

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 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(B)）

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0109

研究課題名（和文）学習に基づく多次元無線環境認識によるスマートスペクトラム

研究課題名（英文）Smart spectrum based on learning with multi-dimensional radio environment recognition

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） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：高効率な周波数共有には、周波数利用の詳細な把握が必要であるが、現在の観測及びモデリング技術ではその精度が不足しており、把握が困難とされている。本研究課題では、各端末での周波数利用観測結果に対し、多次元の無線物理量（受信電力、周波数利用率等）及び通信品質メトリックを推定する手法を提案してきた。加えて、観測及び認識で得た情報を基に、適切な周波数資源管理法と、高効率な無線通信ネットワークの運用（スペクトラム活用法）の検討に取り組み、セキュアなRadio Environment Mapに基づく周波数利用の把握方法の確立、機械学習技術を用いた高度な周波数利用観測方の設計法を確立させてきた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、周波数資源の管理法として、一般的なモデルが用いられることが主に検討されてきた。このようなアプローチでは、実際の状況にそぐわないことから、過剰なマージンの設定が用いられ、結果として保守的で非効率な周波数利用管理となる。本研究課題では、実際の観測結果に基づくダイナミックな周波数資源の管理を採用することで、状況に応じて高効率な周波数資源管理が達成可能であることが確認された。特に、高精度で達成可能な多次元の周波数利用観測法、そして実際の周波数利用に応じた新たな周波数管理法の方向性を明らかとした。研究開発された各技術は、ローカル5G等の将来の周波数資源活用法の基盤技術となる。

研究成果の概要（英文）：Efficient frequency sharing requires a detailed understanding of frequency utilization, but the current observation and modeling techniques lack the necessary precision, making it difficult to grasp. In this research project, we have proposed a method to estimate multidimensional wireless physical quantities (received power, frequency utilization rate, etc.) and communication quality metrics based on frequency utilization observations from each terminal. Furthermore, we have worked on exploring appropriate frequency resource management methods and efficient operation of wireless communication networks (spectrum utilization methods) based on the information obtained through observation and recognition, aiming to establish a secure Radio Environment Map and design advanced frequency utilization observation methods using machine learning techniques.

研究分野：無線通信

キーワード：スマートスペクトラム ダイナミック周波数アクセス コグニティブ無線 周波数利用観測

1. 研究開始当初の背景

あらゆるものがネットワークにつながり、実社会と仮想社会が一体化したスマート社会の到来を前に、いかにして膨大な数の端末から膨大な情報を適切・迅速に収集するかが喫緊の課題になりつつある。多様で膨大な数の端末からの情報収集には無線通信の活用が必須であるが、周波数資源の周波数軸からだけのシステム毎への排他的・固定的な割り当てでは、無線通信の需要を満たすことが出来ず、時間軸、空間軸からの周波数資源を有効に運用ができていない課題があった。

本課題に対して、いくつかの解決策がこれまで検討されてきている。周波数資源として、主に 6GHz 以下の周波数の活用が検討されてきたが、高い周波数であるミリ波や THz 帯の周波数においては、膨大な周波数資源が存在することから、高い周波数の活用の検討がされてきている。しかしながら、これらの周波数は距離減衰によるロスが非常に多いことや、遮断により、無線通信の品質が大いに劣化し、適切な無線通信サービスを移動体に対して提供することは一般的に困難とされている。また、従来は与えられた周波数を効率的に活用するために MIMO、OFDM、多値変調方式の活用等が長らく検討されてきたが、これらの技術による周波数利用の効率化にも限界がある。この課題に対して、ある周波数帯を複数の無線システムによるダイナミックに周波数共有を目指したダイナミックスペクトラムアクセスの検討がされてきた。特に従来の排他的・固定的な周波数資源の割り当てから、より柔軟でダイナミックな周波数資源の活用を実現するためのアプローチであり、本研究課題では、このアプローチによる周波数資源の有効活用を目指している。

従来の周波数共有では、一般的なモデルに基づいて周波数共有を目指しており、無線通信システム間において干渉を起こさないためには、過大なマージンを設定するなど、非効率な周波数共有となることが課題とされてきた。具体的には、空間軸における周波数共有では、保守的な距離減衰モデルを元に周波数共有可能なエリアを計算すると、実際に共有が可能なエリアに比べて周波数共有可能なエリアがかなり限定的となる。

周波数共有において抜本的に周波数利用効率を改善し、新たな周波数資源を生み出すには、無線通信の利用環境・状態を把握し、相互干渉を極限まで抑えた周波数資源管理とスペクトラム活用が必要となる。しかし、場所依存性の高い電波伝搬状況、ユーザ状態依存性の高いスペクトラム利用率、システム依存性の高い通信品質を正確に認識することは大変難しく、現在のところ限定的な認識に留まっている。

2. 研究の目的

本研究では、無線環境、ユーザ動向等を勘案し、排他的・固定的な周波数割り当てから脱却したうえで、これまでに実現できなかったレベルでスペクトラム利用を高効率にするため、周波数利用観測をもとにした多次元空間(時間・空間・周波数)におけるパラメトリックなスペクトラム利用の認識法と、ノンパラメトリック学習法によるスループットやパケット誤り等の認識法を連携させ、観測-モデル化-モデルパラメータ推定までを統合的に実現する手法の確立を目指す。そして、認識により取得された情報を活用した効率的な周波数資源管理及び活用法の確立、とそれらの妥当性を確認する。

申請者らは、空間軸や時間軸などの単次元における無線物理量(例：受信電力)のモデル化やモデルパラメータ推定に関する研究

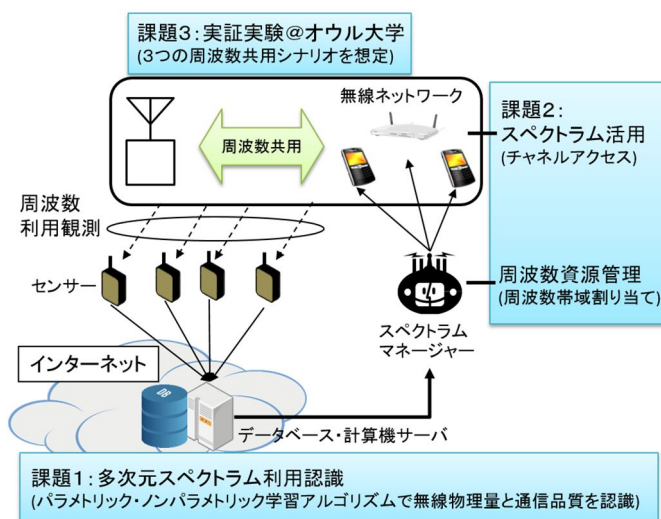


図1: 研究課題全体像

分野をこれまでリードしてきた。しかし、単次元の無線物理量情報では周波数共用時の通信品質を正確に見積もることが出来ず、非効率な周波数共用となる。そこで、本研究課題では、まずモデル構造が想定しやすい多次元の無線物理量をパラメトリックな学習法で推定（モデル化とモデルパラメータ推定）し、推定結果を入力として構成が複雑である通信品質メトリック推定をノンパラメトリックな学習法（深層学習）を用いることで、効率的なスペクトラム認識法の確立を目指す。さらに、スペクトラム利用の認識結果を用いて周波数資源管理と無線ネットワークを運用することで、周波数利用観測からスペクトラム利用までを包括的に最適設計する指針を明らかにする。

今回の研究では、スペクトラム利用認識、周波数資源管理とスペクトラム活用法を複数の周波数共用シナリオにおける実証実験で検証する必要がある。オウル大学の共同研究者らは、要素技術に精通しているだけでなく、次世代無線通信等の複数の周波数共用に関する実証実験設備を持ち、ノキアなどと実証実験を行ってきた実績がある。また、人口密度が低い地方都市であることから、周波数利用環境的に干渉の少ない共用実験に恵まれた環境が確保できる。研究代表者らは、国際共同研究者らとは 10 年以上共同研究を行ってきた実績と経験がある。

3. 研究の方法

本研究課題では、周波数利用観測、スペクトラム利用の把握、周波数資源の管理と活用までを統合的に検討し、異種無線システム間における周波数共用の効率を極限まで高める手法の確立を目指した。図 1 に示すように課題を 3 つに分け、それぞれに以下の目標を設定し、研究課題の達成に取り組んできた。

課題 1：スペクトラム利用の認識法の確立：多次元周波数観測データに対して学習アルゴリズムを適切に使い分けて多次元空間における無線物理量及び通信品質メトリックの推定を効率的に行う手法を明らかにする。

多次元の無線物理量（空間：受信電力、時間：周波数利用率、周波数：帯域幅）のモデル化及びモデルパラメータ推定法をパラメトリックな機械学習法を用いて行い、取得情報をデータベースに蓄積する。データベースはインターネット経由でアクセスできるようにする。周波数利用観測には、素早い研究の立ち上げのために申請者が開発した周波数利用観測システムを活用する。次に、通信品質の推定を行う。通信品質は多次元無線物理量や、ユーザ行動など他の要因により関連して決定付けられると考えられるが、その構成を厳密に把握することは困難であり、観測と学習を適切に組み合わせ、通信品質の推定を行う。これにより、多次元空間における周波数利用観測からスペクトラム利用の認識を包括的に実現させる。

課題 2：効率的な周波数資源管理及び活用法の確立：認識情報を活用する適切な周波数資源管理法、無線ネットワークの運用法を明らかにし、その効果を特に計算機シミュレーション及び理論解析を通じて示す。

多次元通信品質メトリックを活用した効率的な周波数帯域割り当てを行う手法の確立をさせる。無線通信ネットワークの運用においては多次元通信品質メトリックを用い、チャンネルアクセス法の高度化を実現させる。海外共同研究者らの協力のもとに各手法の検討開発を行う。さらに、課題 1 で用いた深層学習に周波数帯域幅割り当て問題を組み込み、機械学習による包括的な周波数利用の認識から周波数資源管理法を含めた手法の確立を試みる。

課題 3：複数周波数共用シナリオにおける実証実験：周波数利用観測、スペクトラム利用の把握、周波数資源の管理と活用までを実環境における複数周波数共用のシナリオにおいて評価検証を行い、その有効性、妥当性、実現性を明らかにする。

4. 研究成果

上記に示した各課題に関連した研究成果を以下に示す。

課題 1 に関しては、周波数利用の多次元（時間-空間-周波数）の高精度な観測法を開発してきた。特に、周波数利用の時間-周波数軸における高精度な検出は、根本的な観測の精度を決定づける非常に重要な要素であることから、注力を注いだ。特に、電力検出による周波数利用の検出には、高精度な雑音電力の推定が求められるが、オンラインで

のノイズ電力推定は、信号成分とノイズ成分が混在した状況において高精度にノイズ電力を推定することが求められる。また、ノイズ電力は、時間軸及び周波数軸、そして空間軸において変動することから、適宜推定をすることが求められる。本研究課題では、FCME アルゴリズムを活用した新たなノイズ電力推定法を提案し、それが高精度な推定を達成可能であることを示した。図 2 に提案方式(Two-Dim FCME(Forward consecutive mean excision) algorithm: 赤の結果)の MAE(mean absolute error)特性を示す。提案方式は最も低い誤差特性である MAE 特性を達成可能であることが確認できる。

この周波数利用の観測データを活用し、周波数利用の把握及び予測を行う手法の構築にも取り組んだ。特に、時間軸においては周波数利用の予測、そして空間軸においては Radio Environment Map(REM)を活用することで、一般的なモデルではなく、その状況に応じたサイトスペシフィックな周波数利用の多次元情報を獲得することが可能であることを示してきた。図 3 に Packet Delivery Rate (PDR)特性の例を示す。これにより、空間的に無線通信を適切に実施することの可能なエリアを事前に把握することが可能となる。これらの情報は、空間軸における周波数共用等を実装する際に、非常に有効である。

さらに、時間軸の周波数利用系列に対して、ディープラーニングを活用することで周波数利用の予測を行う手法の研究開発にも取り組んだ。図 4 にその結果を示す。横軸は、実際の時間で、縦軸が利用率(DC: Duty Cycle)を示す。Original は実際の利用率の観測データであり、LSTM アルゴリズムをベースとして予測の方式を提案した。これにより、より精度の高い予測が可能となることを示した。

実際の環境として、レーダ(無線システム)との周波数共用における、周波数共用の特性評価を行った。具体的には、上記に示した時間軸周波数利用予測を活用し、周波数共用を行った場合の無線通信ネットワークのスループット特性(縦軸)を図 5 に示す。図中の DFS は従来のアプローチにおけるスループット特性であり、それに対して横軸は、周波数共用により相手無線システム(レーダシステム)へ干渉を与える確率を示している。これにより、従来と比較して干渉抑圧を行いながら、スループット特性を改善できることを示している。

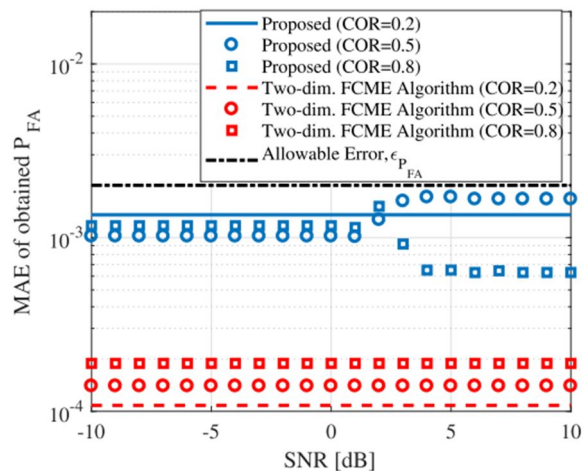


図 2 雑音出力推定精度(MAE)特性

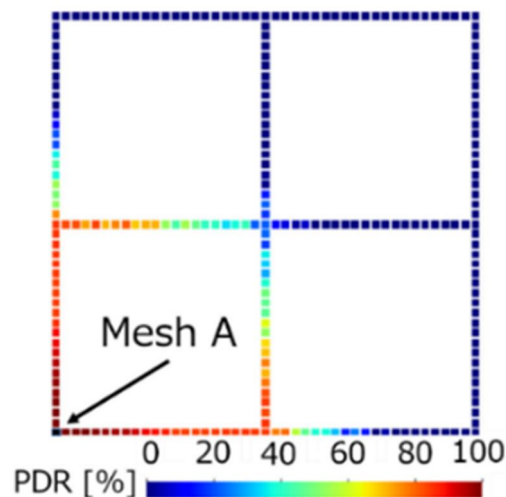


図 3 REM の一例

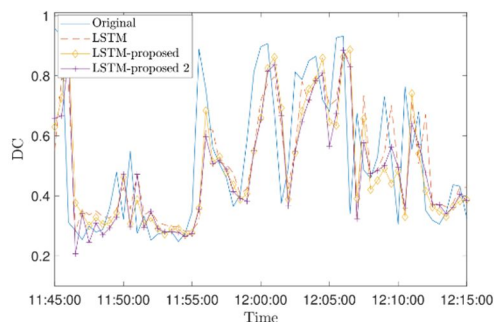


図 4 ディープラーニングを用いた DC 予測特性

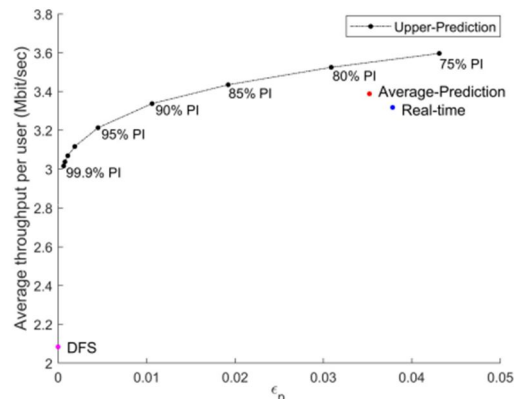


図 5 干渉度に対するスループット特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Iwata Hiroki, Umebayashi Kenta, Al-Tahmeesschi Ahmed, Lehtomaki Janne	4. 巻 9
2. 論文標題 High-Efficiency FCME-Based Noise Power Estimation for Long-Term and Wide-Band Spectrum Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 149883 ~ 149893
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3124905	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 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 Al-Tahmeesschi Ahmed, Umebayashi Kenta, Iwata Hiroki, Lehtomaki Janne, Lopez-Benitez Miguel	4. 巻 9
2. 論文標題 Feature-Based Deep Neural Networks for Short-Term Prediction of WiFi Channel Occupancy Rate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 85645 ~ 85660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3088423	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 Ueda Ayumu, Fujii Takeo	4. 巻 19
2. 論文標題 Packet Delivery Ratio Prediction for V2V Based on Radio Environment Map Considering Hidden Terminal Problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Transportation Systems Research	6. 最初と最後の頁 254 ~ 263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13177-020-00239-w	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 -

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

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Su Pyae Sone, Janne Lehtomaki, Zaheer Khan, Kenta 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 Shun Ishihara, Kenta Umebayashi, Janne Lehtomaki
2. 発表標題 Energy Detection for M-QAM Signals
3. 学会等名 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Leow Yau Hong, 梅林健太, Janne Lehtomaki
2. 発表標題 逐次型雑音電力推定法の初期パラメータ設定についての一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 スマート無線研究会 11月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺内健, 須藤克弥, 若生将史
2. 発表標題 無線給電センサネットワークにおける統計的チャネル品質に基づいたタイムスロット割り当て手法に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会 スマート無線研究会 7月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Katagiri and Takeo Fujii
2. 発表標題 Classification and discretization of shadowing toward low storage radio map
3. 学会等名 ICAIIC 2022, online, Feb. 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Nakaniida and Takeo Fujii
2. 発表標題 Throughput prediction by radio environment correlation recognition using crowd sensing and federated learning
3. 学会等名 ICAIIC 2022, online, Feb. 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keita Katagiri and Takeo Fujii
2. 発表標題 Partitioned Path Loss Models Based on Coefficient of Determination
3. 学会等名 ICOIN 2022, Online, Jan. 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keita Katagiri and Takeo Fujii
2. 発表標題 Low storage radio map using statistical inference
3. 学会等名 IEEE DySPAN2021, Online, Dec. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Empirical CDF-based power control method for obstructed V2V communications
3. 学会等名 ICETC2021, Online, Dec. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Estimation of the Number of Obstacles Based on p-value for V2V Communications
3. 学会等名 ICETC2021, Online, Dec. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keita Katagiri and Takeo Fujii
2. 発表標題 Mesh-clustering-based radio maps construction for autonomous distributed networks
3. 学会等名 ICUFN 2021, online, Aug. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中新井田寛志, 藤井威生
2. 発表標題 クラウドセンシングと連合学習を用いた無線環境相 関認識によるスループット予測手法の研究
3. 学会等名 RISING, Nov. 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片桐啓太, 藤井威生
2. 発表標題 決定係数に基づく距離減衰特性の分割モデル化
3. 学会等名 信学 技報, SR2021-54, Nov. 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中新井田覚志, 藤井威生
2. 発表標題 クラウドセンシングと連合学習を用いた無線環境相 関認識によるスループット予測手法の研究
3. 学会等名 信学技報, SR2021-53, Nov. 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片桐啓太, 藤井威生
2. 発表標題 メッシュクラスタリングに基づく自律分散環境向け電波 マップ構築
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-17-7, Sept. 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soraya Mitate, Yudai Yamazaki, Takeo Fujii and Shusuke Narieda
2. 発表標題 Wireless System Selection with Spectrum Database for IoT
3. 学会等名 ICOIN 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田有由夢, 藤井威生
2. 発表標題 車車間通信における電波環境マップを用いた隠れ端末 問題を考慮したパケット到達率補正手法の検討
3. 学会等名 ITSシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeru Terauchi, Katsuya Suto, Masashi Wakaiki
2. 発表標題 Harvest-Then-Transmit-Based TDMA Protocol with Statistical Channel State Information for Wireless Powered Sensor Networks
3. 学会等名 IEEE VTC'21-Spring (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun Ishihara, Kenta Umebayashi, Janne Lehtomaki
2. 発表標題 Energy Detection for M-QAM Signals
3. 学会等名 IEEE VTC'21-Spring (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蛭澤皓斗、梅林健太、Janne Lehtomaki
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Iwata, K. Umebayashi, A. Al-Tahmeesschi, Lopez-Benitez Miguel and J. J. Lehtomaki
2. 発表標題 Time and Frequency Varying Noise Floor Estimation for Spectrum Usage Measurement
3. 学会等名 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshop (WCNCW) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Umebayashi
2. 発表標題 Spectrum usage model for smart spectrum
3. 学会等名 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Riku Hashimoto and Katsuya Suto
2. 発表標題 SICNN: Spatial Interpolation with Convolutional Neural Networks for Radio Environment Mapping
3. 学会等名 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	藤井 威生 (Fuji Takeo) (10327710)	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・教授 (12612)	
研究分担者	太田 真衣 (Ohta Mai) (20708523)	福岡大学・工学部・助教 (37111)	
研究分担者	須藤 克弥 (Sto Katsuya) (70821867)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612)	

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1件

国際研究集会 Finland-Japan 2nd mini Workshop for Wireless communications (2nd Sept 2022)	開催年 2022年～2022年
---	--------------------

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	VTT			