

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760266

研究課題名（和文） 周波数共用のための空間及び時間次元からの無線環境認識法

研究課題名（英文） Spectrum measurement technique in time and space domains for spectrum sharing

研究代表者

梅林 健太 (Umebayashi Kenta)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20451990

研究成果の概要（和文）：

電波利用システムの需要増加による周波数逼迫問題を解決するための有効な解決手段として、既存無線システムと新規無線システムによる高効率でダイナミックな周波数共用システムの早期実現が望まれている。本研究では周波数共用システムの実現のために、隣接端末との協調戦略に基づく空間軸及び時間軸からの無線環境認識法(協調的多次元無線環境認識法)の開発を行う。複数無線機による協調戦略に基づき、簡易で高精度な無線環境認識法を確立し、多次元(空間軸、時間軸)無線環境認識により、効率的に空き無線リソースを発見する手法を開発する。本手法の特徴は既存無線システムに対する保護基準を満たす周波数共用技術の確立にある。

研究成果の概要（英文）：

It is required to achieve effective and dynamic spectrum sharing system by licensed wireless system (primary system) and new wireless system (secondary system) to tackle the spectrum scarcity problem due to rapid demand increment growing. In this study, we investigate cooperative spectrum measurement in time and space domains. In cooperative spectrum measurement, secondary terminal measure the spectrum in cooperation with the surrounding secondary terminals. This approach can achieve accurate measurement result in the both domains by simple measurement technique. Main purpose of this study is to establish spectrum sharing technique which can protect primary system properly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：無線通信

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：センシング, 先端的通信, 周波数共用, 情報通信工学

1. 研究開始当初の背景

近年、急速な無線通信システムの普及や発展に伴い、周波数資源の逼迫が問題となっており、新規無線システムへ割り当てる周波数が十分確保できない。一方で、既に周波数が割り当てられている既存無線システムによる割り当てられた周波数の利用状況を時間・空間軸から観測すると、周波数は常に有効利用されているわけではないことが報告されている。下記図1にその一例を示す。横軸は周波数であり、縦軸は観測された振幅を示しており、ところどころ周波数が使用されていないことが確認出来る。

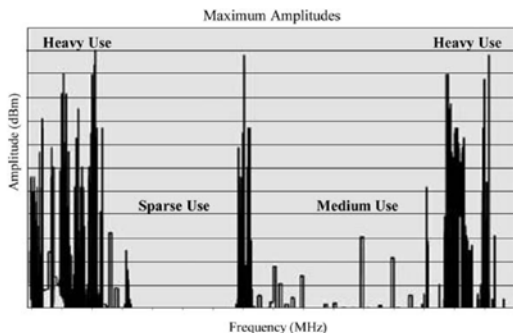


図1：周波数帯の利用状況観測例（参照：Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, “Cognitive radio wireless networks: A survey”, Elsevier Computer Networks, vol, 50, no. 13, pp. 2127-2159, May 2006）

上記の現実を鑑み、周波数逼迫問題を解決するための有効な解決手段として、既存無線システム（プライマリシステム）と新規無線システム（セカンダリシステム）による周波数共有が注目を浴びている。本周波数共有を実現するには、新規無線システムは、(1)無線環境認識技術により既存無線システムの無線利用状況を把握し、(2)既存無線システムを保護しつつ、(3)空き周波数を有効利用することが求められている。

プライマリユーザの信号を検出するスペクトラムセンシングが環境認識技術としてIEEE802.22等で検討されているが、非常に低いSNR（例：-20dB）において高精度にプライマリユーザの信号を検出することは困難とされてきた。このような問題に対して、複数セカンダリユーザがそれぞれの観測情報を融合してプライマリユーザの信号の検出を行う「協調センシング」は、低SNRでも高精度な検出が可能であるとして、2006年よりアメリカで検討が開始された（S. M. Mishra, Proc. IEEE ICC, 2006）。しかしながら、協調処理において時間がかかることが課題とされている。IEEE802.22では、プライマリシステムとして常時送信を行うテレビシステムを想定し、空間軸からの周波数共

用を想定している。テレビシステムはその状態及び環境がほぼ時間不変であり、協調処理時間がボトルネックとはならない。

一方で、無線LANなどをプライマリシステムとした周波数共有では、プライマリユーザ状態と環境は動的に変化するため、協調処理時間がボトルネックとなる。また、時間軸と空間軸で動的に変動する環境ではプライマリユーザに対する保護基準を満足することが困難であり、これまで十分な検討がなされてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では周波数共有システムの実現のために、隣接端末との協調戦略に基づく空間軸及び時間軸からの無線環境認識法（協調的多次元無線環境認識法）の開発を行う。これまでの応募者の成果を紹介しつつ具体的な研究の方向性を以下に示す。

応募者は、正確にセンシングが可能な距離内にある小規模ネットワークを想定し、動的に送信状態が変化するプライマリユーザとの周波数共有を実現するため、時間軸からの周波数共有の基準として、時間占有率を用いた周波数共有システムを提案した。従来は瞬時の時間占有状況を環境情報とし、与干渉レベルに基づくプライマリユーザの保護を行っていたが、時間平均されたプライマリユーザの周波数占有率（時間占有率）を新たな環境情報とし、プライマリユーザの時間占有率を保護することで、プライマリユーザのスループット特性を保護しつつセカンダリユーザのスループットを最大化させる周波数共有が可能であることを示した。また、時間占有率情報を得るには高精度なセンシング技術が必要であることを示した。また、応募者は、複数セカンダリユーザの観測情報に適応的な重みを用いる協調センシングを提案し、最適な検出精度が得られることを解析的に示した。また、応募者は、限定された電波伝搬モデルではあるが、解析的にプライマリユーザ保護基準を満たす協調センシングを提案し、プライマリユーザの保護を実現することが可能であることを示した。

しかしながら、研究の進行に伴い下記の問題及び課題（下記：P1～3）が明らかとなった。大規模なプライマリユーザネットワークとの周波数共有では、(P1):時間軸のみを考慮した環境認識に基づく周波数共有法では、プライマリユーザに対して与干渉を与えてしまう。また、時間占有率情報を得るには、検出された信号において、プライマリユーザとセカンダリユーザの識別する必要がある。また、(P2):環境認識精度を高めるには、各端末がより多くの情報を収集し、交換するため、協調プロセス（情報収集等）の時間及び電力のコストが膨大となり、協調を行わない方が結

果的に良くなる場合が出てきてしまう。そして、(P3) プライマリユーザ保護のための無線環境の多様で不確定な変動を認識するアルゴリズムの検討が不十分である。本研究では、前記成果を基にして、空間軸及び時間軸からの効率的な周波数共用のための無線環境認識法の開発と、プライマリユーザ保護を実現するための無線環境認識法の設計基準と方法の確立を目指す。

3. 研究の方法

研究を進めるにあたり、応募者は周波数利用の観測を主に、(1):空間(距離)、(2):空間(アンテナ・位相)、そして(3):時間に分けそれぞれの軸をベースに研究を進める。

(1):空間(距離)

電波伝搬モデルとして距離減衰、シャドウフェージングそしてレイリーフェージングを考慮した。また雑音の影響も考慮した上でプライマリシステムからの観測信号をもとにセカンダリシステムがプライマリシステムを保護するための手法を Matlab をベースとして開発した。

上記の電波伝搬モデルを全て考慮した場合、シャドウフェージングそしてレイリーフェージングはランダム過程であるため、それらの影響を減らす手法が必要となる。本研究では、そのために協調センシングを前提とした解析を行った。また、複数アンテナを用いたレイリーフェージングの影響軽減法の提案も行った。

また、影響を減らしたとしてもプライマリシステムへの影響を定量的に評価するため、解析が必要となる。そこで、本研究では、それぞれの場合において解析を行った。

(2):空間(アンテナ・位相)

セカンダリシステム内の無線機が複数アンテナと重み制御を用いることでプライマリシステムに対する干渉を抑圧することが可能である。本研究では、重み制御の際に用いる電波環境情報(セカンダリ送信機—プライマリ受信機間通信路情報)が完全に得られないことを前提とし、解析を行い、その解析結果を用いて送信電力を行うことでプライマリシステムに対する悪影響を設定値以下にすることが可能であることを示す。

(3):時間

時間軸からの利用周波数の観測では、時間軸からの利用率を正確に導出することが求められる。実際にスペアナと直結された汎用計算機を用いて周波数の時間利用率観測を行う場合、その観測精度について深い議論がされていない。

本研究では、電力検出の技術を周波数・時間軸の2次元 bin に対する信号検出に用い、複数 bin の検出結果を利用することでダイバーシチゲインを得てより高精度な時間利用

率観測法の提案を行った。

最後に、それぞれの技術を組み合わせた多次元周波数観測法の確立・統合化を行った。

4. 研究成果

(1):空間(距離)

本研究では、セカンダリにおける観測結果と、その観測結果により電力制御を行った場合のプライマリシステムにおける干渉電力の統計値を解析した。この解析結果により、セカンダリシステムが電力制御を適切に行うことでプライマリを保護可能であることを示した。

さらに、協調型の周波数観測により電力制御を行ったセカンダリシステム(MATP-C)のキャパシティと単独型の周波数観測により電力制御を行ったセカンダリシステム(MATP-I)のキャパシティをプライマリシステムとセカンダリシステムの距離差に対して特性評価を行った。

この結果を図2に示す。但し、MATP-Pは観測時に誤差等がおきない場合を想定した上限値に相当する。本結果より、協調戦略を用いた場合の方が高いキャパシティ特性を達成できることが確認でき、本研究成果の有効性が確認出来る。

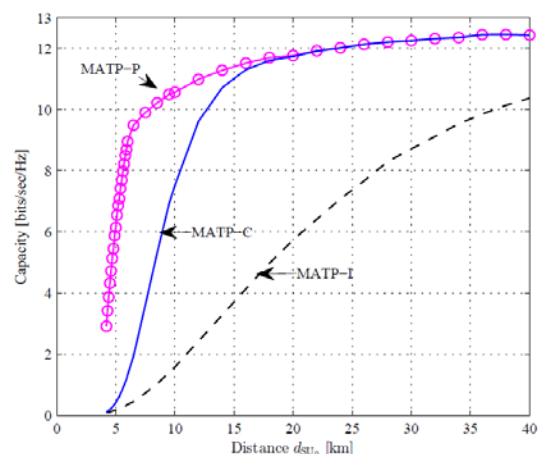


図2: 協調型(MATP-C)と単独型(MATP-I)のキャパシティ特性評価

(2):空間(アンテナ・位相)

従来の複数アンテナと重み制御による干渉抑圧法では、電波環境情報(セカンダリ送信機—プライマリ受信機間通信路情報)が完全に既知であることが想定されていたが、この仮定は現実的でない。

本研究では、推定誤差及びプライマリユーザに対する干渉電力の解析を行うことで、事前に設定した干渉に関する拘束条件を満たせることを確認した。具体的には、閾値干渉電力レベルを超えない確率を P_{out} とし、 $P_{out}=0.99$ とした。

図3に特性評価の一例を示す。横軸が干渉電力で、縦軸が P_{out} に相当する。本結果より、提案方式は解析を正確に行ったため拘束条件（干渉電力が閾値 0.1 を超えない確率が 0.99 以上）が満たせているのに対して、従来方式ではそれが満たせていないことが確認出来る。

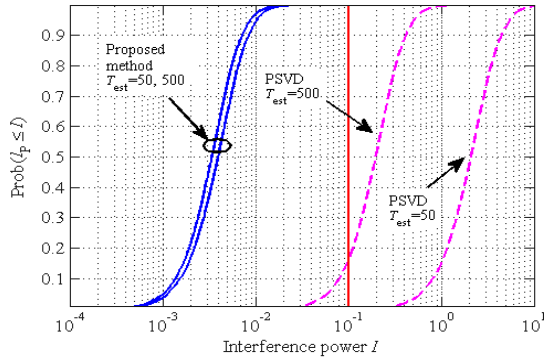


図3:干渉電力 vs P_{out} ($=\text{Prob}(I_p \leq I)$)特性。
Proposed method vs PSVD (従来方式)
(3):時間

提案の時間占有率推定法の評価及び理論解析の妥当性の確認を行った。さらに、実証実験により本提案手法が高い推定精度が達成可能であることを確認した。

具体的な特性評価を図4に示す。本結果は提案手法を用いて1週間の特性評価結果である。ここでは目標誤警報確率を 1/10000 と非常に低く設定しているにも関わらず達成できていることが確認出来る。

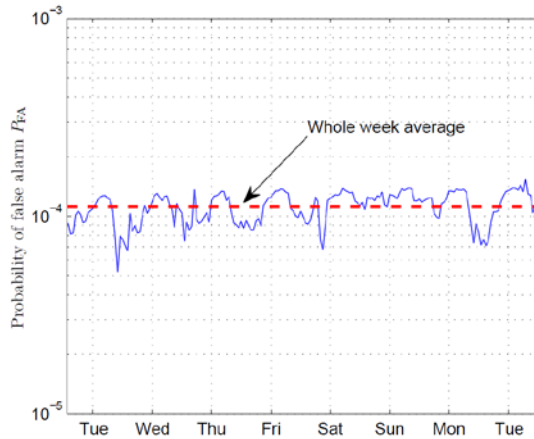


図4:誤警報特性(目標値 1/10000)

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 7 件)

① Janne Lehtomäki, Risto Vuotoniemi, K. Umebayashi “On the Measurement of Duty Cycle and Channel Occupancy Rate,” IEEE

Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 31, No. 8, 2013. (Accepted).

(DOI: 10.1109/JSAC.2013.131114) [査読有]

② Isameldin Mohammed Suliman, Janne Lehtomäki, K. Umebayashi, Marcos Katz, “Analysis of Cognitive Radio Networks with Imperfect Sensing,” IEICE Transactions Communications, Vol. E96-B No.6 pp.1605-1615, 2013.

(Web:http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-b_6_1605&category=B&lang=E&year=2013&abst=) [査読有]

③ K. Umebayashi, H. Tsuchiya, Y. Suzuki, “Analysis of Optimal Weighted Cooperative Spectrum Sensing with Multiple Antenna Elements,” IEICE Transactions Communications, E95-B: 10, pp. 3261-3269, 2012.

(Web:http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-b_10_3261&category=B&lang=E&year=2012&abst=) [査読有]

④ Janne J Lehtomäki, R. Vuotoniemi, K. Umebayashi, J - P. Mäkelä, “Energy Detection Based Estimation of Channel Occupancy Rate With Adaptive Noise Estimation,” IEICE Transactions Communications, E95-B: 04, pp. 1076-1084, 2012.

(Web:http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-b_4_1076&category=B&lang=E&year=2012&abst=) [査読有]

⑤ K. Umebayashi, Janne Lehtomäki, T. Yazawa, Y. Suzuki, “Efficient Decision Fusion for Cooperative Spectrum Sensing Based on OR-rule,” IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 11, No. 7, pp. 2585 - 2595, 2012.

(DOI: 10.1109/TWC.2012.052412.111727) [査読有]

⑥ Johanna Vartiainen, Janne J. Lehtomäki, Harri Saarnisaari, Markku J. Juntti, Kenta Umebayashi, “Two-Dimensional Signal Localization Algorithm for Spectrum Sensing,” IEICE Transactions Communications, 93-B pp.3129-3136, 2010.

(Web:http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e93-b_11_3129&category=B&lang=E&year=2010&abst=) [査読有]

⑦ Zaheer Khan, Janne Lehtomäki, Kenta Umebayashi and Johanna Vartiainen, “On the Selection of the Best Detection Performance Sensors for Cognitive Radio Networks,” IEEE Signal Processing Letters, Vol. 17, No. 4, pp. 359 - 362, 2010. (DOI: 10.1109/LSP.2010.2041581) [査読有]

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① Samuli Karri Tiirio, Kenta Umebayashi, and Yasuo Suzuki, “Power Control Method for MIMO-Based Cognitive Radio With Imperfect Channel State Information” in the proceeding of IEEE Wireless Communications And Networking Conference (WCNC2013), 2013 年 4 月 10 日・中国, 上海.
- ② 圓井俊樹, 梅林健太, 鈴木康夫, “協調センシングのためのフェージング環境に適した観測情報収集法,” 電子情報通信学会 2013 年総合大会, B-17-32, 2013 年 3 月 21 日・岐阜, 岐阜大学.
- ③ 森田正樹, 梅林健太, 神谷幸宏, 鈴木康夫, “周波数共用のための PU 保護マージンの最適化” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, B-5, 2013 年 3 月 2 日, 東京, 東海大学.
- ④ K. Umebayashi, Y. Suzuki, “Analysis of optimal weighted cooperative spectrum sensing based on estimation of primary user signal power,” in Proc. IEEE SPAWC, 2012 年 6 月 20 日・トルコ, チェズメ.
- ⑤ K. Umebayashi, Janne Lehtomäki, Y. Suzuki, “Study on Efficient Decision Fusion in OR-rule based Cooperative Spectrum Sensing,” in Proc. IEEE WCNC, 2012 年 4 月 3 日・フランス, パリ.
- ⑥ 星大樹, 梅林健太, 鈴木康夫, “周波数共用のための協調型与干渉電力推定によるリソース制御法に関する一検討,” 電子情報通信学会技術報告, SR2011-90 pp. 73-80, 2012 年 1 月 27 日・鹿児島.
- ⑦ Johanna Vartiainen, Janne Lehtomäki, Timo Bräysy, Kenta Umebayashi, “Spectrum Sensing in Public Safety Applications: The 2-D LAD ACC Method” in Proc. ICST CROWNCOM, 2011 年 6 月 1 日・大阪.
- ⑧ K. Umebayashi, Janne Lehtomäki, S. Hatakeyama, Y. Suzuki, “Cyclostationary spectrum sensing under four-level hypothesis for spectrum sharing” in Proc. IEEE PIMRC workshop (Wireless Distributed Network), 2011 年 9 月 11 日・カナダ, トロント.
- ⑨ 辻真志, 梅林健太, 神谷幸宏, 鈴木康夫, “アレー自由度を超える到来波の波数推定法の一検討,” 電子情報通信学会技術報告, AP2010-139, pp. 37-42, 2011 年 1 月 20 日・佐賀大.
- ⑩ 矢澤孝尚, 梅林健太, 神谷幸宏, 鈴木康夫, “協調センシングにおける観測情報収集の効率化に関する一検討,” 電子情報通信学会技術報告, RCS2010-100, pp. 129-134, 2010 年 8 月 27 日・鹿児島大学.
- ⑪ 梅林健太, 畠山信也, 神谷幸宏, 鈴木康夫, “周波数共用のための周期定常性を用いた

システム同定法” 電子情報通信学会技術報告, SR2010-17, pp. 7-12, 2010 年 7 月 29 日・京都, ATR.

〔図書〕(計 1 件)

- ① 三瓶政一, 阪口啓, 松本隆太郎, 衣斐信介, 山本高至, 梅林健太, 落合秀樹, 石井光治, 山里敬也, 石橋功至, 小野文枝, 萬代雅希, 岡田啓, 上原秀幸, 大槻知明, 藤井威生, “無線分散ネットワーク”, 電子情報通信学会, 2011 年 3 月. (pp. 88-100)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅林 健太 (Umebayashi Kenta)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 20451990