について述べる。チャンネルの状態を把握するための方法としては、検出期間における CU 自身による観測と他の CU が発信する S-RTS/S-CTS のオーバヒヤリングの 2 つの方法が考えられる。そこでまずは、各 CU はデータチャンネル毎に状態、時刻及び観測方法を保持する観測履歴リストを用意するものとする。観測履歴リストは観測の度に更新され、データチャンネル毎に最大で L_{\max} 個まで保持するものとする。電波利用状況は時間経過と共に変化するため、観測履歴が古くなるほど現在の状

態と異なっている可能性が高い。そのため、チャンネルの状態予測の過程において、信頼性が高いと思われる直近の観測履歴ほど大きく反映されるようにするために、エビングハウスの忘却曲線 [15] による重み付けを行う。忘却曲線は、人間の記憶が時間の経過と共に大きく減少していくことをモデル化したものであり、本論文では定数 A を用いて $F(t) = \exp(-At)$ と定義する。ここで、 A は忘却曲線定数、 t は経過時間である。この忘却曲線を利用し、データチャンネル a に対して保持している $m_a \leq L_{\max}$ なる m_a 個の観測履歴から、データチャンネル a の有効確率 P_1^a を算出する。最新の観測履歴から順に $1, 2, \dots, m_a$ とすると、 $i (1 \leq i \leq m_a)$ 番目の忘却定数 λ_i^a は次式で表される。

$$\lambda_i^a = F(-t_i^a) = \exp(-At_i^a) \quad (2)$$

ここで、 t_i^a は i 番目の観測履歴が得られた時刻からの経過時間である。データチャンネル a の有効確率 P_1^a は忘却定数を用いて次のように算出される。

$$P_1^a = \frac{1}{\lambda_0^a} (s_1^a \lambda_1^a + s_2^a \lambda_2^a + \dots + s_{m_a}^a \lambda_{m_a}^a) \quad (3)$$

ここで、 λ_0^a は正規化のための係数であり λ_1^a から $\lambda_{m_a}^a$ の総和である。 s_i^a は i 番目の観測結果であり、Busy 状

態であれば 0, Idle 状態であれば 1 である。なお, 観測履歴が少ない場合は P_1^a の算出が困難なため, L_{\min} 個集まるまでは $P_1^a = 0.5$ として扱う。また, 時間的に古い履歴を使ってしまうを防ぐために, T_{lim} 時間以上前に得られた履歴については, 例え保持可能な最大観測履歴数 L_{\max} 以内であっても, 破棄する。

次に, 式 (3) によって得られる各データチャネルの P_1^a に従い, 検出期間において送受信 CU が観測するチャネルを決定する方法について述べる。基本的には, 各 CU は観測履歴に従って各チャネルの有効確率 P_1^a を算出し, P_1^a が最も大きいデータチャネルを次の観測候補として選択する。ただし, オーバーヒヤリングによる Idle 状態の観測が履歴に含まれているチャネルについては, オーバーヒヤリングされた信号を送信した CU によってそのチャネルが利用されている可能性が高いため, チャネルが利用されている可能性がある間は観測候補として選択しないこととする。送受信双方の CU が上記手順によりそれぞれ観測候補のチャネルを選択した後は, 送受信 CU 間で S-RTS/S-CTS を介してそのデータチャネル番号と P_1^a の情報をお互いに交換する。そして, P_1^a が大きい方のデータチャネルを最終的に観測する候補として決定する。なお, この時も観測候補として決定したデータチャネルの P_1^a が送受信双方の CU で異なる場合は, 大きい方の値を P_1^a として採用する。

最後に, 送受信双方の CU で共有した P_1^a を用いて, 検出期間の終了判定を行う方法について述べる。終了条件そのものは HC-MAC と同様に期待値と評価値の比較に基づくが, 期待値と評価値の算出には, 式 (1) の代わりに次式を用いる。

$$\begin{aligned} E[V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, X_{n+1})] \\ = P_B^a \cdot V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 0) \\ + P_1^a \cdot V_{n+1}(x_1, \dots, x_n, 1) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, 占有確率 P_B^a は P_1^a の余事象であり, $(1 - P_1^a)$ に等しい。忘却曲線と観測履歴の利用により, PS や周辺の電波利用状況に関する事前知識を必要とすることなく, 図 3 に示すように検出期間において適切にデータチャネル選択及び終了判定を行うことが可能になる。なお, フローの併行化では各 RTS/CTS に格納する情報が HC-MAC と完全に同じであるが, 適応型選択法では, 次に観測するチャネルの候補とその有効確率を C-RTS/C-CTS と S-RTS/S-CTS に格納する必要がある。

3.3 アクセス制御の流れ

提案手法における通信の例を図 3 に示す。同図は, 先行するフローがデータチャネル 2 の観測のみで検出期間を終了し, 次のフローがその時点の観測履歴に基づいてデータチャネル 3 とデータチャネル 1 の観測を行った場合を示しており, P_1^a が高い順に観測が行われていることを確認できる。以下, 提案手法における各期間の制御についてまとめる。

3.3.1 競争期間

競争期間では, HC-MAC と同様に送信権の獲得競争が行われる。適応型選択法を用いる場合は, 選択した観測開始チャネルに関する情報を C-RTS/C-CTS を介して交換し, 観測開始チャネルを決定する。

3.3.2 検出期間

検出期間では, HC-MAC と同様に利用可能なデータチャネルの検出が行われる。フローの併行化のみを用いる場合は, データチャネル 1 から番号順に観測が行われるが, 適応型選択法を合わせて用いる場合は, 1 回の観測が終わる度に次の観測対象として選択したデータチャネルに関する情報を S-RTS/S-CTS を介して交換し, 次に観測するデータチャネルを決定する。また, 交換の度に終了条件の判定を行い, 終了条件が満たされれば検出期間を終了して送信期間へと移行する。なお, S-RTS/S-CTS によって設定される NAV は NAV_{PS} であり, HC-MAC と比較して待機時間が短縮されていることが図から確認できる。

3.3.3 送信期間

送信期間では, HC-MAC と同様に DATA の送信を行う。フローの併行化により, 待機中の CU がセットする NAV_{PS} は HC-MAC の NAV_S と比較して短くなっており, 速やかに競争期間へ移ることができる。また, HC-MAC とは異なり, 通信中の送受信 CU は T-RTS/T-CTS の交換を行うことなく送信期間を終了し, 代わりに NAV_{TE} を設定し, その間に通信範囲内の他フローから NAV の更新要求を受けなければ競争期間へと移行することができる。

4. 性能評価

提案手法の性能評価を行うため, ネットワークシミュレータ NS-2 (Network Simulator version 2.33) [16] を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたネットワークトポロジを図 4 に示す。PS を中心とした電波到達範囲内に CU のフローが配置されており, CU のフローはお互いに NAV の影響を受ける。

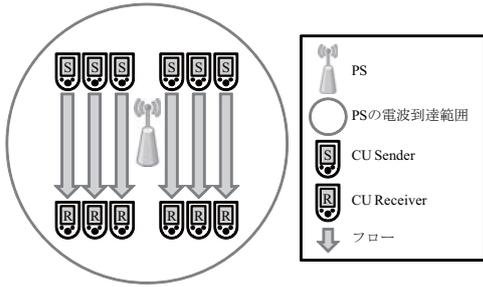


図4 ネットワークトポロジ
Fig. 4 Network topology

シミュレーションに用いた各パラメータの値を表2に示す。データ送信可能時間 T_D は, [13] に従って T_O と T_S の和の10倍とし, PSの平均チャンネル利用時間の十分の一程度となるように設定した。また, IFS (Inter Frame Space) やバックオフ制御に用いるスロット・タイムなどのパラメータは IEEE 802.11b [14] と同じ値を用いている。シミュレーションは2つに分かれており, シミュレーション1ではチャンネルの利用効率や観測効率, シミュレーション2では周囲の電波利用状況の変化に対する適応性について評価する。

4.1 チャンネルの利用効率と観測効率

シミュレーション1では, チャンネルの利用効率や観測効率について検証する。PSとしては, 表3に示すように占有確率と有効確率がともに50%で等しいマルコフ連鎖モデルを仮定した。CUのフロー数を1から6へ変化させ, 総スループットとセンシング効率を計測した。総スループットは次式で定義される全CUのフローのスループットの合計値であり, 値が大きいほどチャンネルの利用効率が高いことを意味する。

$$B_{sum} = \sum_{i=1}^f \frac{R_{D,i}}{\tau} \quad (5)$$

ここで f はフロー数, $R_{D,i}$ はフロー i が受信した合計 DATA サイズ, τ はシミュレーション時間である。なお, HC-MAC 及び提案手法は IEEE 802.11 [1] に従っており, $R_{D,i}$ の値は 802.11 のフレームのデータ部分を積算することで求められる。一方, センシング効率とは次式で定義される値であり, 各 CU のフローにおける総観測回数に対する Idle 状態の観測回数の割合の平均であり, 値が大きいほど観測効率が高いことを意味する。

表2 シミュレーションパラメータ
Table 2 Simulation parameters

データチャンネル数 N	18
制御・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観測時間 T_O	0.001 [s]
多重化可能帯域幅	6 チャンネル
多重化可能フラグメント数	2
最少保持数 L_{min}	10
最大保持数 L_{max}	20
保持期間 T_{lim}	0.5 [s]
忘却曲線定数 A	50
シミュレーション回数	100

表3 PSのマルコフ連鎖モデル(シミュレーション1)
Table 3 Markov chain model used in simulation 1

時間 [s]	λ	μ	P_B	P_I
0-30	5	5	50%	50%

$$S_{eff} = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^f \frac{I_j}{B_j + I_j} \quad (6)$$

ここで, f はフロー数, I_j 及び B_j はそれぞれフロー j において Idle 状態または Busy 状態を観測した回数である。シミュレーションでは, フローの併行化と適応型選択法を用いた手法 Proposal(Adaptive), フローの併行化のみを用いた手法 Proposal(Parallel), そして HC-MAC の3つについて評価を行った。なお, Proposal(Parallel) と HC-MAC については, それぞれの理想的な場合について評価を行うために, PSのチャンネルの占有確率と有効確率が既知であるものとして扱った。

図5(a)に総スループット, 図5(b)にセンシング効率を示す。両図から, まず, HC-MAC ではフロー数が増加しても総スループット及びセンシング効率がほぼ一定であることが確認できる。これは, 既に2.3で指摘した通り, HC-MAC では複数フローが同時に通信を行うことができず, 存在するフロー数に関わらず通信中のフローは常に1つだからである。従って, 各フローのスループットはフロー数の増加とともに減少することになる。なお, センシング効率がほぼ0.5であるのは, PSのモデルの有効確率が50%であり, データチャンネルの観測が1から番号順に行われるためである。

フローの併行化のみを用いた Proposal(Parallel) においては, 複数のフローが存在する場合, HC-MAC と比較して総スループットが増加していることが確認できる。これは, フローの併行化により複数のフローが同時に通信を行うことが可能になったためである。

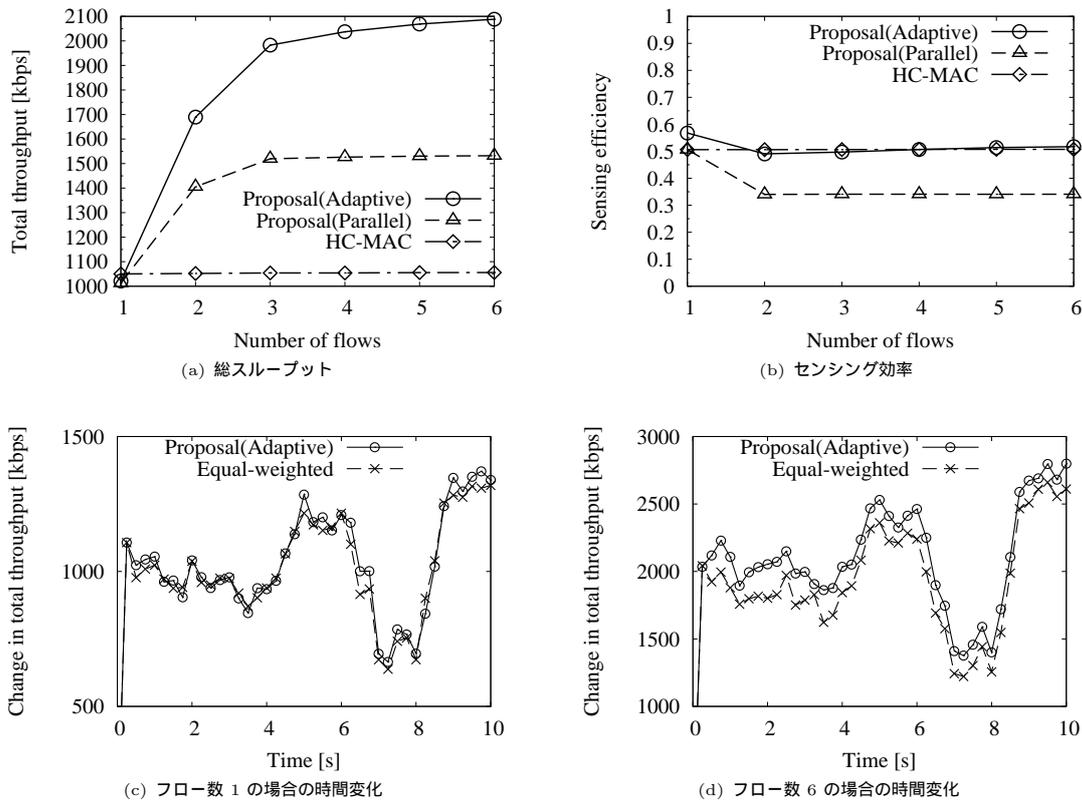


図 5 シミュレーション結果
Fig. 5 Simulation result

なお、総スループットがフロー数 3 でほぼ頭打ちになっているのはデータ送信可能時間 T_D の長さ起因しており、今回のシミュレーションにおける設定では併行化可能なフロー数が 3 程度であるためである。他方、センシング効率について見てみると、複数フローが存在する場合において明らかな低下が認められる。これは、複数フローの同時通信に伴いオーバーヘッドが増加していることを示しており、フローの併行化を行う場合は、Proposal(Adaptive) における適法型選択法のように、何らかの高度なチャンネル観測法が必要であることを暗示している。

最後に、フローの併行化に加えて適応型選択法を用いた Proposal(Adaptive) について考察する。総スループットについて見ると、HC-MAC や Proposal(Parallel) と比較して大幅な改善が認められる一方、センシング効率においては HC-MAC とほぼ同程度の性能を実現しており、Proposal(Parallel) のような性能低下は

認められない。これは、適応型選択法の導入により、チャンネルの観測・選択が効率化され、その結果としてフローの併行化の本来の効果を得ることが可能になったからである。逆に言えば、Proposal(Parallel) では、非効率なチャンネルの観測・選択によりフローの併行化によるスループットの改善が妨げられていたとすることができ、通信性能の大幅な改善を実現するためには適応型選択法の導入が非常に重要であると結論づけることができる。

4.2 電波利用状況の変化に対する適応性

シミュレーション 2 では、表 4 に示すように時間によって PS の占有確率と有効確率が変化するマルコフ連鎖モデルを仮定し、提案手法の電波利用状況の変化に対する適応性について検証を行った。CU のフロー数が 1 の場合と 6 の場合それぞれについて、0.25 秒毎の総スループットを計測した。提案手法における適応型選択法の有効性を評価するために、Proposal(Adaptive)

表 4 PS のマルコフ連鎖モデル (シミュレーション 2)
Table 4 Markov chain model used in simulation 2

時間 [s]	λ	μ	P_B	P_I
0-2	5	5	50%	50%
2-4	6	4	60%	40%
4-6	4	6	40%	60%
6-8	7	3	70%	30%
8-10	3	7	30%	70%

の比較対象として、忘却曲線による重み付けを行わずに、均等に重み付けする Equal-weighted を用いた。

図 5(c) にフロー数が 1 の場合、図 5(d) にフロー数が 6 の場合の結果を示す。両図より、適応型選択法を用いた Proposal(Adaptive) が事前知識を用いていないにもかかわらず電波利用状況の時間変動に適應できていることは明らかである。また、フロー数が 1 の場合は忘却曲線を用いた Proposal(Adaptive) と均等重み付けを用いた Equal-weighted の間に違いはほとんどないが、フロー数が 6 の場合では明らかな差が生じている。このことから、フロー数が多くチャンネルの状態変化が激しい場合においては、忘却曲線を用いたチャンネルの選択が有効であると言える。

5. む す び

近年、無線資源の枯渇が深刻化する中、コグニティブ無線に注目が集まっている。周波数帯におけるホワイト・スペースを有効利用して通信を行うコグニティブ無線においては、周辺の電波利用状況を正確に認識し、最適な周波数帯域や通信方式を決定する MAC プロトコルが重要となる。そこで本研究では、アドホックな環境でも利用可能な自律分散型であり、かつハードウェアレベルの制限をも考慮した HC-MAC に着目した。本論文では、HC-MAC の通信性能の飛躍的な向上を目指し、フローの併行化とチャンネルの適応型選択法の 2 つの手法を提案した。フローの併行化とは、NAV による待機時間の制御を変更することにより複数のフローが同時に通信を行うことを可能にする方法であり、チャンネルの適応型選択法とは、周辺の電波利用状況に関する事前知識を必要とすることなく直近の観測履歴に基づいて適切なチャンネルを選択する手法であった。ネットワークシミュレーションによる性能評価では、提案手法により、コグニティブ無線において最重要課題であるチャンネルの高効率利用を実現可能であることを確認した。

文 献

- [1] “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications,” IEEE Std. 802.11-2007, Jun. 2007.
- [2] “Air interface for fixed broadband wireless access systems,” IEEE Std. 802.16-2004, Mar. 2004.
- [3] “Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception (release 8),” 3GPP TS 36.101 v8.7.0, Sep. 2009.
- [4] J.M. III and J. Gerald Q. Maguire, “Cognitive radio: Making software radios more personal,” IEEE Personal Communications, vol.6, no.4, pp.13-18, Aug. 1999.
- [5] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.23, no.2, pp.201-220, Feb. 2005.
- [6] I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran, and S. Moshayyeh, “A survey on spectrum management in cognitive radio networks,” IEEE Communications Magazine, vol.46, no.4, pp.40-48, Apr. 2008.
- [7] 今野 功, 西山大樹, 加藤 寧, “コグニティブ無線における効率的なアクセス制御方式,” 第 8 回情報科学技術フォーラム, vol.4, pp.61-66, 2009.
- [8] 今野 功, 西山大樹, 加藤 寧, “コグニティブ無線のための分散型アクセス制御方式に関する一検討,” 信学技報, SAT2009-50, vol.109, no.340, pp.19-25, Dec. 2009.
- [9] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, “Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.25, no.3, pp.589-600, Apr. 2007.
- [10] W. yeolLee and I.F. Akyildiz, “Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.7, no.10, pp.3845-3857, Oct. 2008.
- [11] Q. Zhao, S. Geirhofer, L. Tong, and B.M. Sadler, “Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol.56, no.2, pp.785-796, Feb. 2008.
- [12] H. Kim and K.G. Shin, “Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.7, no.5, pp.533-545, May 2008.
- [13] J. Jia, Q. Zhang, and X. (sherman)Shen, “HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.26, no.1, pp.106-117, Jan. 2008.
- [14] 守倉正博, 久保田周治 (編), “改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書,” 第 4 章, インプレス, 2005.
- [15] E. Hermann, “Memory: A contribution to experimental psychology,” chapter 1, Teachers College Press, 1913.

[16] “ns-2”. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

を受賞。2007 年より総務省情報通信審議会専門委員, ITU-R SG4 主査。2009 年より総務省電気通信事業紛争処理委員会特別委員。北京郵電大学長期訪問高級科学者。IEEE Senior Member。



今野 功

平 20 群馬大・工・情報卒。平 22 東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程了。同年, (株) 日立製作所に入社。在学中はコグニティブ無線のメディアアクセス制御方式の研究に従事。



西山 大樹 (正員)

平 17 東北大・工・情報卒。平 19 同大大学院博士前期課程了。平 20 年 9 月同博士後期課程了。同年 10 月同助教, 現在に至る。博士(情報科学)。次世代 IP ネットワーク, 衛星ネットワーク, センサ・アドホックネットワーク等の研究に従事。平 17 情報処理学会東北支部学生奨励賞, 平 18 IEEE Sendai Section Student Award “The Best Paper Prize”, 平 21 IEEE IC-NIDC 2009 Best Paper Award, 平 22 船井研究奨励賞, IEEE GLOBECOM 2010 Best Paper Award, 各受賞。IEEE 会員。



加藤 寧 (正員)

昭和 63 年東北大学大学院修士課程修了。平成 3 年同大大学院博士課程修了(工学博士)。同年同大大型計算機センター助手, 平成 7 年同大大学院情報科学研究科助手, 平成 8 年同助教授, 平成 15 年同教授, 現在に至る。ネットワークマネジメント, ネットワークプロトコル, ネットワークセキュリティ, アドホック&センサー&メッシュネットワーク, 衛星通信ネットワーク, パターン認識などの研究に従事。電子情報通信学会衛星通信研究会専門委員会副委員長(2009~), Chair of IEEE Satellite and Space Communications TC(2010~), Secretary of IEEE Ad Hoc & Sensor Network TC(2010~), 和文論文誌 B 編集委員(2008~), IEEE Wireless Communications 編集委員(2006~), IEEE Trans. on Wireless Communications 編集委員(2008~), IEEE Trans. on Vehicular Technology 編集委員(2009~), IEEE GLOBECOM 2007 Internet Protocol Symposium Co-chair, IEEE ICC 2010-2011 Ad Hoc, Sensor & Mesh Networking Symposium Co-chair, China-Com 2008-2009 Symposium Co-chair. IEEE WCNC 2010-2011, TPC Vice Chair(Network Track). IEEE GLOBECOM 2010 Best Paper Award, 2009 年電子情報通信学会ネットワークシステム研究賞, 2008 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞, 2007 年船井情報科学振興賞, 2005 年 IEEE 衛星通信貢献賞, 2003 石田實記念財団研究奨励賞など

Abstract Due to the limited bandwidth of the frequency spectrum, cognitive radio technologies have recently attracted much research attention. While Hardware-Constrained cognitive MAC (HC-MAC) has been proposed as a MAC protocol, which can be even applied in ad hoc environments, it suffers from inefficient wireless channel utilization. In order to mitigate this issue, we propose an adaptive media access control scheme based on HC-MAC to achieve efficient utilization of radio resources by allowing multiple cognitive users to simultaneously communicate by utilizing different available channels with accordance to the change of channel condition.

Key words Cognitive radio, MAC, Ad hoc, Forgetting curve