

平成 30 年 7 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0200

研究課題名（和文）協調型周波数利用観測システムの開発（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Development of cooperative spectrum usage measurement system(Fostering Joint International Research)

研究代表者

梅林 健太（UMEBAYASHI, KENTA）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20451990

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,300,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、高精度な周波数利用観測を低コストで実現するための各要素技術を開発し、かつそれらを一つのシステムで効率的に実現するための技術検討を行ってきた。特に、複数の観測機が協調するタイプの協調型周波数利用観測システムに着目した。まずは、単独の無線機が高精度に観測を行うための周波数利用検出の信号処理開発に取り組み、次に、それらを実装した複数の観測機による協調型周波数利用観測法の開発に取り組んできた。実証実験をオウル大学との国際共同研究を通じて行い、我々の開発してきた要素技術と、その協調型観測システムにおける融合方法の有効性と妥当性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, spectrum usage measurement techniques has been investigated to achieve an accurate and efficient (low computational cost) spectrum usage measurements. Especially, we focus on cooperative spectrum usage measurement system in which multiple sensors cooperate with each other. At first, we develop signal processing techniques for the spectrum measurement in a sensor, after that a cooperation process by the multiple sensors has been investigated. A validity and efficiency of the developed techniques were confirmed by the spectrum measurement demonstrations based international cooperation with University of Oulu, Finland.

研究分野：無線通信

キーワード：ダイナミックスペクトラムアクセス 周波数共用 周波数利用観測 コグニティブ無線 協調型観測法
信号領域推定

1. 研究開始当初の背景

ダイナミックで柔軟な周波数の利用を実現するため、空き周波数を利用することで、無線システム間の周波数共有を実現する DSA(ダイナミックスペクトラムアクセス)が注目を浴びている。DSA を実現するには、空き周波数を正確に、素早く、低コストで発見することが求められるが、要求条件を満たす空き周波数発見技術(スペクトラムセンシング)の実現は困難とされている。

上記課題に対して、申請者は周波数利用観測システムの開発をこれまで行ってきた。周波数利用観測システムが観測に基づき得られた周波数利用統計情報を DSA システムに提供することで、DSA システムは空き周波数検出に関する要求条件を満たすことが出来る [A]。本研究分野は、最近注目を浴び、申請者は本テーマに関して国際会議(2014/11)で招待講演を行うと共に、IEEE WCNC において国際ワークショップ(2015/3)を開催する。

これまでの周波数利用観測に関する研究報告では、熱雑音と信号のランダム性に起因する不確定性により周波数利用判定を高精度に行うことが困難であった。申請者は、所望の観測精度を達成するのに必要な観測時間と閾値を解析的に明らかにし、さらに周波数利用判定の高精度化を実現した(図 1 右下部:パワースペクトルから周波数利用判定を高精度に実現)[B,C]。

また、これまでの周波数利用観測では高性能な測定機を用いた観測実験が主であり、広範囲に観測機を複数展開する場合、そのコストが重要な課題となる。一方で、低コストな観測機(簡易観測機)を用いた場合は、広帯域を高精度に観測することは困難となる。また、長時間の観測から得られる情報量は膨大となり処理が困難となる。

また、周波数利用観測実験を行うには、周波数利用を制御でき、さらに他からの不確定な干渉を避けられる環境が必須である。オウル大学・フィンランドはそのような実験設備と環境がある。今回は、本研究分野に精通した研究者(Dr. Janne Letomaki)との共同研究により研究課題に取り組んだ。

参考文献:

[A] Thao Nguyen et al, IEEE Trans. Wireless Commun., vol 12, No. 9, Sept. 2013.

[B] J. Lehtomäki, K. Umebayashi et al IEEE JSAC, Vol. 31, No. 8, pp. 1-11.

[C] K. Umebayashi et al., ICST CROWNCOM, pp. 73 - 78, June 2014,

[D] K. Umebayashi et al, IEICE Trans. Commun., E95-B: 10, pp. 3261-3269, Oct. 2012.

2. 研究の目的

無線システム間でダイナミックに周波数資源を共有するダイナミックスペクトラムアクセス(DSA: Dynamic Spectrum Access)の高信頼化、高効率化には、周波数利用状況

の把握が重要であり、申請者らは、高性能な観測機を用いて高精度に周波数利用の統計情報を推定するプロトタイプシステムを開発してきた。本研究課題では、複数の簡易な観測機による高精度な周波数利用判定、統計情報の推定を実現する協調型観測システムの開発と要素技術の確立を目指す。具体的な研究項目は「 : 情報収集コストを考慮した統計情報推定法の開発」、「 : 周波数利用観測システム内での適切な観測空間の分担」、「 : 推定統計情報が DSA へ与えるゲインの解析」である。これにより、低コストでの広帯域、長時間、広範囲の周波数利用観測が可能となる。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、上記3つの課題「 : 情報収集コストを考慮した統計情報推定法の開発」、「 : 周波数利用観測システム内での適切な観測空間の分担」、「 : 推定統計情報が DSA へ与えるゲインの解析」に関して以下のとおり取り組んだ。

: 簡易な観測機(以下センサ)において、周波数利用を高精度に検出する要素技術の開発を行う。さらに、センサから情報を高効率に収集する手法の開発に取り組む。

具体的には、 - 1 : 周波数利用観測時における時間軸及び空間軸の最適分解能、 - 2 : 電力検出に対する後処理(周波数利用領域推定法、誤警報除去法)への開発に取り組んだ。

: 周波数利用観測時にセンサを適切に配置し、さらに収集した情報を用いて高精度に統計情報を推定する手法の開発に取り組む。

具体的には、 - 1 : 協調型センサによる周波数利用観測精度の改善の確認、 - 2 : 周波数利用統計情報(周波数利用率)のモデル化に主に取り組んだ。

: 収集した情報を用いることで周波数共有法の高度化を試みる。具体的には、スペクトラムセンシングに着目する。統計情報を用いた場合のスペクトラムセンシング法の設計法と、得られるゲインに関して評価を行った。具体的には、 - 1 : 周波数利用率情報を用いた電力検出スペクトラムセンシングにおける閾値設定法とその性能改善度の確認に取り組んだ。

以上を、計算機シミュレーションだけでなく実環境における実測等を活用して研究に取り組んだ。

4. 研究成果

上記の各課題に対する取り組みの結果得られた成果を以下に示す。

: 情報収集コストを考慮した統計情報推定法の開発

- 1 : 周波数利用観測時における時間軸及び空間軸の最適分解能 [5] (主な発表論文等を参照)

時間軸の分解能を想定される信号長で設定し、次に周波数分解能をパラメータ で規定し、誤警報確率及び検出率で定義される検出

能力を保ちつつ最も周波数利用率の推定精度を高く出来る を最適な周波数分解能とした。このときの評価基準として WSDR(white space detection ratio)を停止した。WSDRは1に近いほど、真の周波数利用率をすいてしていることを示す指標となっている。理論解析を通じて最適な ν が SNR(信号対雑音電力比)で決定されることをまず明らかにした。さらに、出来る限り最適な ν に近い周波数分解能を推定する手法を提案し、その性能を SNR-WSDR に関して評価を行った。その結果を図1に示す。

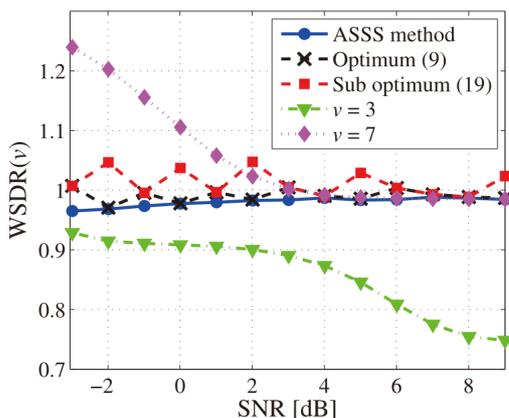


図1：SNR – WSDR 特性

上記結果より、提案方式 ASSS(adaptive segment size selection)はかなり1に近い値を達成し、最適解(Optimum)に近いパフォーマンスが達成できることを示した。

- 2：次に、簡易な周波数利用領域を推定する S-SA(Simple Signal Area)推定法の提案を行った[6]。本手法は、電力検出に対する後処理に相当する。一般的な電力検出の検出能力はさほど高くなく、誤警報や誤検出を多く含むことがある。これに対して、誤警報除去を含む信号領域推定法は、誤警報や誤検出を大幅に減らし、周波数利用の検出をより高精度化できることが期待できる。図に S-SA法の検出精度(固定の誤警報に対する検出率)特性を示す。

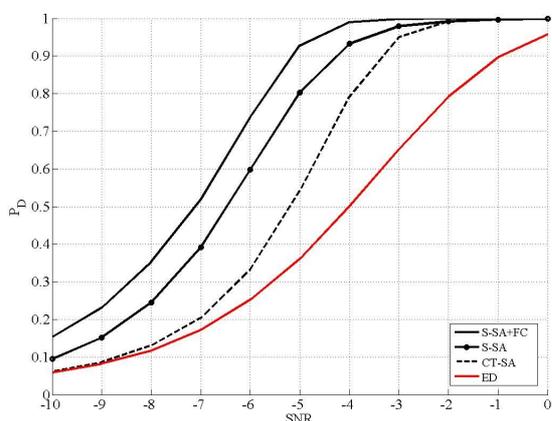


図2: SNR – 検出率(P_D)特性

上記結果において、S-SA+FC が S-SA 推定と FC(誤警報除去)を組み合わせた手法であり、高精度な周波数利用検出がより可能であることが確認された。

：周波数利用観測システム内での適切な観測空間の分担

- 1：協調型センサによる周波数利用観測精度の改善の確認

単独のセンサではなく複数のセンサを用い、観測情報を適切に融合することで高性能な周波数利用観測が可能となることを確認した。

- 2：周波数利用統計情報(周波数利用率)のモデル化

長時間の周波数利用観測により、周波数利用の決定論的 - 確率論的特性を同時に組み込んだモデルの検討を行い、効率的なモデルの提案を行った[2]。具体的には、出来るだけ少ないパラメータで高精度に再現が可能なモデルとなっている。

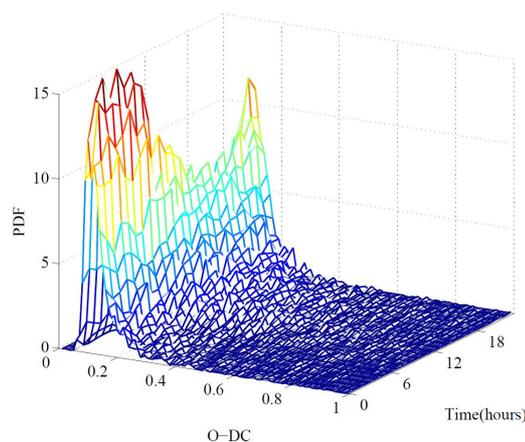


図3：周波数利用率の観測結果

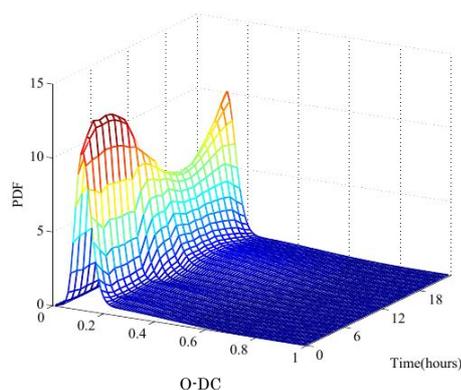


図4：周波数利用率の提案モデル

図3はモデルの対象となっている周波数利用率の観測結果で、図4はモデルの結果となっている。ある時刻において利用率は、ランダムな振る舞いとなり、確率的モデルとして確率密度関数を用いてその特徴を表現している。一方で、時間軸に対してその確率的性

質は比較的決定論的に変動をしていると考えられ、その特徴を決定論的モデルで表現している、これにより、周波数利用率の特徴を適切に表現できることが確認された。なお、パラメータの削減としては、自己回帰モデルを用いて、パラメータ間の相関を考慮し、削減を行った。

：推定統計情報が DSA へ与えるゲインの解析

- 1：周波数利用率情報を用いた電力検出スペクトラムセンシングにおける閾値設定法とその性能改善度の確認

周波数利用率情報を用いたスペクトラムセンシングでは、周波数利用率の時間変動を把握することで、その特徴に応じて閾値を変化させて検出精度が改善できることに着目した。また、その改善のメカニズムを明らかにすることで、閾値を解析的に設定し、所望の特性が達成できることを確認した。

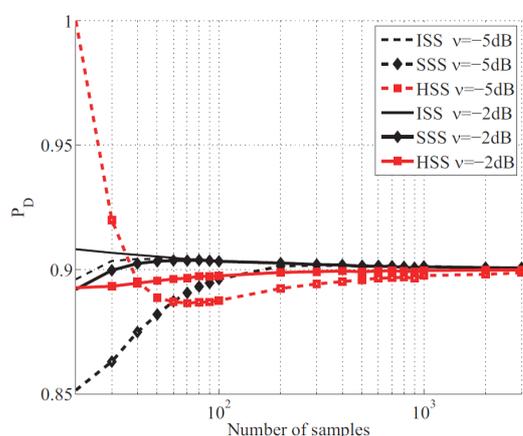


図 5：観測サンプル数に対する達成検出率特性。但し、目標検出率=0.9

図 5 に設計したスペクトラムセンシングが目標検出率 0.9 にどの程度近いパフォーマンスを達成できるかを示した特性を示す。この結果は、提案した設計法の妥当性を示している。設計に関して、統計量をガウス近似したため、サンプル数が多いほど近似が妥当と成り、目標検出率に近い特性を安定して達成できることが確認できる。

合わせて、統計量を用いた場合、用いていないスペクトラムセンシング法より良い検出性能を達成できることを確認した。

特に、「：情報収集コストを考慮した統計情報推定法の開発

」と「：周波数利用率観測システム内での適切な観測空間の分担」では、Dr. Janne Letomaki との共同研究に基づき、技術開発と実証実験をオウルにおいて重ねてきた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

[1] Hiroki Iwata, Kenta Umebayashi, Janne

Lehtomäki, and Shusuke Narieda, "Welch FFT Segment Size Selection Method for FFT Based Wide Band Spectrum Measurement," *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E101-B, No.7, pp.TBD, Jul. 2018. (査読有) DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2017EBP3069>

[2] Kenta Umebayashi, Masanao Kobayashi, and Miguel López-Benítez, "Efficient time domain deterministic-stochastic model of spectrum usage," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 1518-1527, March 2018. (査読有) DOI: [10.1109/TWC.2017.2779511](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2779511)

[3] Takeo Fujii and Kenta Umebayashi, "Smart Spectrum for Future Wireless World," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E100-B, no.9 pp.1661-1673 Sep. 2017. (invited paper) (査読有) DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2016PF10014>

[4] Kenta Umebayashi, Kazuhiro Hayashi, and Janne Lehtomäki, "Threshold-setting for Spectrum Sensing based on Statistical Information," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 7, pp. 1585-1588, July 2017. (査読有) DOI: [10.1109/LCOMM.2017.2691004](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2691004)

[5] Hiroki Iwata, Kenta Umebayashi, Samuli Tiiri, Janne Lehtomäki, Miguel López-Benítez, and Yasuo Suzuki, "Welch FFT segment size selection method for spectrum awareness system," *IEICE Transactions on Communications*, vol.E99-B, no. 8, pp. 1813-1823, Aug. 2016. (査読有) DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2015EBP3401>

[6] Kenta Umebayashi, Kazuki Moriwaki, Riki Mizuchi, Hiroki Iwata, Samuli Tiiri, Janne Lehtomäki, Miguel López-Benítez, and Yasuo Suzuki, "Simple Primary User Signal Area Estimation for Spectrum Measurement," *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E99-B, No.2, pp.523-532, Feb. 2016. (査読有) DOI:

〔学会発表〕(計 13 件)

- [1] Ahmed Al-Tahmeesschi, Miguel López-Benítez, Kenta Umebayashi, and Janne J. Lehtomäki, "Analytical study on the estimation of primary activity distribution based on spectrum sensing," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, 2017, pp. 1-5.
- [2] 梅林健太, 小林雅直, Miguel López-Benítez, "効率的な時間軸からの決定論的-確率論的周波数利用のモデル化" 信学技報, SR2017-19, Jul. 2017.
- [3] Kenta Umebayashi, Hiroki Iwata, Janne Lehtomäki, and Miguel López-Benítez, "Study on simple signal area estimation for efficient spectrum measurements," 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Oulu, June. 2017, pp. 1-5.
- [4] Riki Mizuchi, Kenta Umebayashi, Janne Lehtomäki, and Miguel López-Benítez, "A study on false alarm cancellation for spectrum usage measurements," in 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) - International Workshop on Smart Spectrum, San Francisco, USA, Mar. 2017.
- [5] 小林雅直, 梅林健太, 成枝秀介 "統計的Duty Cycleの決定論的モデル化の一検討" IEICE 総合大会, B-17-14, Mar. 2017.
- [6] 林和広, 梅林健太, 成枝秀介 "周波数利用統計情報推定値を用いたスペクトルセンシングにおける閾値設定の一検討" IEICE 総合大会, B-17-7, Mar. 2017.
- [7] 水知力, 梅林健太, Miguel López-Benítez, 成枝秀介 "広帯域周波数利用観測における Noise Floor 推定法の一検討" IEICE 総合大会, B-17-30, Mar. 2017.
- [8] Kenta Umebayashi, Janne Lehtomäki, and Miguel López-Benítez, "Smart Spectrum Access based on spectrum usage measurements," IEICE Tech. Rep., vol. 116, no. 29, SR2016-11, pp. 37-37, May 2016.
- [9] Riki Mizuchi, Kenta Umebayashi, Janne Lehtomäki, and Miguel López-Benítez, "A study on FFT-ED based signal area

estimation for spectrum awareness," IEICE Tech. Rep., vol. 116, no. 29, SR2016-9, pp. 27-34, May 2016.

- [10] Hiroki Iwata, Kenta Umebayashi, Samuli Tiirio, Yasuo Suzuki, and Janne Lehtomäki, "A study on Welch FFT segment size selection method for spectrum awareness," in 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) - International Workshop on Smart Spectrum, Doha, Qatar, Mar. 2016.
- [11] 小林雅直, 玉木義孝, 梅林健太, 鈴木康夫 "混合ベータ分布を用いた Duty Cycle のモデル化の一検討" 電子情報通信学会技術報告, vol.115, no.411, SR2015-83, pp.75-80, Jan. 2016.
- [12] 林和広, 梅林健太, Janne Lehtomäki, 鈴木康夫 "周波数利用率に基づくスペクトルセンシングの閾値設定の一検討" 電子情報通信学会技術報告, vol.115, no.411, SR2015-73, pp.9-15, Jan. 2016.
- [13] Kenta Umebayashi, Riki Mizuchi, Hiroki Iwata, Kazuhiro Hayashi, Masanao Kobayashi, Samuli Tiirio, Yoshitaka Tamaki, Tatsuya Maruyama, Janne Lehtomäki, Miguel López-Benítez, and Yasuo Suzuki, "Spectrum awareness system prototype for smart spectrum access," Technology Exhibit at International Workshop SmartCom 2015, Tokyo, Japan, Oct. 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅林 健太 (Kenta, Umebayashi)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20451990

(2) 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

Janne, Letomaki
オウル大学・研究員

〔その他の研究協力者〕

Miguel, López-Benítez
リバプール大学・講師