

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04124

研究課題名（和文）広帯域における汎用的で周波数共有に有効な周波数利用率の時間軸上でのモデル化

研究課題名（英文）Unified Model of duty cycle in time domain based on wideband spectrum usage measurement

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）・教授

研究者番号：20451990

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）：本研究課題では、広帯域における様々な周波数の観測を行い、周波数利用の時間-空間軸における統計的な性質を高精度に把握するためのモデル化に関する研究を行った。特に特徴量のランダムな性質と決定論的性質を個別に把握し、それらの情報を活用することで周波数共有を効率的に実現する手法を明らかにした。具体的には、レーダーシステムを一次無線システムとした場合の周波数共有と、ローカル5Gにおける大規模オペレータとの周波数共有と、複数のシナリオにおいて本アプローチが有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の無線通信において周波数資源の枯渇は喫緊の問題である。これに対して、空間軸からの周波数共有の研究は多く検討されてきているが、時間軸からの周波数共有は、空き周波数の発見が困難とされてきた。そこで、時間軸の周波数利用をより正確に把握するための利用率モデル化を行い、その情報を活用することで高精度に空き周波数を発見し、高信頼な周波数共有が可能であることを示した。これにより、将来の無線通信においてさらなる周波数資源の活用を促進できることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, at first we investigate the techniques for wide-band, long term, and wide area spectrum measurements. Based on the spectrum measurements, we also investigated model of spectrum usage in time and space domains. In the spectrum usage models, both stochastic and deterministic aspects are considered and these models can lead to efficient spectrum sharing. Specifically, two different scenarios for spectrum sharing are investigated and these investigations show validity of our approach.

研究分野：無線通信

キーワード：周波数共有 周波数利用観測 周波数利用率モデル化 コグニティブ無線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT、ビッグデータ、人工知能等の最先端の情報処理技術は、高齢化、少子化、エネルギー等の様々な社会問題を解決する要素技術となることが期待されている。これらの情報処理技術では、膨大な数のセンサを展開し、膨大な情報を無線通信で集めるため、情報処理技術による無線サービスの展開には、新たな周波数資源(スペクトラム)が必要となる。一方で、ほとんどの周波数資源は既存無線サービス、システムに割り当て済みであり、周波数資源の枯渇が情報処理技術開発のボトルネックとなる。これに対して、既存無線システム(PS: Primary System)と新規無線システム(SS: Secondary System)が周波数を時間軸から共有する DSA(Dynamic Spectrum Access)が検討されている。既得権益者である PS は周波数利用に関して優先度が高いため、SS が PS により周波数を利用していない時間を把握する高精度な空き周波数発見技術と、空き周波数を有効利用する技術の開発が求められている。

この課題に対して、PS による周波数利用の統計情報を事前に把握し、その情報を活用したスマートな DSA(SSA: Smart Spectrum Access)が申請者らによって提唱されている。SSA では、PS の周波数利用を把握する高精度観測技術、観測情報をデータベースに蓄積し、周波数利用の傾向を把握するモデル化、そしてモデル化により得られた統計情報を活用した周波数共有要素技術(空き周波数発見・利用技術)を開発する必要がある。申請者は、これまで観測技術として、周波数利用の広帯域・長時間における高精度観測を実現する信号処理技術と、観測システムの開発を行い、無線 LAN と、セルラーシステム(Long Term Evaluation 上り 830MHz 帯)のモデル化の初期検討を行ってきた。さらに、周波数利用率を正確に把握出来た場合、その情報を用いることで空き周波数の発見技術を改善できることも示してきた。しかし、実際には真の利用率を把握することは不可能であり、観測結果から適切に時間軸-周波数利用率の統計的モデルを導出する汎用的手法(モデル化)の確立が望まれている

2. 研究の目的

本研究課題の最終目的は、「広帯域(30MHz~6GHz)における周波数利用率の汎用的で周波数共有に有効な時間軸モデル化」の確立である。そのために、以下の4つの課題に取り組む。

：確率的モデルの構成=周波数利用率の統計的性質は、トラフィック、無線機数、チャネルアクセス等に起因する複数の確率過程で構成されており、その構成を考慮したモデル化が必要である。

：非正常性=周波数利用率の統計量は一般的に時間変化する。利用率の時間軸に対する傾向を把握するには、確率的モデルにおいて非正常性を組み込んだモデル化が必要となる。

：多種多様な周波数利用=30MHz~6GHz には多数の無線システム・サービスが展開されており、そのモデルも多種多様となる。よって、これらを整理、分類し汎用的なモデル化の確立が望まれる。

：周波数利用率モデル化の効果=周波数利用率のモデル化は、モデルの精度のみならず、周波数共有への貢献度に関する数値評価が必要となる。貢献度とは、例えば、モデルにより得た情報を活用することで空き周波数の発見精度をどの程度改善できるかを指す。

3. 研究の方法

上記の課題 ~ に対して、具体的に以下の通りに取り組む。

課題- : ノンパラメトリックベイズモデルによる確率的モデル化= 従来研究では、周波数利用率は単独の確率密度関数によるモデル化が主であった。申請者と研究協力者 M(Dr. M. López-Benítez・リバプール大学)は、複数の分布で構成される混合分布を用いることで、モデルの精度が改善されることを示した。本研究課題では、確率的モデルの構成をより汎用的に表現できるグラフィカルモデルを用いるノンパラメトリックベイズモデルを採用する。これにより、複数の確率過程で複雑に構成される確率的性質を、適切にモデル化することを目指す。

課題- : 決定論的モデル・AR-MA(自己回帰移動平均)モデル= 従来研究では、周波数利用率に定常性を仮定してモデル化が検討されていた。これに対して申請者らは、利用率の観測値から、平均値の時間軸変動が決定論的に決まるとし、その決定論的時間変動をモデル化できることを示した。

さらに、利用率の時間変動は時間相関が低い時間帯や、高い時間帯があることを確認してきた。そこで、課題- の確率的モデルにおける統計量の時間変動を、決定論的モデルと時間相関を表現する AR-MA モデルを有機的に組み合わせモデル化する手法を開発する。これにより、周波数利用率の確率的変動と時間軸変動を包括的・柔軟にモデル化することが期待できる。

課題- : モデル化の周波数軸汎化= 周波数帯ごとに周波数利用率は類似の傾向があることから同一のモデルを適用出来ることを申請者らは確認している。多数の観測機を協調・協力させて高精度に広帯域・長時間の観測が可能な観測システムを開発してきたため、30MHz~6GHzの各周波数帯においてモデル化の検討が出来ることが本研究課題の特色である。各周波数帯で導出したモデルを包括的に分類・整理することで周波数軸において汎用的なモデル導出法の確立を行う。

課題- : 空き周波数発見法の評価 = 申請者は、研究協力者 J(Dr. J. Lehtomaki・オウル大学・フィンランド) との共同研究を通じ、周波数利用率を用いることで空き周波数発見法の性能を改善できることを示してきた。今回は、周波数利用率のモデルが空き周波数発見法の検出性能にどの程度貢献するかを明らかにする。これまでのモデル化の設計基準は精度が重要視されてきたが、本検討により、モデル化の設計を周波数共用への貢献度を基準にして行うように拡張できることが本研究の特色である。

4. 研究成果

本研究課題では、広帯域における様々な周波数帯の観測を行い、課題 : ノンパラメトリックベイズモデルによる確率的モデル化、時間軸の利用率の変動に関する課題 : 決定論的モデル・AR-MA(自己回帰移動平均)モデル、そして課題 : モデル化の周波数軸汎化に取り組み、周波数利用率に関する詳細な把握を実現する技術の確立を目指す。さらに、課題 : 得られた統計情報を周波数共用において活用し、その効果も確かめる。

2018 年度は課題 を鑑みて複数の帯域における観測結果に対するモデル化の検討を行った。具体的には、観測帯域 1 : 無線 LAN(2.4GHz)、観測帯域 2 : LTE: uplink を観測対象とし、ノンパラメトリックベイズを利用した確率的モデルの導出法と Duty Cycle の時間変動に関するモデル化に取り組んだ。

課題 においては、混合モデルを想定し、その混合数とモデルパラメータの値を適切に決定する必要がある。その決定法として汎用性の高いギブスサンプリングと中華料理店過程を採用した。この決定法は、繰り返し処理であり、決定法の適切なチューニングと繰り返し処理における終了判定と適切な解の選定が課題となる。これらの課題に対して、我々はチューニングしなければいけない決定法内のパラメータと、終了判定及び解の選定に適した評価基準を示した。観測実証実験

を通じて検証したノンパラメトリックベイズに基づくモデル化が適切であることを示した。

課題 においては、周波数利用率の時系列に対して AR モデルを用いてモデル化を試みた。単純に AR モデルを用いただけでは、適切にモデル化が出来ないことを確認した。これにたいして、利用率が比較的高い状況と低い状況におうじてモデルを切り替えることでより精度の高い周波数利用率の適切な時系列モデル化が可能であることを確認した。

2019 年度は課題 に関して、詳細な検討を行い、その手法の妥当性を確認した。ノンパラメトリックベイズモデルでは混合数と各混合分布のパラメータを推定する必要があり、その中で事後確率がアルゴリズムのメトリックとして採用されている。しかしながら、事後確率は中華料理店過程においてよりクラスターごとの混合数によりばらつきを持たせる傾向があることから、得られた分布と経験的な分布に比較的大きなギャップがあり、常に適切ではないと考えられる。そこで、カルバック・ライブラー情報量を用いた場合に、精度と繰り返し処理(ギブスサンプリング)の収束判定が適切に出来ることを確認した。しかしながら、カルバック・ライブラー情報量はクラスター数が多いほどより精度が高いと偏った判断することから、オーバーフィッティングを起こす可能性があることも確認した。

課題 においては、AR-MA 及びディープラーニングを用いた利用率の時間方向のモデル化に取り組んできた。AR-MA を用いた場合、より時間分解能を落として利用率を予測することでより精度の高い予測が可能となることが確認できた。一方で、ディープラーニングを用いた場合は、利用率そのものの特徴のみならず、利用率の他の特徴量を用いることで予測の精度を改善できることが確認された。課題 に関しては、上記の検討を複数の帯域・時間帯においてそのモデルの妥当性を確認することで、汎用性を確認した。

2020 年度は、特に の開発してきたモデルを元に、周波数割り当てを行い、実証実験を通じてモデルの有効性を示すことを目指してきた。実証実験においては屋内外で数名のメンバーで取り組むことが求められることに対し、今年度はコロナの影響により大幅に研究活動が制限されてきた。そこで制限された範囲内で出来る研究活動として、 の AR(autoregressive)を用いたモデル化に関して過去の観測データを用いて取り組んできた。観測データにバイアスが存在する場合、複数の AR モデルを用意し、適切に使い分けることでより精度の高い予測が AR により可能であることを明らかにしてきた。

2021 年度は、これまで開発してきた周波数利用率の予測に基づき周波数共用(課題)を行うこ

とで、周波数利用の効率が改善可能であることを示した。具体的には、二次無線システムと一次無線システムであるレーダーシステムとの周波数共用に関する検討を行った。ここでは、周波数利用の時空間予測を long short-term memory (LSTM)をベースとしたディープラーニングを用いて行い、適切に周波数資源を二次無線システムに割り当てることで、一次無線システムを保護しながら、適切な無線サービスを二次無線システムにおいて展開可能であることを示してきた。また、ローカル 5G を想定した無線サービスにおける周波数共用を試み、時間的な周波数の予測を行うことでローカルの無線システムにおいて適切に周波数資源を確保し、周波数の有効利用を促進できることを示してきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sone Su P., Lehtomaki Janne, Khan Zaheer, Umebayashi Kenta, Javed Zunera	4. 巻 10
2. 論文標題 Proactive Radar Protection System in Shared Spectrum via Forecasting Secondary User Power Levels	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 40367 ~ 40380
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3166844	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Toma Ogeen H., Lopez-Benitez Miguel, Patel Dhaval K., Umebayashi Kenta	4. 巻 68
2. 論文標題 Estimation of Primary Channel Activity Statistics in Cognitive Radio Based on Imperfect Spectrum Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 2016 ~ 2031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCOMM.2020.2965944	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Umebayashi Kenta, Tamaki Yoshitaka, Lopez-Benitez Miguel, Lehtomaki Janne J.	4. 巻 7
2. 論文標題 Design of Spectrum Usage Detection in Wideband Spectrum Measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 133725 ~ 133737
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2938549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ahmed Al-Tahmeesschi, Miguel Lopez-Benitez, Dhaval K Patel, Janne Lehtomaki, Kenta Umebayashi	4. 巻 5
2. 論文標題 On the Sample Size for the Estimation of Primary Activity Statistics Based on Spectrum Sensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 59 - 72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCCN.2018.2874456	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Miguel Lopez-Benitez, Ahmed Al-Tahmeesschi, Dhaval K Patel, Janne Lehtomaki, Kenta Umebayashi	4. 巻 18
2. 論文標題 Estimation of Primary Channel Activity Statistics in Cognitive Radio Based on Periodic Spectrum Sensing Observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 983-996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2018.2887258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Daiki Cho, Shusuke Narieda, Kenta Umebayashi, Hiroshi Naruse	4. 巻 9
2. 論文標題 Spectrum sensing based on weighted diversity combining using time-averaged CAF	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 20-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2018XBL0126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 S. P. Sone, J. Lehtomaki, Z. Khan and K. Umebayashi
2. 発表標題 Forecasting Wireless Network Traffic and Channel Utilization Using Real Network/Physical layer Data
3. 学会等名 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ogeen H Toma, Dhaval K Patel, Kenta Umebayashi
2. 発表標題 Methods for Fast Estimation of Primary Activity Statistics in Cognitive Radio Systems
3. 学会等名 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Iwata, K. Umebayashi, A. Al-Tahmeesschi, S. Joshi, M. Lopez-Benitez and J. J. Lehtomaki
2. 発表標題 A Study on High-Efficiency Energy Detection-Based Spectrum Measurements
3. 学会等名 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 蛭澤皓斗, 梅林健太, ヤンネ レホトマキ
2. 発表標題 周波数利用観測に基づく動画ストリーミング開始の早期検出手法についての研究
3. 学会等名 IEICE SR研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八尋 義範, 蛭澤 皓斗, 梅林 健太
2. 発表標題 [技術展示] 無線LANチャンネルのスマートフォンアプリケーションによる評価法の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大川航平, 岩田大輝, 梅林健太, Janne Lehtomaki, Miguel Lopez-Benitez, Satya Joshi
2. 発表標題 Duty Cycle のARモデル化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shusuke Narieda, Daiki Cho, Kenta Umebayashi, Hiroshi Naruse
2. 発表標題 Statistics Shared CAF Diversity Combining Based Sensing Using Weight Computation Technique
3. 学会等名 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田健斗, 梅林健太
2. 発表標題 広く適用可能な周波数利用のモデル化に関する検討
3. 学会等名 IEICE SR研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	レホトマキ ヤンネ (Lehtomaki Janne)	オウル大学・CWC・准教授	
研究協力者	ロペスベニテス ミゲル (Lopez-Benitez Miguel)	リバプール大学・Electrical Engineering and Electronics・准教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フィンランド	オウル大学			
英国	リバプール大学			
フィンランド	オウル大学			
英国	リバプール大学			
英国	リバプール大学			
フィンランド	オウル大学			
英国	The University of Liverpool			
フィンランド	University of Oulu			