

# コグニティブ無線システムのための時間変化に追従可能な高精度占有率測定法

## High-Accurate and Time-Traceable Channel Occupancy Ratio Measurement for Cognitive Radio System

学生会員 若尾悠太<sup>†</sup>, 田久修<sup>†</sup>, 藤井威生<sup>††</sup>,  
笹森文仁<sup>†</sup>, 半田志郎<sup>†</sup>

Yuta Wakao<sup>†</sup>, Osamu Takyu<sup>†</sup>, Takeo Fujii<sup>††</sup>, Fumihito Sasamori<sup>†</sup> and Shiro Handa<sup>†</sup>

あらまし 無線通信システムにおける周波数帯域の枯渇問題への対策として、無線機が自律的に利用効率の低いチャンネルを2次利用するコグニティブ無線システムが有力視されている。コグニティブ無線では利用可能なチャンネルを探索する際、各チャンネルの平均的な占有率が事前情報として有益である。占有率の測定では、定常時における高い測定精度と占有率の時間的な変化への追従性が求められるが、これらを両立する方法は提案されていない。本稿では、占有率の変化を検出する機構と占有率を測定する機構を併用する新しい占有率測定法を提案した。計算機シミュレーションにより、測定精度および追従性の観点で提案法の優位性を明らかにした。

キーワード：コグニティブ無線，キャリアセンス，占有率

### 1. ま え が き

現在、無線通信システムでは通信資源である周波数帯域(チャンネル)の枯渇が問題視されており<sup>1)</sup>、その対策としてコグニティブ無線システムに注目が集まっている。コグニティブ無線システムは、周波数資源を使用するライセンスを有するシステム(プライマリシステム:PS(Primary System))が利用していない時間やチャンネルを、セカンダリシステム(SS(Secondary System))が独自に探索し活用する自律分散無線システムである<sup>2)</sup>。

ここで、PSの時間的なチャンネルの利用率(占有率, COR(Channel Occupancy Ratio))<sup>3)</sup>を知ることは、効率かつ短時間で使用されていないチャンネルを探索するのに有益である。占有率の測定は、PSの定常的なチャンネルの利用状況を捕らえる高い測定精度と、PSの入れ替わりに伴う占有率の時間変化への追従性が求められる。これまでに、占有率測定法としてメモリー法<sup>4)</sup>と重み法<sup>5)</sup>が提案されている。メモリー法はスロットと呼ばれる短い時間間隔において、PSのアクセスを検出した結果を1ビット情報として記録し、一定の時間の間にPSがアクセスした回数として占有率を測定する。時間追従性を高めるため、記憶領域(メモリー)

が一定サイズのFIFO(First In First Out)型メモリーを使用し、一定の時間が経過した過去の結果は破棄する。メモリー法ではメモリーのサイズが大きくなると、より多くのセンシング結果で平均化した占有率が求められ、測定精度が高まる。しかし、過去のセンシング結果の影響が強くなり占有率の変化に対する時間追従性は劣化する。一方、重み法では最近の検出結果に対して大きな比重を与える重みを乗算することで、時間変化への感度を高めている。しかし、瞬時の結果に影響され安定した占有率を求めることが難しくなる。このように、時間追従性と高精度化を両立する占有率測定法はまだ確立されていない。

本稿では、コグニティブ無線における新しい占有率測定法を提案する。提案法は記憶長の異なる2種類のメモリーと利用率の変化を捉える検出機構から構成される。まず、占有率の算出を記憶長の長いメモリーで実施することで測定精度の向上を図る。一方、平行して記憶長の短いメモリーと検出機構を用いて占有率の変化を認識する。もし、占有率が変化すると認識した場合には、記憶長の長いメモリーの結果をすべて消去する。これにより、占有率の変化前のセンシング結果の影響を回避し、測定結果の時間追従性を高めることができる。ここで、提案法では占有率の変化を認識する閾値が必要になる。そこで、占有率の変化を認識する検出確率を解析的に導出し、高い検出確率を達成する適切な検出閾値を決定した。計算機シミュレーションによる評価の結果、提案法が高い追従性と高い測定精度を両立

2013年11月29日受付, 2014年1月19日再受付, 2014年2月28日採録

<sup>†</sup>信州大学大学院 理工学系研究科 電気電子工学専攻

(〒380-8553 長野市若里 4-17-1, TEL026-269-5255)

<sup>††</sup>電気通信大学 先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター

(〒182-85854 調布市調布ヶ丘 1-5-1, TEL 042-443-5872)

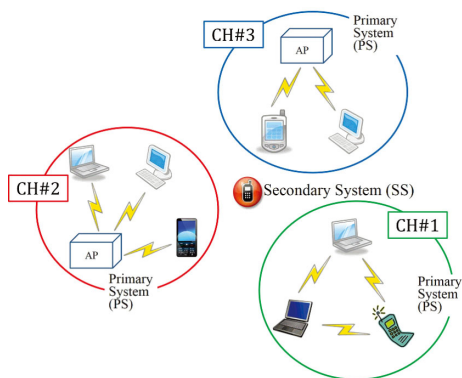


図1 検討するシステムモデル

していることを示す。

## 2. システムモデル

図1に想定する無線通信システムを示す。本稿では一定の時間間隔をスロットとし、時間の流れをスロット数で定義する。PSは任意のスロット時間において各チャンネルにアクセスする。SSはチャンネル別にFIFO型のメモリーを用意してセンシング結果を記録する。図2にSensing and Switching (切替センシング)<sup>6)</sup>によるマルチチャンネル占有率測定の様子を示す。図において $x_n(k, i)$ は $n$ 番目のチャンネルにおける $k$ 番目アドレスのメモリーに記録された、 $i$ 番目のスロット時間におけるセンシング結果を示している。ここで、PSのアクセスを認識した場合は“1”、PSのアクセスを認識しなかった場合は“0”とする。つまり、 $x_n(k, i) \in \{0, 1\}$ である。図2より、SSはチャンネルの切替とPSのセンシングを進めながら占有率を測定している。このようにすることで、無線機が1つのチャンネルのみアクセスできる場合にも、複数のチャンネルの占有率を測定することができる。センシング結果は最新の結果を記憶する際に、最も古い結果を破棄する。また、他チャンネルをセンシングしている間は、メモリーのデータは更新されない。そして、メモリーのセンシング結果からチャンネル別にそれぞれの占有率を算出する。キャリアセンスでは、PSのアクセスを取り逃す誤検出とPSが無アクセスのときにアクセスしていると判断する誤警報が発生する<sup>7)</sup>が、本稿ではキャリアセンスの精度は検討対象外とし、誤検出や誤警報は理想的に発生しないと仮定した。

## 3. 従来の占有率測定法

### 3.1 メモリー法<sup>4)</sup>

$i$ 番目のスロット時間 ( $i \geq 0$ ) における、 $n$ 番目のチャンネルにおける占有率、 $\hat{\rho}_n(i)$ 、を次式で求める。

$$\hat{\rho}_n(i) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} x_n(k, i)}{\min(L, i+1)} \quad (1)$$

ここで $L$ はメモリーのサイズ、 $\min(a, b)$ は $a, b$ のうち小さい値を返す関数、 $k$ はメモリーのアドレス番号である。

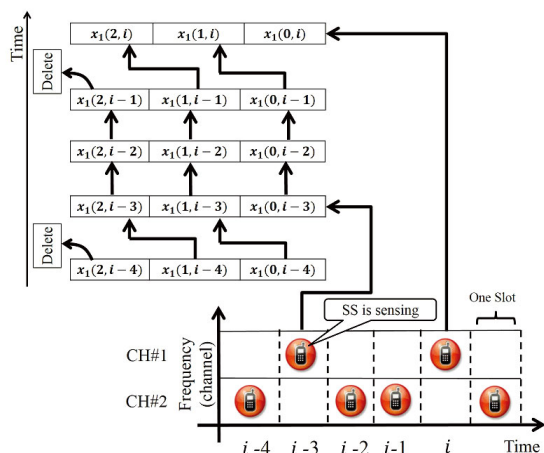


図2 切替センシングによるマルチチャンネル占有率測定

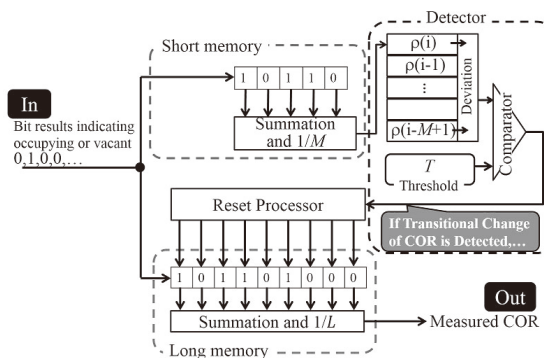


図3 提案法における占有率測定

### 3.2 重み法<sup>5)</sup>

占有率、 $\hat{\rho}_n(i)$ 、は次式で与えられる。

$$\hat{\rho}_n(i) = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} x_n(i, k) \cdot w(k)}{\sum_{k=0}^{L-1} w(k)} \quad (2)$$

ここで $w(k)$ は次式で定義される。

$$w(k) = \frac{1}{k+1} \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (3)$$

上式より、メモリーのアドレス番号が小さくセンシング結果がより最近の結果に対して、高い重みを乗算する。

## 4. 提案占有率測定法

図3に提案法の処理フローを示す。提案法は記憶長の異なる2つのメモリーと、占有率の変化を検出する検出機構で構成される。まず、センシング結果を2つのメモリーに入力する。ここで、2つのメモリーはFIFO型とし、記憶長をそれぞれ $L$ と $M$  ( $M < L$ )とする。占有率は記憶長の長いメモリー（長メモリー）で算出する。算出法はメモリー法と同じである。次に、記憶長の短いメモリー（短メモリー）においても、メモリー法により占有率を算出する。そして、算出した占有率を長さが $M$ のメモリーに記憶する。ここで、占有率を記憶するメモリーもFIFO型とする。このメモリーから次式の通り、占有率変化量 $\Delta\rho_n(i)$ を求める。

$$\Delta\rho_n(i) = |\bar{\rho}_n(i) - \bar{\rho}_n(i - M + 1)| \quad (4)$$

ここで  $\bar{\rho}_n(i)$  は  $n$  番目のチャネル,  $i$  番目のスロット時間における, 短メモリーから算出された占有率である。

次に, 算出された占有率変化量  $\Delta\rho_n(i)$  を一定の閾値  $T$  と比較する. もし,  $\Delta\rho_n(i) > T$  のとき, 占有率が変化したと判断する. このとき, 長メモリーに記憶されたセンシング結果をすべて消去する. なお, 長メモリーの結果を消去した直後の一定時間は, センシング結果を消去しない停止期間を設けている. これは, 占有率が変化する過渡期には, 占有率変化量が閾値を超える状態が続くため, 最新のセンシング結果が過剰に消去されることを回避している。

提案法では, 長メモリーを使用することで, より多くのセンシング結果から占有率を求めることができる. よって, 占有率が定常的であるとき高精度な占有率測定ができる. 一方, 平行して短メモリーでは最近の結果だけで占有率を算出するため, 占有率の変化を高い感度で検出することができる. 占有率の変化を検出したとき, 長メモリー内のセンシング結果を除去することで, 占有率が変化する以前のセンシング結果の影響を回避し, 占有率の時間変化に対する高い追従性を実現することができる。

## 5. 占有率変化の検出確率の導出

提案法における占有率の変化を認識する機構において, 認識に適した閾値の設計に必要な占有率変化の検出確率を導出する。

PS は各スロットで独立したランダムアクセスであると仮定する. このとき,  $i$  番目のスロット時刻における  $n$  番目のチャネルにおいて, PS がチャネルを使用する確率 (平均アクセス確率) を  $\rho(i, n)$  とする. ここで, 平均アクセス確率は SS が推定する占有率の真の値であるので, 平均アクセス確率を真の占有率と呼ぶことにする.  $n$  番目のチャネルを SS が短メモリーで推定した占有率  $\bar{\rho}(i, n)$  は次式で与えられる。

$$\bar{\rho}(i, n) = \frac{S(i, n)}{\min(M, i + 1)} \quad (5)$$

$$S(i, n) = \sum_{k=0}^{\min(M-1, i)} x(i - k, n) \quad (6)$$

ここで,  $S(i, n)$  は,  $n$  番目のチャネルにおける  $i$  番目のスロット時刻における, PS のアクセスを認識した回数を示す.  $S(i, n)$  は複数のセンシング結果からなる確率過程であり, その過程の発生確率は次式で与えられる。

$$P(S(i, n)) = {}_M C_{S(i, n)} (\rho(i, n))^{S(i, n)} (1 - \rho(i, n))^{1-S(i, n)} \quad (7)$$

ここで,  ${}_a C_b$  は  $a$  から  $b$  を選択する組合せの数である。

式 (4) で与えられる占有率の変化量  $\Delta\rho(i, n)$  が閾値  $T$  を超えたとき, 提案法におけるセンサは占有率が変化したと判

表 1 シミュレーション諸元

| チャネル数             | 3         |
|-------------------|-----------|
| 従来法のメモリーサイズと $L$  | 300 slots |
| 提案法の長メモリーのサイズ     |           |
| 提案法の短メモリーのサイズ $M$ | 50 slots  |
| チャネル切り替えの時間周期     | 10 slots  |

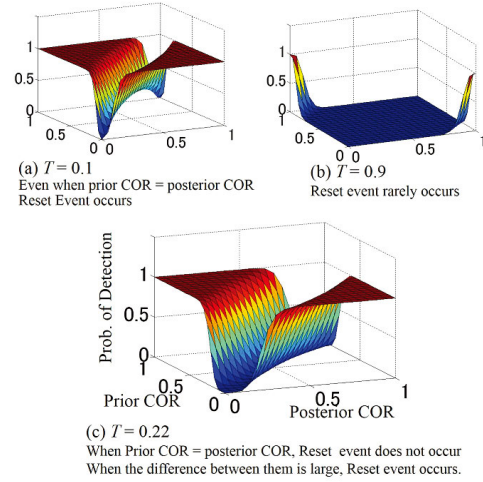


図 4 占有率変化の検出確率

断する. よって,  $n$  番目のチャネルにおける  $i$  番目のスロット時間において, 占有率が変化したと判断する確率  $q(i, n)$  は次式となる。

$$q(i, n) = \sum_{|S(i, n) - S(i - M + 1, n)| \geq MT} \{P(S(i, n)) \cdot P(S(i - M + 1, n))\} \quad (8)$$

## 6. 数値解析結果

表 1 にシミュレーション諸元を示す. チャネル切替の時間周期が 10 スロットであるので, SS は 10 スロット時間連続で特定のチャネルをセンシングし, 別のチャネルに切替る. 本稿では 3 チャネルを想定しているため 1 つのチャネルの測定に着目すると, 10 スロット時間の間センシング結果が記録された後, 次の 20 スロット時間の間センシング結果は更新されない. 従来法のメモリーサイズ  $L$  は, 定常時において真の占有率との測定誤差が 5% 未満を達成するように設定した. また, 提案法の長メモリーは従来法のメモリーサイズと等しく設定した. 短メモリーは様々なサイズで評価した結果から, 占有率の変化を高感度に検出した 1 例として 50 スロットに設定した. 図 4 に占有率変化を検出した確率の特性を示す. “Prior COR”, “Posterior COR” はそれぞれ, 占有率が変化する前と後の真の占有率の値を示している. 垂直軸は占有率が変化したと判断する確率を示している. 図 4(a), (b), (c) はそれぞれ, 判定のための閾値  $T = 0.1, 0.9, 0.22$  としている。

本結果より, 次のルールで検出閾値を設計する。

- (1) もし, “Prior COR” と “Posterior COR” が等し

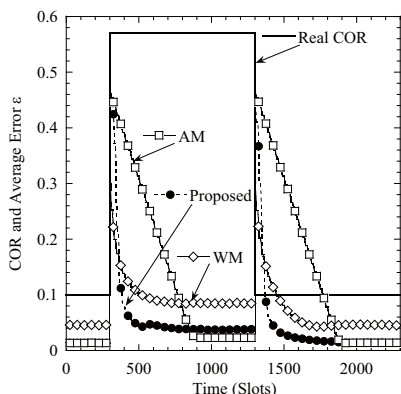


図5 スロット時間に対する占有率および平均誤差量  $\epsilon$  特性

いときは、占有率が変化していないため、検出確率は0あるいはできる限り低く抑える。

(2) “Prior COR” と “Posterior COR” に差があるときは、検出確率は1とする。

この2つの条件を満足する閾値を検討する。図4(a)では、“Prior COR” と “Posterior COR” が等しい領域で、占有率の変化を誤認識している確率が高い。一方(b)では、“Prior COR” と “Posterior COR” が大きく異なる場合においても、検出確率が0となっているため、占有率の変化を取り逃している。一方(c)では、2つの条件を高い水準で満足しているため、適切な閾値であると判断できる。よって、以降の評価では閾値  $T = 0.22$  とする。

図5に、各スロット時間に対する測定占有率の平均誤差量  $\epsilon$  の特性を示す。ここで、 $\epsilon$  は次式で定義される。

$$\epsilon = E [|\rho(i, n) - \hat{\rho}(i, n)|] \quad (9)$$

ここで  $\hat{\rho}(i, n)$  は  $n$  番目のチャネルにおける  $i$  番目のスロット時間における測定占有率である。 $\epsilon$  は 10,000 回の施行結果で平均化している。本評価では、0 から 2500 スロット時間までの真の占有率 (“Real COR”) が図のとおりに変化する占有率モデルを用いて、真の占有率を平均アクセス確率とする PS のランダムアクセスをシミュレーションで実現した。そして、各時刻において SS の平均誤差量  $\epsilon$  を示している。なお、0 スロット時間以前にもセンシングを実施しているため、0 スロット時間では占有率を測定するメモリーにセンシング結果がすべて記録されている状態になっている。“AM”、“WM”、“Proposed” はそれぞれ、メモリー法、重み法および提案法の結果を示している。図5より占有率が変化する 300 スロットおよび 1300 スロットの時間の直後において、提案法が最も低い平均誤差量を達成している。また、真の占有率が変化していない定常時においても、メモリー法とほぼ同等の結果となっている。これより提案法が高い時間追従性と定常時における高い測定精度を両立していることがわかる。

## 7. む す び

本稿では PS のチャネルの占有率が時間と共に変化する

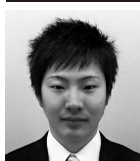
無線システム環境において、高い時間追従性と良好な測定精度を実現する占有率測定法を提案し、その有効性を示した。PS のさまざまなアクセスモデル (トラヒックモデル) における占有率測定の定量的な評価が、今後の検討課題である。

## 謝 辞

本研究の一部は 2013 年度総務省 SCOPE 「環境認知型超高効率無線センサネットワークの研究開発 (135003005)」の助成、及び科研費 (24760293) の助成により実施した。

## 〔文 献〕

- 1) “Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for IMT”, ITU-R, Report M.2243 (2011)
- 2) J.Mitra III and G.Q.Maguire, “Cognitive radio: making software radios more personal,” IEEE Personal Commun., 6, 4, pp.13-18 (Aug. 1999)
- 3) P. J. Jeong and M. Yoo, “Resource-aware rendezvous algorithm for cognitive radio networks,” The international conference on advanced communication technology, pp.1673-1678 (Feb. 2007)
- 4) A. Papoulis, Signal analysis, MCGraw-Hill (1977)
- 5) E. Kreyszig, Introductory mathematical statistics -principles and methods-, John Wiley & Sons. (1970)
- 6) K. C. Chen and R. Prasad, Cognitive radio networks, Wiley (2009)
- 7) Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing II Detection Theory, Prentice-Hall PTR (1998)



わかお ゆうた 若尾 悠太 2012 年 信州大学工学部卒業、2012 年より信州大学大学院 修士課程に在学。主としてコグニティブ無線の研究に従事。学生会員。



たきぐわ おさむ 田久 修 2002 年 東京理科大学理工学部卒業、2003 年 慶應義塾大学大学院 修士課程修了、2006 年慶應義塾大学大学院 博士課程修了 博士 (工学)、2004 年オーストラリアシドニー大学 Visiting Scholar. 2006 年慶應義塾大学特別研究助手 (専任)、2007 年東京理科大学理工学部電気電子情報工学科 嘱託助教、2011 年信州大学工学部電気電子工学科 助教、2013 年同大学 准教授。現在、無線通信システムに関する研究に従事。



ふじい たけお 藤井 威生 1997 年 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1999 年同大学院修士課程修了。2000 年同大特別研究助手。2002 年同大学院博士課程修了。博士 (工学)。2002 年東京農工大学工学部電気電子工学科助手。2006 年電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター助教。現在、同大学同センター准教授。コグニティブ無線、アドホック無線ネットワークの研究に従事。



さかもり ふみひと 笹森 文仁 1994 年早稲田大学理工学部電子通信工学科卒業。1996 年同大学院修士課程修了。2000 年同大学院博士課程修了。同年信州大学工学部助手、同助教を経て、2007 年准教授、現在に至る。デジタル無線通信技術の研究に従事。博士 (工学)。



はんだ しろう 半田 志郎 1978 年 信州大学工学部卒業、1980 年同大学院修士課程修了、1982 年神戸大学大学院博士課程中退、同年神戸大学工学部電気工学科助手、1988 年長野工業高等専門学校電気工学科講師、同校助教、1994 年信州大学工学部電気電子工学科助教、1996 年カルフォルニア大 (Davis 校) 客員研究員、2005 年信州大学工学部電気電子工学科教授、2012 年信州大学評議員。移動通信方式、可視光通信などの研究に従事。工学博士 著書「デジタル通信」。