

基地局非依存型マルチホップ無線網用 MAC プロトコルに関する研究

代表研究者 笠原 正 治 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授

1 はじめに

近年、スマートフォン等の普及により無線通信データトラフィックが急激に増大し、3G 回線及び公衆無線 LAN 回線 (Wi-Fi) の不足が問題となってきた [檜木 2011]。しかしながら、一方で公安や軍用に確保された帯域の利用頻度は少なく [Kannappa 2010]、また TV チャンネルではホワイトスペースと呼ばれる地域や時間帯によって空いているチャンネルが存在する [村上 2011, Cordeiro 2006]。このような周波数利用の不均衡を解消し、より効率的な無線資源の利用を可能にする一解決策として、コグニティブ無線通信技術が注目を浴びている。コグニティブ無線技術とは、既存のシステムに干渉を与えることなく、空間的、時間的に未使用の周波数帯域を二次利用する技術であり、周波数利用の不均衡が解消されることが期待されている。しかしながら、空き帯域を利用する二次的通信は、元々その帯域を利用する一次利用の通信が開始された時点で他に十分な空き帯域がない場合には強制切断されるという問題がある。そのため、二次利用通信の強制切断をできるだけ抑えるような周波数管理・割当法が重要な課題となっている。

一般的に、コグニティブ無線はチャンネル割当制御の観点から集中管理型と自律分散型の2つに分類される。集中管理型コグニティブ無線網の一例として、IEEE802.22 標準として規格化されている広域無線ネットワーク (WRAN: Wireless Regional Area Network) が挙げられる。IEEE802.22 では、セカンダリユーザによる TV ホワイトスペースの二次利用が標準化されている。具体的には、基地局がセカンダリユーザへの周波数割当を管理し、動的に TV ホワイトスペースを提供している。このように集中管理型コグニティブ無線網では、基地局等の中央制御装置が自身の管轄内における周波数利用状況を把握しているため、プライマリユーザへ干渉を与えることなくセカンダリユーザにサブチャンネルを提供することが可能である。しかしながら、洪水や地震などの災害により中央制御装置が故障した場合には、中央制御装置の管轄内で通信を行うことが不可能となる。

そこで本研究では、エンドユーザレベルで高度な通信品質を保証する基地局非依存型マルチホップ・コグニティブ無線網を実現するための要素技術に関する研究として以下の二点について研究を遂行した。

- (1) コグニティブ無線通信におけるセンシング処理のオーバーヘッドが二次利用無線端末のスループットに与える影響に関する理論的検討
- (2) 自律分散型コグニティブ無線におけるスペクトラム・ハンドオフ時の確率的再センシング機構の提案と理論的評価

本報告書の構成は以下の通りである。2 章では、センシング処理における空き無線チャンネル検知用のスキューン時間が二次利用端末のパケットスループットに与える影響について、マルコフモデルを用いた解析の概要と数値実験結果について述べる。3 章では、自律分散型マルチホップ・コグニティブ無線ネットワークにおけるスペクトラム・ハンドオフ用の確率的再センシング機構とその評価について概要を述べ、4 章でまとめを述べる。

2 センシング処理のオーバーヘッドが二次利用無線端末のスループットに与える影響の評価

2-1 背景と研究目的

コグニティブ無線通信では、周波数帯域の二次利用要求発生時および二次利用中の周波数帯に一次利用要求が発生したとき、二次利用無線端末はスペクトラム・センシングを行って二次利用可能な周波数帯の有無をチェックする。そのため空き周波数帯を高精度にセンシングすることは限られた無線周波数資源を効率的に使用する上で極めて重要であるが、センシングでは誤検知 (Mis-detection) または誤警報 (False Alarm) といった誤判定が発生することが知られている。誤検知はビジューの回線をアイドルと検知し、逆に誤警報はアイドルの回線をビジューと検知する。センシングの精度は無線チャンネルの帯域、エネルギー検出器の SN 比、スキャン時間に依存することが知られているが、ここではスキャン時間がセンシング精度と通信オーバーヘッドのトレードオフ関係を左右していることに注目する。一般にスキャン時間を長くするとセンシング精度は

向上する一方で通信オーバーヘッドが増大し、逆にスキャン時間を短くするとセンシング精度は低下するが通信オーバーヘッドが減少する。

一方、二次利用端末（以下セカンダリユーザ）に周波数チャンネルを割り当てる方策の一つに、複数のサブチャンネルを結合してより広帯域のチャンネルを提供するチャンネル結合法と呼ばれる手法がある。チャンネル結合法には連続した周波数サブチャンネルを結合する連続チャンネル結合法と不連続な周波数サブチャンネルを結合する不連続チャンネル結合法があるが、ここではセカンダリユーザが不連続な空きサブチャンネルを結合して通信を行う不連続チャンネル結合法に着目する。

マルコフ解析を用いた性能評価関連の研究として、文献 [Kannappa 2010] では、未使用のサブチャンネルすべてを全セカンダリユーザで共有して利用する二次利用方策の性能解析を行っている。また文献 [Zhu 2007] ではセカンダリユーザ毎に一つのサブチャンネルを割り当てる場合に焦点を絞り、セカンダリユーザ用に予め帯域の一部を確保しておく二次利用方策の性能解析を行っている。しかしながら、セカンダリユーザが異なる数のサブチャンネルを結合して利用する二次利用方策についてはほとんど検討がなされていない。

そこで本研究では、まずセカンダリユーザが不連続な空きサブチャンネルを結合して通信を行う不連続チャンネル結合法に焦点を当て、要求する利用サービスに応じてセカンダリユーザに異なる数のサブチャンネルを割り当てる動的周波数割当方式の性能解析を行う。具体的には、一次利用端末（以下プライマリユーザ）と利用サブチャンネル数の異なるセカンダリユーザが複数の周波数サブチャンネル資源（サーバ）を競合して利用する複数サーバ待ち行列モデルとして対象システムをモデル化する。システムの状態として系内プライマリユーザ数及び利用サブチャンネル数に応じた系内セカンダリユーザ数に着目し、多変数連続時間マルコフ連鎖としてシステムを定式化して定常分布を導出する。性能評価指標は、セカンダリユーザの呼損率、強制切断確率、スループットを考える。セカンダリユーザの強制切断方式については、利用サブチャンネル数の多いユーザから強制切断を行う方式と、利用サブチャンネル数の少ないユーザから強制切断を行う方式の二種類を検討する。

2-2 対象システムと解析の概要

無線周波数帯域は M 個のプライマリチャンネルに分割され、各プライマリチャンネルはさらに N 個のサブチャンネルに分割されていると仮定する。セカンダリユーザは通信を行う際に確率 β_k ($k=1,2,\dots,n$) で R_k ($1 \leq R_1 < R_2 < \dots < R_n \leq N$) 個のサブチャンネルを要求する。しかし、空きサブチャンネル数が R_k 個未満の場合には、要求が受け付けられず呼損する。

プライマリユーザは1つのプライマリチャンネルを利用し通信を行う。もし、利用可能なプライマリチャンネルがない場合には、セカンダリユーザにスペクトラム・ハンドオフを実行させることによってプライマリチャンネルを確保する。スペクトラム・ハンドオフとは、プライマリユーザの利用要求を新たに検知した場合に、通信中のセカンダリユーザが他の空きサブチャンネルに切り替えることによって、プライマリチャンネルを明け渡しつつ自身の通信を維持しようとする機能である。ただし、十分な空きサブチャンネルがない場合には、スペクトラム・ハンドオフを行ったセカンダリユーザの通信は強制切断される。ここでは、利用サブチャンネル数の多いセカンダリユーザから順に強制切断する方式と、利用サブチャンネル数の少ないセカンダリユーザから順に強制切断する方式の二種類を考える。

次に上記で述べたコグニティブ無線通信網における周波数利用システムを、各サブチャンネルをサーバと見立てることで、優先権付き複数サーバ待ち行列としてモデル化する。したがって、サーバ数は MN となる。以下では、 $N_p(t)$ を時刻 t においてサービス中（通信中）のプライマリユーザ数とし、 $N_{s,k}(t)$ ($k=1,2,\dots,n$) を時刻 t において R_k 個のサーバを占有しているセカンダリユーザ数とする。このとき、次式の関係が成立する。

$$0 \leq N_p(t) \leq M, \quad 0 \leq N_{s,k}(t) \leq \left\lfloor \frac{(M - N_p(t))N}{R_k} \right\rfloor,$$

$$N \cdot N_p(t) + \sum_{k=1}^n R_k \cdot N_{s,k}(t) \leq MN.$$

プライマリユーザは率 λ_p のポアソン過程にしたがって到着する。時刻 t にプライマリユーザが到着したとき、 $MN - N + 1$ 個以上のサーバがプライマリユーザに占有され、利用可能なサーバ数が $N - 1$ 以下であるとき、新規に到着したプライマリユーザは呼損する。また、 $MN - N$ 以下のサーバがプライマリユーザに占有され

ていてかつ利用可能なサーバ数が $N-1$ 以下のとき、セカンダリユーザのサービスを強制切断することにより、新規に到着したプライマリユーザは N 個のサーバを確保する。 N 個のサーバを確保したプライマリユーザのサービス要求に対する処理時間は平均 $1/N\mu$ の指数分布にしたがうものとする。

一方、セカンダリユーザのサービス要求は、率 λ_s のポアソン過程にしたがって発生し、確率 β_k で R_k 個のサーバを確保しようとする。このサービス要求が受け付けられた場合、その処理に要する時間は平均 $1/R_k\mu$ の指数分布にしたがう。一方、空きサーバが R_k 個未満の場合には、サービス要求は受け付けられず呼損する。

ここで $\mathbf{j} = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ とし、以下の集合を定義する。

$$\mathbb{F} = \{(i, \mathbf{j}); i \in \{0, 1, \dots, M\}; j_k \in \mathbb{S}_{i,k} \triangleq \{0, 1, \dots, s_{i,k}\}\}.$$

ただし $s_{i,k} = \lfloor (M-i)N/R_k \rfloor$ である。このとき、上記の仮定より多変数確率過程 $\{N_p(t), N_{s,1}(t), N_{s,2}(t), \dots, N_{s,n}(t); t \geq 0\}$ は上記集合上の既約な多変数連続時間マルコフ連鎖となる。このマルコフ連鎖の定常分布から、セカンダリユーザの呼損率、強制切断確率、およびスループットを導出できる。

2-3 数値例

本節では、解析結果に基づいた数値例を示す。表 1 には数値実験で設定した基本パラメータを表している。ここでは強制切断時に R_1 セカンダリユーザから強制切断を行う場合の数値例を示す。

表 1 基本パラメータ

プライマリチャンネル数 (M)	30
プライマリチャンネルあたりのサブチャンネル数 (N)	12
セカンダリユーザの利用サブチャンネル数 (R_1)	3
セカンダリユーザの利用サブチャンネル数 (R_2)	12
パケットサイズ [bytes]	500
サブチャンネルを 1 個利用したときの通信速度 [Mbps]	1.5
プライマリユーザが 1 個のサブチャンネルに与える負荷 (ρ_p)	0.5
R_1 個利用セカンダリユーザの packets 到着割合 (β_1)	0.5
R_2 個利用セカンダリユーザの packets 到着割合 (β_2)	0.5

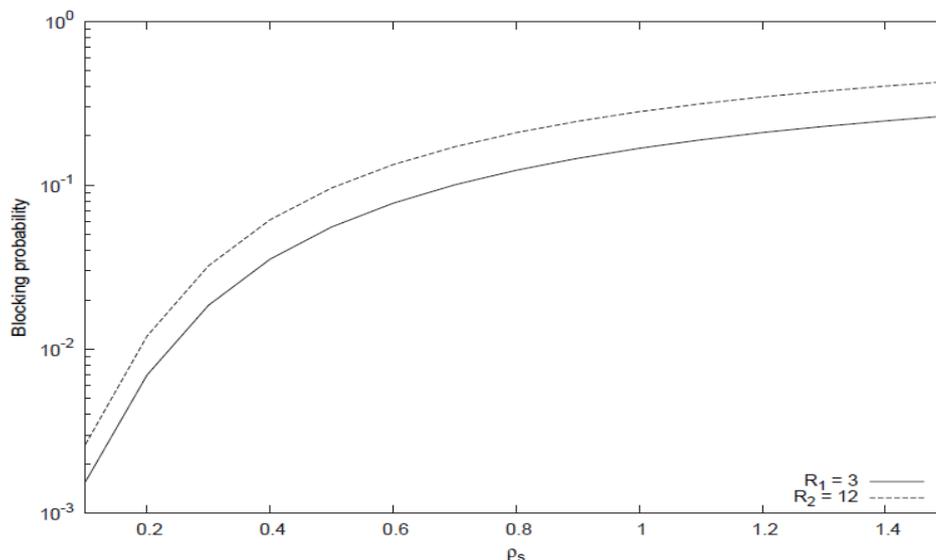


図 1 呼損率

図 1 は、二種類のセカンダリユーザに対する呼損率の推移を表している。図よりセカンダリユーザの負荷が増加すると、両方のセカンダリユーザの呼損率は共に増加することが観察される。これは、セカンダリユーザの負荷 ρ_s の増大によりシステムが輻輳し、結果としてセカンダリユーザがシステムに受け付けられにくくなるためである。また、 R_2 セカンダリユーザの呼損率の方が R_1 セカンダリユーザの呼損率より大きいこ

とも観察される。これは、利用サブチャネル数が多いほど、必要なサブチャネルを獲得しにくくなるためである。

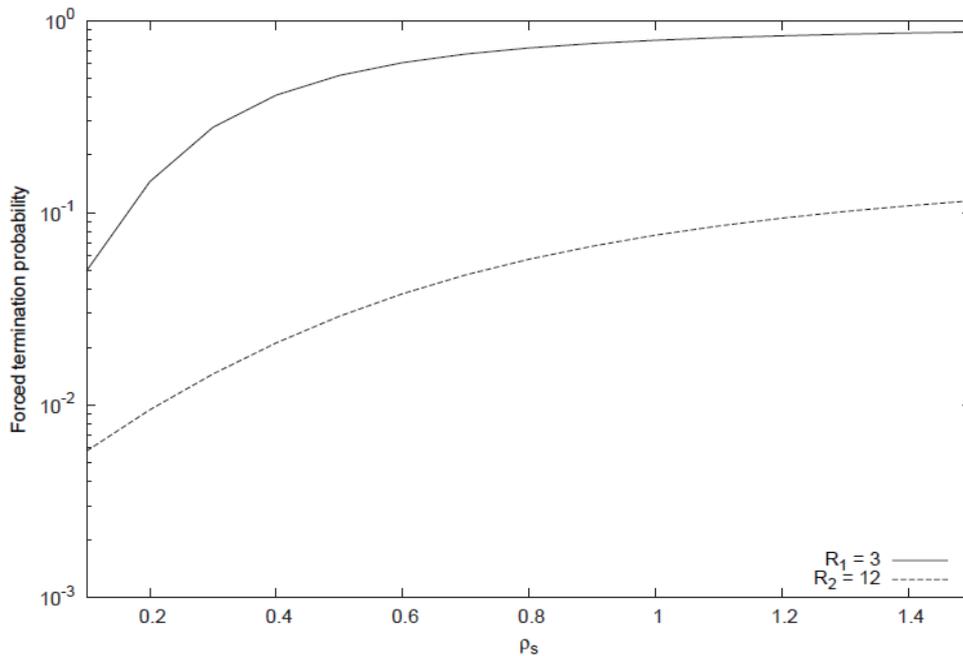


図2 強制切断確率

図2は、二種類のセカンダリユーザの強制切断確率の推移を表すグラフである。図から、 ρ_s が増大すると、両方のセカンダリユーザの強制切断確率は共に増加することが観察される。これは、呼損の場合と同じくシステムの輻輳度合が増加するためである。その結果、セカンダリユーザはスペクトラム・ハンドオフ時に十分な空きサブチャネルを獲得しにくくなり、強制切断されやすい。また、 R_1 セカンダリユーザの強制切断確率の方が、 R_2 セカンダリユーザの強制切断確率より大きいことも観察される。これは、セカンダリユーザの強制切断が起こる状況において、 R_1 セカンダリユーザから強制切断するためである。

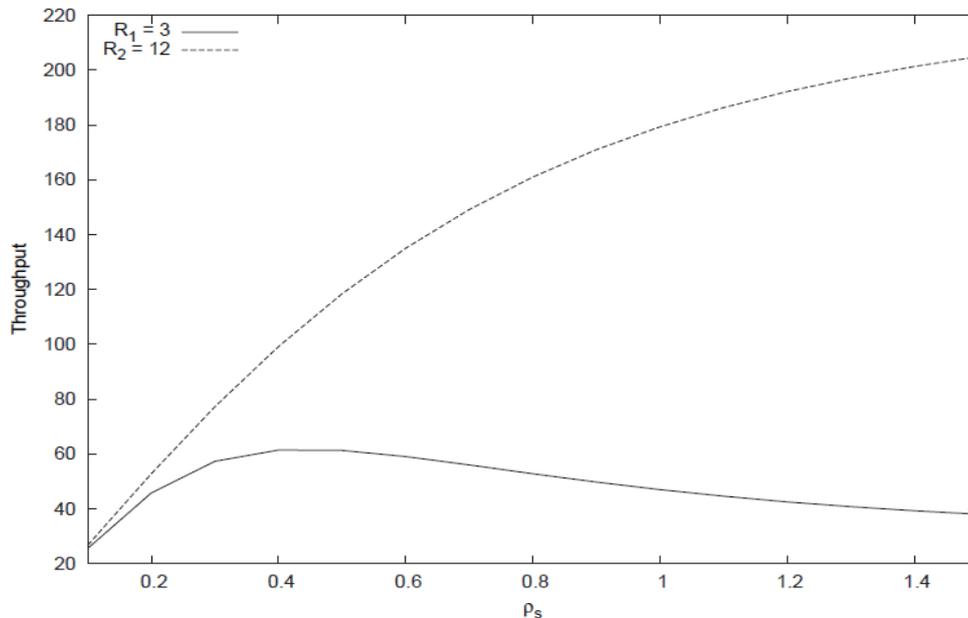


図3 スループット

図3は、二種類のセカンダリユーザのスループットの推移を表すグラフである。ここで、 ρ_s の増加は、セカンダリユーザの到着率の増加を意味することに注意する。図3から、 ρ_s の増大に伴って R_2 セカンダリユーザ

ザのスループットも増加することが観察される。これは、セカンダリユーザの到着率の増加に対して、 R_2 セカンダリユーザの呼損率および強制切断確率の増加が緩やかであるためである。一方、 ρ_s の増加により、 R_1 セカンダリユーザのスループットは ρ_s が 0.4 辺りまで増加してから減少に転じることが観察される。これは、セカンダリユーザの到着率の増加に対して、 R_1 セカンダリユーザの呼損率の増加は緩やかであるが、強制切断確率が急激に増加するためである。

2-4 本節のまとめ

本節ではコグニティブ無線通信網において、二次利用端末に対して割り当てるサブチャネル数を複数種類用意したチャネル結合法における性能特性についてマルコフ解析による検討を行った。具体的には対象システムを連続時間マルコフ連鎖で定式化し、二次利用端末の呼損率、強制切断確率、スループットを導出した。二次利用端末の強制切断方式については、利用サブチャネル数の多い端末から強制切断を行う方式と、利用サブチャネル数の少ない端末から強制切断を行う方式の二種類を検討した。数値例より、システムの負荷が増大すると強制切断される低優先二次利用端末のスループットが劣化することが判明した。ここでは省略したが、解析と連続チャネル結合法を実装したモンテカルロ・シミュレーションの比較を行い、連続チャネル結合法の近似モデルとしての本解析モデルの有効性についても検討を行った。その結果、利用サブチャネル数の少ない二次利用端末のスループットにおける解析結果が、シミュレーション結果の安全側評価となっており、連続チャネル結合法に対する本解析モデルの有効性が示された。

3 自律分散型コグニティブ無線におけるスペクトラム・ハンドオフ時の確率的再センシング機構

3-1 背景と研究目的

一般的に、コグニティブ無線はチャネル割当制御の観点から集中管理型と自律分散型の2つに分類される。集中管理型コグニティブ無線網の一例として、IEEE802.22 標準として規格化されている広域無線ネットワーク (WRAN: Wireless Regional Area Network) が挙げられる。IEEE802.22 では、セカンダリユーザによる TV ホワイトスペースの二次利用が標準化されている。具体的には、基地局がセカンダリユーザへの周波数割当を管理し、動的に TV ホワイトスペースを提供している。このように集中管理型コグニティブ無線網では、基地局等の中央制御装置が自身の管轄内における周波数利用状況を把握しているため、プライマリユーザへ干渉を与えることなくセカンダリユーザにサブチャネルを提供することが可能である。しかしながら、洪水や地震などの災害により中央制御装置が故障した場合には、中央制御装置の管轄内で通信を行うことが不可能となる。

一方、自律分散型コグニティブ無線網には中央制御装置が存在せず、セカンダリユーザ自ら空きサブチャネルを検知し、通信を開始する。この空きサブチャネルを検知する機能はスペクトラム・センシングと呼ばれる。また自律分散型コグニティブ無線には、スペクトラム・ハンドオフと呼ばれるもう1つの重要な機能が存在する。スペクトラム・ハンドオフの一連の流れは次のとおりである。まず、セカンダリユーザがあるサブチャネルを利用中に、そのサブチャネルを含んだプライマリチャネルを利用するプライマリユーザが到着した場合、そのセカンダリユーザは利用サブチャネルをプライマリユーザに明け渡す。その後、セカンダリユーザは再センシングにより他の空きサブチャネルを検知することができれば、通信を継続することができる。一方、再センシング時に空きサブチャネルを検知できなかった場合には、セカンダリユーザの通信は強制切断される。

近年における無線データ通信では、スマートフォンやタブレット PC の登場に対し、より速いデータ転送レートが要求されている。この要求を実現する技術としてチャネル結合法が存在する [Cordeiro2006]。チャネル結合法により、セカンダリユーザは複数の空きサブチャネルを結合利用することが可能となる。その結果、より高速なデータ転送レートを獲得することができる。

一般にユーザの要求に応じた提供サービスの差別化は重要な通信サービスであるが、コグニティブ無線においても、例えば、スカイプで通話するセカンダリユーザに対しては少ないサブチャネルを割り当て、動画ストリーミングサービスを利用するセカンダリユーザに対しては多くのサブチャネルを割り当てることでサービスの差別化を実現することが必要と考えられる。そこで、セカンダリユーザの利用サービスに応じて割り当てるサブチャネル数を変化させる場合を考える。

コグニティブ無線網で可変チャネル利用サービスを提供するにあたり、スペクトラム・ハンドオフ時の強制切断方式を考えることが重要となる。集中管理型コグニティブ無線網では、中央制御装置が管轄内の全周

波数利用状況を把握しているため、可変チャネル利用サービスに対応した強制切断方式の実装は容易である。

例えば文献 [Konishi 2013] は、2つの強制切断方式が提案されている。1つはプライマリユーザの到着に対し、利用サブチャネルの多いセカンダリユーザから強制切断する方式である。もう1つは利用サブチャネルの少ないセカンダリユーザから強制切断する方式である。しかしながら、自律分散型コグニティブ無線では中央制御装置が存在しないため、利用サブチャネル数に応じてセカンダリユーザを強制切断することができない。そのため自律分散型コグニティブ無線網では、中央制御装置が存在しない状況での可変チャネル利用サービスに対応した強制切断方式を考える必要がある。

そこで本研究の二番目の項目として、自律分散型コグニティブ無線網における可変チャネル利用サービスに対応したスペクトラム・ハンドオフ機能を提案し、その性能解析を行う。提案するスペクトラム・ハンドオフ機能では、プライマリユーザに利用サブチャネルを明け渡したセカンダリユーザは確率的に再センシングを開始するか自ら通信を終了する。ここでは、利用サブチャネル数に応じた再センシング確率を設定することでサービスの差別化を実現する。もし再センシング時に複数のセカンダリユーザの要求サブチャネルが同じであった場合には、それらのセカンダリユーザは衝突し強制切断されるものと仮定する。本稿では、セカンダリユーザの利用サブチャネルが1個の場合における提案したスペクトラム・ハンドオフ機能を連続時間マルコフ連鎖でモデル化する。そして、マルコフ連鎖を解析することにより、セカンダリユーザの呼損率、強制切断確率、およびスループットを導出する。

3-2 提案方式の概要

以下では、到着したプライマリユーザは空きサブチャネルのうち必要個数のサブチャネルを無作為に選択することを仮定する。もしセカンダリユーザが利用中のサブチャネルが選択された場合には、そのサブチャネルは新規プライマリユーザに明け渡され、該当するセカンダリユーザは通信を中断する。

複数のセカンダリユーザが新規プライマリユーザに対して利用サブチャネルを明け渡した後の状況を考える。サブチャネルを明け渡した各セカンダリユーザは他のセカンダリユーザの挙動とは独立に、確率 $1-q_{rs}$ で自らの通信を終了するか、あるいは確率 q_{rs} で他の空きサブチャネルを獲得するために再センシングを開始する。

この提案方式に対し、要求サブチャネル数が1個の場合について、連続時間マルコフ連鎖によるモデル化を行い、セカンダリユーザのスループット、呼損率、および強制切断確率を導出した。ここでは詳細を割愛する。

3-3 数値例

以下では、プライマリユーザのサービス率が変化したときの性能評価指標の変化を観察する。基本パラメータを表2に示す。

表2 基本パラメータ

プライマリチャネル数 (M)	68
プライマリチャネルあたりのサブチャネル数 (N)	12
セカンダリユーザのサービス率 (μ_s)	1.0
プライマリユーザの利用率 (ρ_p)	0.5
セカンダリユーザの利用率 (ρ_s)	0.5

図4はセカンダリユーザの強制切断確率の推移を表したグラフである。図4から、プライマリユーザのサービス率の増加に伴い強制切断確率が増加することが観察される。ここで、プライマリユーザの利用率は一定であることに注意する。つまり、サービス率の増加に伴いプライマリユーザの到着率も増加する。結果として、強制切断のリスクが高まる。また、 q_{rs} が増加するほど、強制切断確率は減少する。ここで、 q_{rs} が増加するほどスペクトラム・ハンドオフ時に自ら通信を終了するセカンダリユーザの割合は減少することに注意する。一方、再センシング時に衝突や空きサブチャネルが存在しないことにより強制切断されるセカンダ

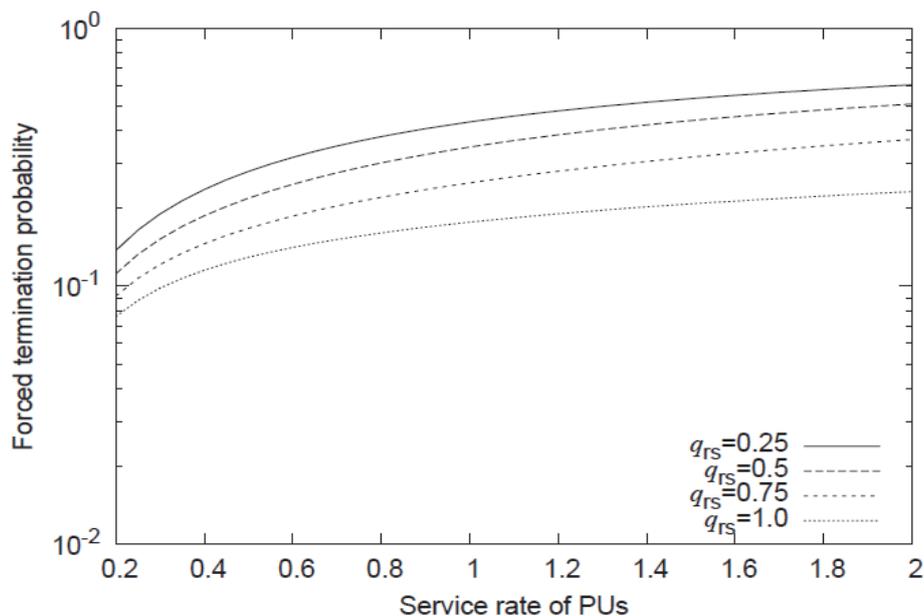


図4 強制切断確率

リユーザの割合は増加する。前者の影響が大きいために q_{rs} の増加に伴い、強制切断確率は減少する。

図5は、セカンダリユーザの呼損率の推移を表したグラフである。図5より、プライマリユーザのサービス率の増加に伴い呼損率は減少することが観察される。これは、サービス率の増加に伴って系内の空きサブチャンネル数の割合が増加し、セカンダリユーザはより系内に収容されやすくなるためである。また、再センシング確率が増加するほど呼損率は増加する。これは、再センシング確率の増加とともに強制切断確率が減少するためである。結果として、系内の空きサブチャンネル数の割合が減少し、セカンダリユーザは呼損しやすくなる。

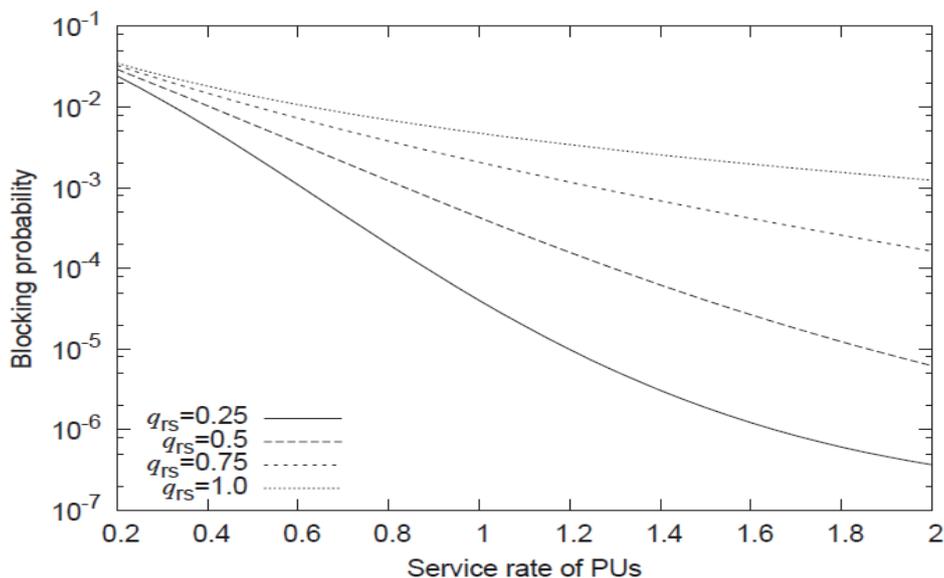


図5 呼損率

図6はセカンダリユーザのスループットの推移を表したグラフである。図6より、プライマリユーザのサービス率の増加に伴い、スループットは劣化することが観察される。これは、サービス率の増加に伴って強制切断確率が増加する影響が、呼損率が減少する影響より大きいためである。また、再センシング確率の増加に伴いスループットは改善される。これも強制切断確率の影響のほうが呼損率の影響より大きいためである。

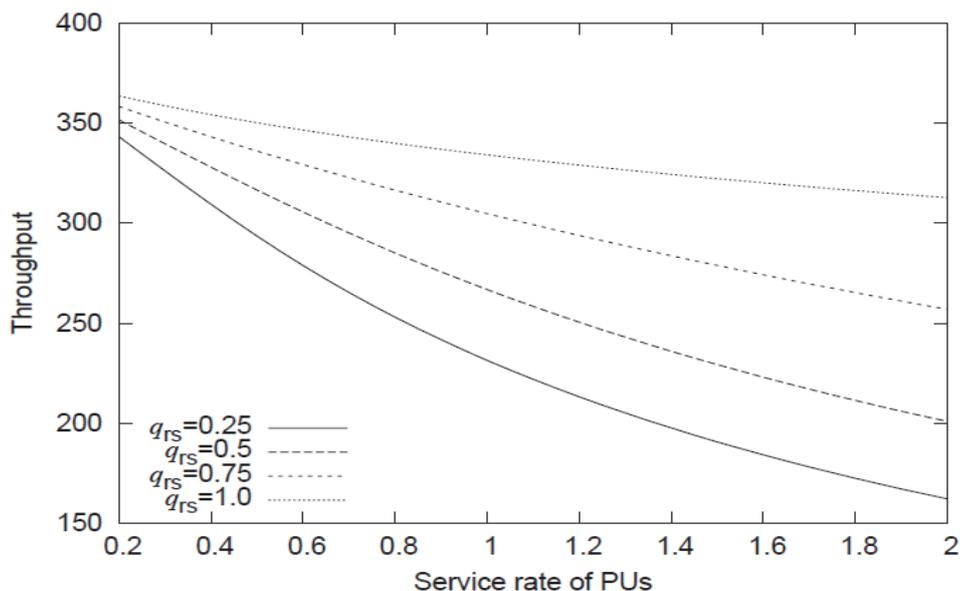


図6 スループット

3-3 本節のまとめ

本節ではスペクトラム・ハンドオフ時に確率的に再センシングを行う方式を提案した。このスペクトラム・ハンドオフ機能を連続時間マルコフ連鎖で定式化し、セカンダリユーザの呼損率、強制切断確率、およびスループットを導出した。数値例より、セカンダリユーザの再センシング確率を高く設定することにより、スループットが改善されることが判明した。

まとめ

本研究では、エンドユーザレベルで高度な通信品質を保証する基地局非依存型マルチホップ・コグニティブ無線網を実現するための要素技術に関する研究として、(1) コグニティブ無線通信におけるセンシング処理のオーバーヘッドが二次利用無線端末のスループットに与える影響に関する理論的検討、および(2) 自律分散型コグニティブ無線におけるスペクトラム・ハンドオフ時の確率的再センシング機構の提案と理論的評価、の二点について研究を遂行した。

今後の課題として、マルチホップネットワーク全体のスループット向上を目指したパケットスケジューリングの設計が挙げられる。近年マルチホップ無線網におけるMAC層レベルのパケットスケジューリングに関して、リャプノフ最適化理論に基づく確率ネットワーク最適化の手法を応用した研究がNeely等によって活発に展開されている。そこでは、無線端末毎にパケットフォワード用キューと、衝突による通信失敗回数や端末の電力消費量をペナルティとしてカウントする仮想的なキューを考え、すべての無線端末に対してそれらのキュー長の二乗和を取ったリャプノフ関数を構成し、リャプノフ関数の単位時間当たりの変化量が全ての時間で有界に押さえられるようにパケットスケジューリングを設計する。この手法の特筆すべき点は、ノードのモビリティや無線チャネルの状態推移等を独立かつ未知なマルコフモデルとしたままでパケットスケジューリングの最適化問題を定式化できることである。Neelyらはコグニティブ無線網におけるスケジューリング問題に対してモビリティ、二次利用端末によるチャネル干渉、一次利用端末のトラヒック需要、および無線チャネルのセンシングを考慮したモデルを構成してパケットスケジューラの設計を行っている。そこで次の研究課題として、センシング処理とチャネル結合法を考慮したチャネルアクセス制御と負荷分散型経路制御を考慮した新しいモデルを考え、通信衝突確率と遅延について制約を設けたリャプノフ最適化問題を構成することで、エンドユーザレベルで高度なQoS保証を実現しかつ網全体のスループットを最大化するようなパケットスケジューリング機構を構築することが挙げられる。

【参考文献】

- C. Cordeiro, K. Challapali and D. Birru, "IEEE802.22: An Introduction to the First Wireless Standard Based on Cognitive Radios," Journal of Communications, vol. 1, no. 1, pp. 38-47, 2006.
- S. M. Kannappa and M. Saquib, "Performance Analysis of a Cognitive Network with Dynamic Spectrum Assignment to Secondary Users," in Proc. IEEE, ICC 2010, 2010.
- Y. Konishi, H. Masuyama, S. Kasahara and Y. Takahashi, "Performance Analysis of Dynamic Spectrum Handoff Scheme with Variable Bandwidth Demand of Secondary Users for Cognitive Radio Networks," To appear in Wireless Networks.
- X. Zhu, L. Shen and T. P. Yum, "Analysis of Cognitive Radio Spectrum Access with Optimal Channel Reservation," IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 4, pp. 304-306, 2007.
- 樫木勘四郎, 鈴木利則, "ネットワーク運営の立場から見たコグニティブ無線技術 — ヘテロジニアス無線システム —," 電子情報通信学会誌, vol. 94, no. 1, pp. 35-38, 2011.
- 村上誉, 佐々木重信, 吉野仁, "コグニティブ無線の標準化動向," 電子情報通信学会誌, vol. 94, no. 1, pp. 43-46, 2011.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Effect of Spectrum Sensing Overhead on Performance for Cognitive Radio Networks with Channel Bonding	Journal of Industrial and Management Optimization	2013年発行予定
Performance Analysis of Dynamic Spectrum Handoff Scheme with Variable Bandwidth Demand of Secondary Users for Cognitive Radio Networks	Wireless Networks	2013年7月
The Effect of Spectrum Sensing Overhead on Throughput Performance for Cognitive Radio Networks with Channel Bonding	The 7th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA2012), Kyoto, Japan,	2012年8月
Performance Analysis of Dynamic Spectrum Access with Channel Bonding for Cognitive Radio Networks	The 7th International Conference on Queueing Theory and Network Applications (QTNA2012), Kyoto, Japan,	2012年8月
自律分散型コグニティブ無線網における確率的再センシング機構を持つスペクトラム・ハンドオフ機能のスループット性能に対する影響	電子情報通信学会技術研究報告	2013年3月
周波数共用型コグニティブ無線におけるスペクトラム・センシングの検知精度を考慮したスループット解析	電子情報通信学会技術研究報告	2013年3月
Performance Analysis of Dynamic Spectrum Handoff Scheme with Probabilistic Re-sensing for Autonomous Cognitive Radio Networks	待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」	2013年1月