

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760293

研究課題名(和文) コグニティブ無線に適した学習型占有率測定法の最適設計

研究課題名(英文) Optimization of Channel Occupancy Ratio Measurement with Learning Assist for Cognitive Radio

研究代表者

田久 修 (TAKYU, Osamu)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：40453815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：コグニティブ無線は無線通信資源である周波数の自由な運用を可能にするが、通信を確立する際に送受信機間で選択する周波数チャンネルが不一致となる問題が生じる。そこで、周波数チャンネルを共通化するプロトコルとして学習型占有率測定法に基づくランデブチャンネルを提案した。提案法は、既存の無線システムがチャンネルの平均利用率である占有率を手がかりとし、占有率認識をプロトコル前の事前学習で行うことで高速化と不活性な周波数資源の利用を可能にする。理論解析による基本原理の確立からソフトウェア無線機を使用した実機評価を進め、有効性を最大限に引き出す最適な学習法、環境認識法およびチャンネル選択法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Cognitive radio is available for the free access protocol of wireless communication channel. Since the transmitter and the receiver can access any channel, the mismatch of accessing channel between them occurs. We propose the rendezvous channel based on channel occupancy ratio (COR) measurement with learning assist for recovering the mismatch of accessing channel. The post learning period of measuring COR makes it possible to be high speed and exploit the frequency resource. In this research, the fundamental principles of COR measurement with learning assist are constructed by theoretical analysis and the practical evaluation based on software defined radio is performed for clarifying the merit of the proposed rendezvous channel. The proposed rendezvous is optimized to bring out ability.

研究分野：無線通信

キーワード：媒体アクセス制御 コグニティブ無線

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンの普及により移動無線通信の伝送容量が爆発的に増加している。そのため、移動無線通信の通信資源である周波数が枯渇している。このような周波数資源の枯渇問題を解決する方法としてコグニティブ無線が注目されている。コグニティブ無線は、無線機が周辺における周波数資源の利用状況を認識し、利用されていない空き周波数を積極的に活用する無線通信システムである。コグニティブ無線は利用者が必要な帯域を必要な時間、その無線環境の特殊状況を考慮したうえで使用することで、無線資源の制約を大幅に緩和し、周波数資源の枯渇を緩和することができる。

しかし、コグニティブ無線では各端末が利用できる周波数帯域を選択的に利用できる自由度が広がるため、通信を確立する送受信機の接続チャンネルが不確定になる問題が生じる。この問題を解決する方法として、ランデブチャンネルがある。ランデブチャンネルは送信機（マスタ）が無作為にチャンネルを選択して通信要求を求める制御信号を発信して、接続相手である受信機（スレーブ）が偶発的に受信できるまで続ける。その結果、接続している可能性のあるチャンネル数が増加するほど、ランデブチャンネル確立に必要な制御信号の発信回数の増加や確立までの時間が大きくなる。それゆえ、コグニティブ無線の実用化に向けて、深刻なボトルネックとなる。

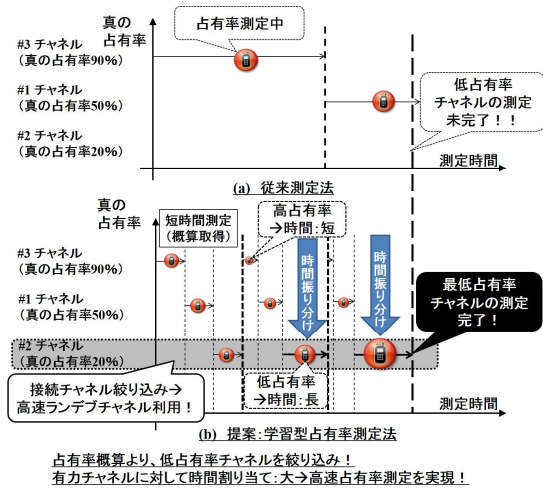


図 1 学習型占有率測定法の概要

これまで、高速なランデブチャンネルを確立する方法として、学習型占有率測定法に基づくランデブチャンネルを確立した(図1)。各チャンネルの平均的な時間利用率を占有率とし、ランデブチャンネルや通信利用時に利用できる機会が多く得られる低占有率のチャンネルを有利チャンネルとした。そして、有利チャンネルを高速に発見する方法として、占有率観測中に有利チャンネルと期待されるチャンネルの測定時間を大きくすることで、占有率を高速かつ高精度に測定する。この学習型占有率測定法において、ランデブチャンネルを確立した場合、マスタとスレーブが制御信号を送

信する際、チャンネルが空くまでの待機時間を短くできるという利点だけでなく、有利チャンネルに集合するというルールが確立されるため、制御信号が受信できる確率が極めて高くなる。

このように学習型占有率測定法は、ランデブチャンネルの解決策と同時に、通信確立時にも有利チャンネルの発見に有効な方法である。しかし、本手法は事前学習の時間や各チャンネルへの接続ルールによって、周波数利用効率やランデブチャンネルに要する時間などが大きく変動するため、適切な設計が必要不可欠である。加えて、実無線環境において実機上の処理遅延などを考慮した場合に、本手法の有効性はまだ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、コグニティブ無線の周波数資源の効率化及びランデブチャンネルの高速化を目指すため、学習型占有率測定法の最適化設計を進めた。次の研究課題を設定した。課題1. 様々な無線環境に普遍的に適用できる学習型占有率測定法の理論基盤の導出  
課題2. 時間変動環境に対する高速追従を可能にする適応理論の導出  
課題3. 無線電波伝搬による学習型占有率測定法への影響を評価するための実装化  
以上の課題を解決する各種理論及び提案を導出し、有利チャンネルの高速発見やランデブチャンネルの高速化を実現した。そして、最適化を進め、最終的に実現できるチャンネル利用効率やランデブチャンネルにかかる時間や制御信号の送信回数を定量的に明らかにし、学習型占有率測定法の実用に向けた有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

課題1における学習型占有率測定法の理論基盤においては、特にランデブチャンネルにおける高速化を目的関数とする、凸最適化理論を駆使した。数式や計算機シミュレーションを中心に学習期間や各チャンネルの接続割合の最適化を進めた。主として研究成果4.(1)から4.(3)の結果を得た。課題2では、時間変動環境に追従可能な占有率測定法を新たに提案し、その有効性を計算機シミュレーションで明らかにしている。主として研究成果4.(4)から4.(5)の成果を得た。課題3では、無線通信の変復調機能をプログラムで書き換え可能なソフトウェア無線機(USRP)を導入し、実際の無線環境として5GHz帯の無線LAN環境において、学習型占有率測定法による測定実験を進めた。実利用環境において、学習型占有率測定法を適用し、チャンネルの利用効率を空きチャンネル発見率として定量評価を進めた。主として研究成果4.(6)から4.(7)の成果を得た。

4. 研究成果

(1) 学習型占有率測定法における高速ラン

デブチャネルを実現するための学習時間及び接続方法の最適化

図1に学習型占有率測定法による占有率測定の様子を示す。本手法では、最小占有率となる有利チャネルを探索するための事前の占有率測定時間を学習期間としている。この学習時間を長くするほど、占有率の測定精度が向上し、有利チャネルを正確に発見できる確率が高まる。しかし、占有率測定にかかる時間が大きくなると制御遅延が大きくなる。そこで、本課題ではランデブチャネルの確立に学習型占有率測定法を適用した際、有利チャネルを識別するために必要な学習時間について、ランデブチャネルに要する時間の観点で最適設計を進めた。最適設計では、各チャネルの利用状況を不規則変数でモデル化することで、ランデブチャネルに要する時間を理論的に導出した。そして、定量解析を進めた結果、図2に示すようにランデブチャネルの確立に要する時間が学習時間に対して凸傾向にあり、最適な学習時間が存在することを明らかにした。また、実利用環境を想定し、既存システムのアクセス状況を観測するキャリアセンスに誤りが生じたとき、最適な学習時間が大きくなることがわかった。これは、キャリアセンスによる利用状況の誤認識に対して、学習時間を拡大することで補償できるからである。

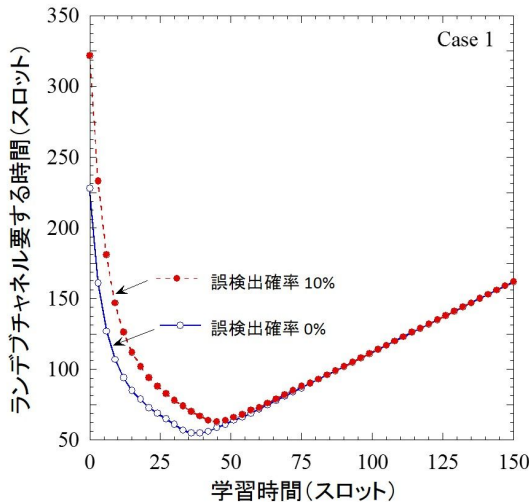


図2 学習型占有率測定法に基づくランデブチャネルの最適化

次に、ランデブチャネルを確立する際、通信要求を待つスレーブについて、マスタの制御信号を高確率で受信できる、チャネルの接続ルールについて検討した。まず、各チャネルへの接続割合をパラメータとして設定し、図3に示すアルゴリズムでランデブチャネルの確立に要する時間を最小化する最適な接続割合の導出を進めた。計算機シミュレーションによる評価の結果、占有率が低い有利チャネルとそれ以外のチャネルの占有率差が一定以上大きい場合、有利チャネルへの接続割合を大きくすることで高速化が実現された。反対に、占有率が均衡している場合には、各チャネルの接続割合も等比率となった。

本結果は、定性的には予想できる結果であるが、これを定量的に評価できる設計アルゴリズムを構築できた点が重要な成果といえる。この評価結果から、各チャネルの占有率の分布と最適な接続ルールを明らかにすることができた。現在、占有率分布も推定することで適切な接続ルールを選択する方法を継続的に研究している。本成果は学術論文誌(雑誌論文の業績)において成果を発表しており、解析的な妥当性や新規性が高く評価されている。

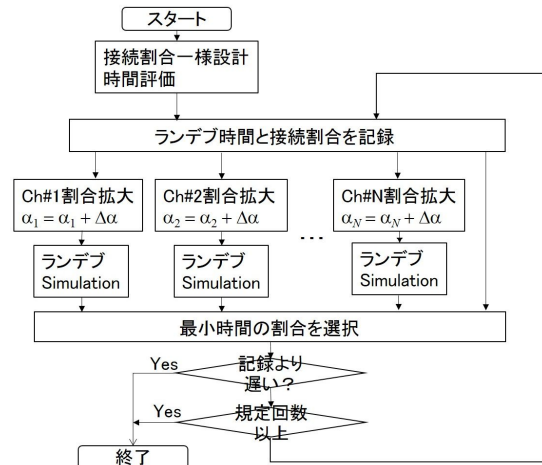


図3 スレーブの接続割合を最適化するアルゴリズム

## (2) センシング感度と送信電力制御の併用検討

学習型占有率測定法において、既存システムのアクセスを検出するキャリアセンスの感度について注目した。本検討では、キャリアセンスの感度を決定するエネルギーチャージ時間を変化させたとき、検出感度と検出時間にトレードオフが確立される。センシング時間と検出対象との関係を図4に示す。

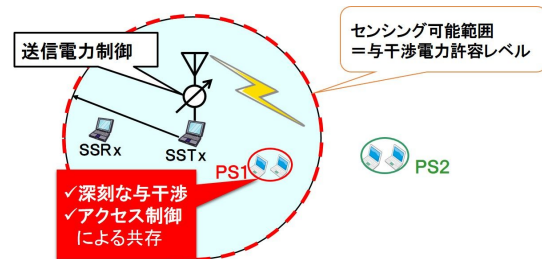


図4 キャリアセンス制御と送信電力制御の併用時の無線環境の様子

図4より、検出不全となる既存システムに対する干渉抑制対策が必要になる。そこで、送信電力制御による干渉抑制を適用し、達成するMACレベルスループットを数式により解析的に導出した。その結果、MACスループットは検出時間に対して凸傾向が認められた(図5)。最適なセンシング感度が明らかになった。本成果は、学術論文誌(雑誌論文の業績)において成果発表をしており、解析方法の妥当性と得られた成果の新規性が高く評価されている。

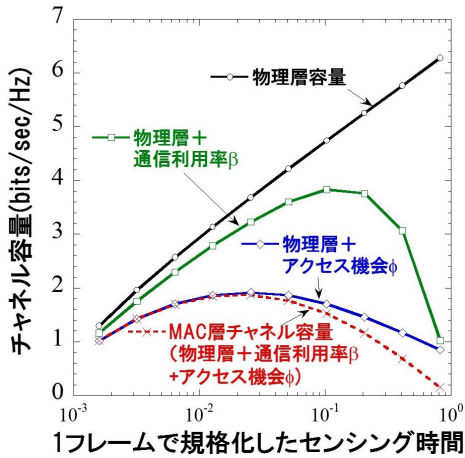


図 5 センシング感度に対する MAC レベルチャンネル容量の関係

(3) 制御信号の発信回数を抑制するランデブチャンネル法

学習型占有率測定法に基づくランデブチャンネルでは、マスタとスレーブが接続確認をする制御信号の交換を要する。制御信号の発信回数が増える場合、チャンネルの利用効率が低下するだけでなく、コグニティブ無線のように既存システムとチャンネルを共有する際、不特定の無線機に干渉を与える恐れがある。そのため、制御信号の発信回数を抑える計画的な発生方法が必要になる。図 6 に提案法のマスタの制御信号の発信方法及びスレーブの接続ルールを示す。

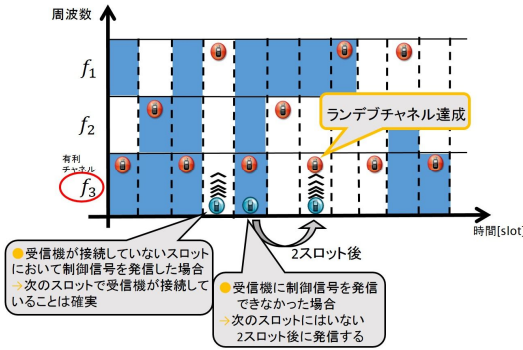


図 6 制御信号の発生回数を抑えるランデブチャンネル法

まず、スレーブでは、時間単位としてスロットを設定し、1 スロットごとに有利チャンネルへと接続するルールを設けた。その結果、スレーブでは他のチャンネルの利用率の変化の検出と同時に、有利チャンネルの接続に規則性を設けることができる。一方、マスタは制御信号を送信する際、偶発的にスレーブが受信できない場合には、一時的な他チャンネルへの接続と認識し、スレーブの接続ルールを考慮した待ち時間を設けた。その結果、制御信号の発信回数を効果的に抑えることができる。計算機シミュレーションにより有効性を明らかにした。

本成果は、電子情報通信学会スマート無線研究会において成果発表を実施し、提案法の

有効性及び新規性が高く評価され、2014 年度研究奨励賞を受賞した(学会発表の業績)。

(4) 時間変動に追従性の高い占有率測定法  
チャンネルの利用状況は既存システム(プライマリシステム: PS)の利用方針が変化することで変動する。PS が移動体である場合、地理的に遠方に移動した場合には、無線環境の影響は小さくなる。あるいは、インターネットにおけるブラウジングの場合、コンテンツを利用しているリーディングタイムにおいては、通信接続は一時的に停止する。その結果、各チャンネルの占有率は時間とともに変動するため、時間変化に追従性の高い占有率測定法が必要になる。複数のメモリを併用する占有率測定法を新たに提案した。図 7 に、提案法の処理フローを示す。

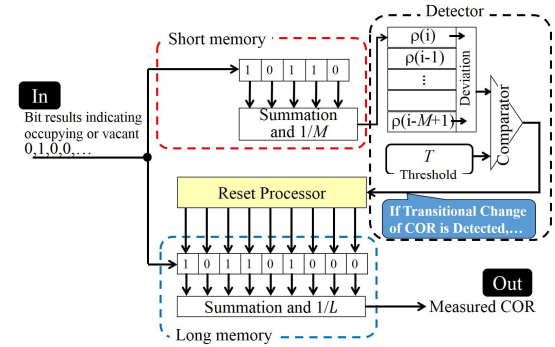


図 7 時間追従性の高い占有率測定法

提案法では、占有率を測定することに特化したメモリ長の長いメモリと占有率の変化を観測することに特化したメモリ長の短いメモリを並列に使用する。もし、メモリ長が短いメモリにおいて、占有率の変化を認識した際には、メモリ長に記憶された過去の結果を一括消去する。これにより、占有率の変化に対して過去の結果の影響を緩和することができ、高精度かつ追従性のある占有率測定が可能になる。図 8 に、計算機シミュレーションによる評価結果を示す。図 8 より、既存法と比較して、高い追従性と定常時における低

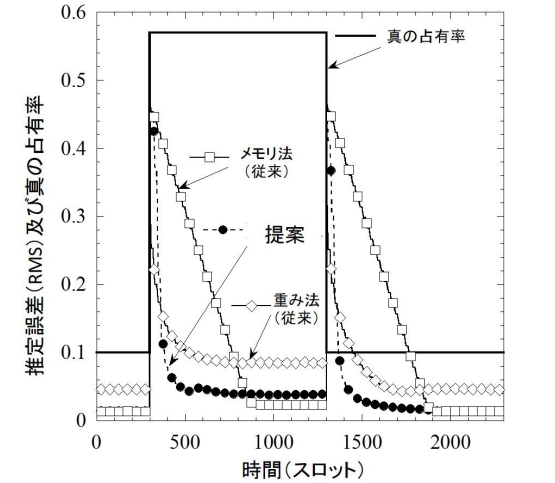


図 8 占有率測定の誤差評価

い占有率測定誤差を達成しており、提案法が高速性と追従性を両立していることを確認した。本成果についても学術論文誌（雑誌論文）の業績）において成果を発表しており、新規性が高く評価されている。

#### (5) 占有率・遷移率の高精度測定法

占有率は定常的なチャンネルの空き状況を与えるが、チャンネル状態が空きとなる待ち時間は不明である。特に、リアルタイム性が求められるアプリケーションの利用を想定した場合、空きチャンネルを発見するまでに予想される待ち時間を明らかにすることは必要不可欠である。そこで、チャンネルの状態推移をマルコフモデルでモデル化することで、状態が推移する確率を遷移確率として定義し、推定方法を提案した。ここでは、モデル化を活用し、時間的に連続するセンシング結果に相関があることに注目し、相関情報から各センシング結果を補正する方法を確立した。計算機シミュレーションによる評価の結果、提案法の有効性を示している。研究期間終了後に成果が得られ、国内学会において成果発表を進めている（文献）。

(6) 学習型占有率測定法を実装したソフトウェア無線機による無線 LAN 環境での測定プログラムにより書き換え可能なソフトウェア無線機 USRP に学習型占有率測定機能を実装し、無線 LAN 環境（5GHz）帯において占有率評価を進めた。USRP による実装では、チャンネル切り替え時に発振器から発せられる過渡的な電気信号が信号測定に干渉することが認められた。これを回避するため、測定停止時間を適宜設ける必要があり、学習型占有率測定法における追従性劣化の原因の1つとなった。ソフトウェアによる制御では、ソフトウェア LabView を使用し、占有率の変動をリアルタイムでモニタできるインターフェースを構築した（図9）。

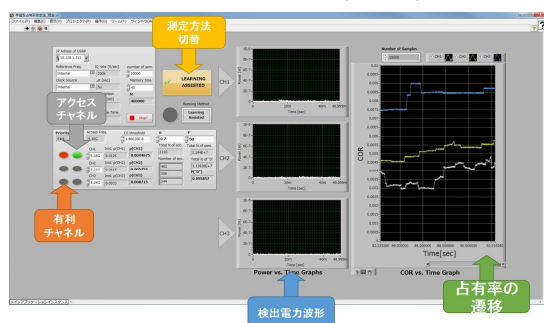


図9 学習型占有率測定法を実装したUSRPの操作パネル

最終的に5GHz帯の3つのチャンネルにおいて、同一室内におけるチャンネル利用状況を観測した。測定環境を図10に示す。その結果、空きチャンネルを発見できる確率が既存法は65%であるのに対して、学習型占有率測定法は77%へ高めることができ、実利用状況に近い環境においても、有効性が明らかになった。

次に、占有率が時間変動する環境において、学習型占有率測定の追従性の評価を進めた。評価結果を図11に示す。その結果、有利チャンネル外の占有率が低下した場合には、検出感度は鈍く、チャンネル切り替えに時間を要したが、有利チャンネルの占有率が拡大した場合には、高速にチャンネルを切り替えることができることを確認した。それゆえ、低い占有率のチャンネルを高速に選択できるという利点が明らかになり、占有率が時間変動する環境においても、有効性を確認した。

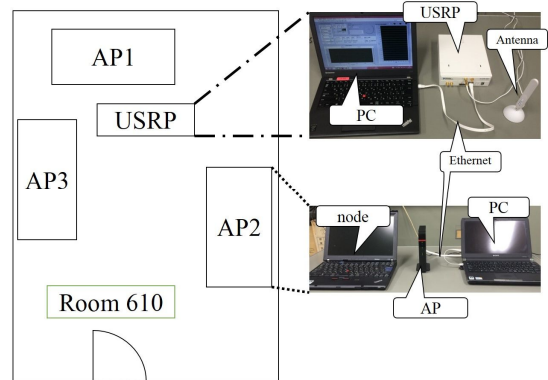


図10 5GHz無線LANの実験環境

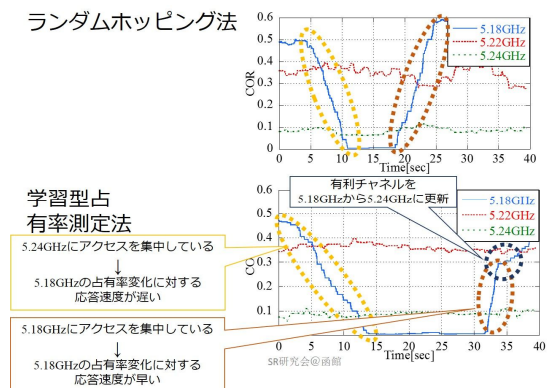


図11 占有率が時変環境における占有率測定結果

この評価結果は、4.(1)の学習型占有率測定法における最適化を適用していない。各チャンネルの接続割合等を最適化したときに、実環境における空きチャンネル発見率の定量評価を継続的に進めている。

#### (7) スター型ネットワークに適したランデブチャンネル用制御信号

ランデブチャンネルでは制御信号の交換により、マスタ及びスレーブのチャンネルの共通化を図る。無線LANなどでは、1つの無線端末がネットワークの入り口となり、通信を集約するスター型のネットワーク構成となる。このようなネットワークでは、1つの端末(アクセスポイント)がすべてのノードの接続チャンネルを一括して共通化する必要がある。アクセスポイントが、制御信号としてあて先情報などを記したパケットで構成した場合、必要帯域が大きくなることや、既存システムとの競合が生じた際の干渉が大きいという欠点がある。

そこで、掃引搬送波を利用した同期確立法を提案した。掃引搬送波とは利用できる周波数帯域間で中心周波数を切り替える搬送波である。掃引搬送波を受信したノードは、周波数が推移する方向に周波数を切り替える。その結果、マスタ側は多数のスレーブに対して一括して接続チャンネルを共通化することができる。実験では、LabView によるインターフェイスを開発し、接続チャンネルの様子を目視で確認できる環境を構築した(図 12)。実機評価の結果、掃引搬送波を受信するエネルギー量は搬送波周波数が推移する速度に対して逆特性となるため、信号検出感度とランデブチャンネルを確立に要する時間との間にトレードオフの関係があることを示した。

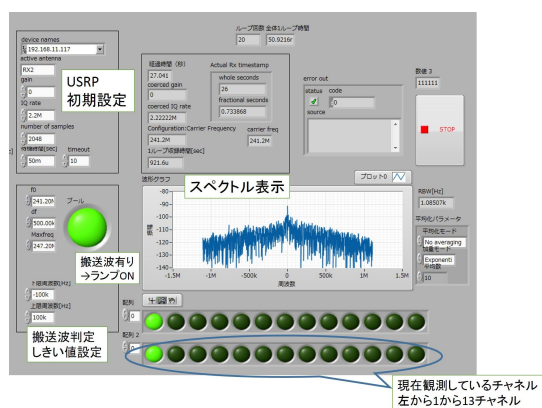


図 12 掃引搬送波によるランデブチャンネル法の USRP 操作パネル

< 引用文献 >

征矢隼人、田久 修、白井啓一郎、藤井威生、太田真衣、笹森文仁、半田志郎、信号電力と雑音電力推定を考慮したマルコフモデルに基づく占有率・遷移率測定法、電子情報通信学会スマート無線研究会、SR2015-13, pp. 79-85, 2015.5.29, 兵庫県明石市

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Osamu Takyu, Takayuki Yamakita, Takeo Fujii, Mai Ohta, Fumihito Sasamori, and Shiro Handa, Optimization of Learning Time for Learning-assisted Rendezvous Channel in Cognitive Radio System, IEICE Transaction on Communication, vol. E98-B, no.2, pp.360-369, Feb. 2015、査読有、DOI:10.1587/transcom.E98.B.360  
若尾 悠太、田久 修、藤井 威生、笹森 文仁、半田 志郎、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、4pages, 映像メディア学会誌, vol.68, no.5, pp. J213-J216. 2014年5月、査読有、DOI:  
<http://doi.org/10.3169/itej.68.J213>

堀江駿太、田久修、藤井威生、榎田洋太郎、スロットベースのランダムアクセス型プライマリシステムと周波数共有するセカンダリシステムのキャリアセンス制御と干渉マージンの設計、電子情報通信学会和文論文誌 B、vol.J96-B, no.7, 729-741, 2013年7月、査読有

[学会発表](計19件)

後藤雅之、田久修、藤井威生、太田真衣、笹森文仁、半田志郎、無線 LAN 環境におけるマルチチャンネル有効利用のための学習型占有率測定法を適用した USRP による占有率測定評価、電子情報通信学会スマート無線研究会、vol. 114, no. 435, SR2014-103, 57-62, 2015.1.30, 北海道函館市

Osamu Takyu, Takayuki Yamakita, Takeo Fujii, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, Learning assisted rendezvous channel in cognitive radio system, in proc. IEEE ICCS 2014, 452-456, 2014.11.20, 中国マカオ

米田司、田久修、太田真衣、藤井威生、笹森文仁、半田志郎、制御信号の発信回数を抑えた高速ランデブチャンネル法の検討、電子情報通信学会スマート無線研究会、vol. 114, no. 165, SR2014-56, 191-195, 2014.8.1、京都府京都市(2014年度電子情報通信学会スマート無線研究会 研究奨励賞受賞)

Masayuki Goto, Osamu Takyu, Takeo Fujii, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, Protocol Analysis of Signal Detection for Deriving Minimum Isolation Distance for Frequency Recycling under WLAN Systems, IEEE RWS 2014, pp.262-264, 2014.1.22, 米国ニューポートビーチ

Masayuki Goto, Osamu Takyu, Takeo Fujii, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, Analysis of Channel Usage Tendency from Indoor Measurement Results in Wireless LAN System, IEEE APWCS 2013, 411-414, 2013.8.23、韓国ソウル  
Takayuki Yamakita, Osamu Takyu, Takeo Fujii, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, Theoretical analysis for learning-assisted rendezvous channel for cognitive radio, IEEE Communication Theory workshop 2013 (ポスター発表)、2013.6.24、タイプラケット

6. 研究組織

(1)研究代表者

田久 修 (TAKYU, Osamu)  
信州大学・学術研究院工学系・准教授  
研究者番号：40453815