

周波数共有システム実現を目指したスペクトラムセンシング技術

研究代表者

宗 秀哉

湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 講師

1 はじめに

2020年に第五世代移動通信システム(5G)のサービスが日本で開始され、現在では次世代移動通信システム(6G)の検討も開始されている。5Gでは、高速・大容量通信、多端末接続、高信頼・低遅延通信を軸に技術開発が進められている。高速・大容量通信を実現するためには、28 GHz帯といった準ミリ波帯に加えて、3.7 GHz帯や4.5 GHz帯といったマイクロ波帯の活用も進められている。この様に、携帯電話サービスをはじめとする無線通信では、決められた周波数帯を用いて運用している。一方で、マイクロ波帯では新規無線システムに割り当てただけの空き周波数がなく、既存システム間での使用調整を行うことで帯域を確保している。周波数資源は有限であるため、限られた周波数帯をいかに有効利用するかが無線通信の命題となる。

周波数利用効率向上のため、複数の無線システムが同一の無線リソースを共有する周波数共有が検討されている[1]。無線システムは、通信要求に応じて、割り当てられた時間/周波数/空間等の無線リソースを使用しているが、これらを常時使用していることは少ない。つまり、短い区間や特定の場所において、割り当てられた無線リソースを使用していない場合がある。そこで、一時的に空いた無線リソースを別の無線システムが二次利用することにより、限られた無線リソースで複数の無線システムの運用を行うことができる。

周波数共有では、同一無線リソースを使用する別の無線システムからの電波干渉による通信品質の劣化が問題となる。他無線システムが使用する無線リソースの使用状況を観測し、観測結果から各無線システムが使用する無線リソースを決定するスペクトラムセンシング技術が検討されている[2-4]。本研究では、スペクトラムセンシング技術のさらなる性能向上を目的として、1)観測チャンネル選択技術、2)実測評価を行った。

2 観測チャンネル選択技術

図1にシステムモデルを示す。周囲に同一チャンネルを使用する干渉システムが存在する。これらシステムは、 N 個のチャンネルから一つ選択し、通信を行う。ここで、 N 個のチャンネルはそれぞれ無相関とした。チャンネルの選択は各システムが独立に判断し、その判断基準や制御情報はシステム間で互いに共有しない。これは、各システムが異種無線システムであることを想定しているためである。提案システムはアクセスポイント(AP: Access Point)にチャンネル観測機を持ち、各チャンネルの使用状況(COR: Channel Occupation Rate)を観測し、その結果から使用チャンネルを選択する。提案システムは、時間を観測区間と通信区間の2つに分け、交互に切り替えて通信することを想定する。干渉システムは、 N 個のチャンネルから一つチャンネルを選択し、通信を行う。干渉システムは一度選択したチャンネルから変更は行わない、固定チャンネルによる通信とした。干渉システムはそれぞれ独立に動作するものとし、UE数やトラフィック量は異なるものとした。各通信では、Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance(CSMA/CA)を用いることを想定する。そのため、干渉システムが多く存在するチャンネルを用いた通信では、パケット衝突が多く発生し、通信品質が劣化する。

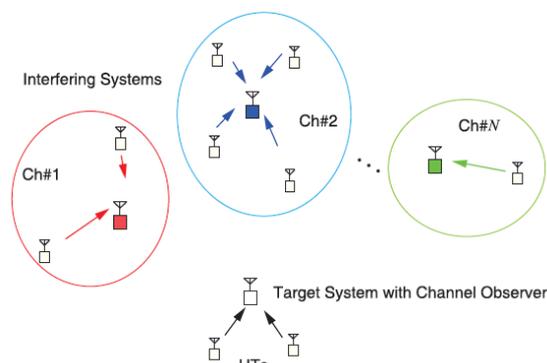


図1 システムモデル

図2 (a)に従来法のタイムチャート例を示す。観測機は、チャンネルの使用状況を T_{OBS} の時間で順番に観測する。第 n 番目のチャンネルにおいて、観測閾値以上となる時間の総和を $T_E(n)$ としたとき、第 n 番目のチャンネルの COR は $\rho(n) = T_E(n) / T_{OBS}$ となる。すべてのチャンネルを観測後、 $\rho(n)$ が最も小さくなるチャンネルを選択する。使用可能なチャンネル数が N 個の場合、観測にかかる時間の総和は $N T_{OBS}$ となる。観測時間 T_{OBS} が十分長い場合、チャンネルを使用する全てのシステムの使用状況を正確に把握することができる。しかしながら、観測チャンネル数が多い場合、 T_{OBS} が長くなると通信区間が相対的に短くなるためスループットが低下する [5]。さらに、観測してから通信までの時間も長くなるため、遅延が大きくなることも問題となる。一方で、 T_{OBS} が短くなると観測誤差が増大するため、高 COR となるチャンネルを選択する確率が高くなり、スループットが低下する。

そこで、観測精度向上のため、2段階観測を用いたチャンネル選択技術を提案する。図2 (b)に提案法のタイムチャート例を示す。1回目のチャンネル観測ではすべてのチャンネルの COR を観測し、最小 COR となりうる範囲を求める。1回目における1チャンネルあたりの観測時間を βT_{OBS} とする。ここで β は1回目観測時間比とする ($0 \leq \beta \leq 1$)。1回目の観測における第 n 番目のチャンネルの COR を $\rho^{(1)}(n)$ としたとき、観測した N 個の $\rho^{(1)}(n)$ を昇順に並び替える。並び替えた $\rho^{(1)}(n)$ のうち、最下位から N_E 個のチャンネルを除外し、 $(1 - \beta)T_{OBS}$ の観測時間で2回目の観測を行う。2回の観測後、2つの観測結果を合わせて COR を求め、最小 COR となるチャンネルを選択する。 N_E の決定は、観測結果に含まれている観測誤差を観測した信号の時間長より推定する。

この範囲より、最小 COR となりうるチャンネル候補を選抜し、選抜したチャンネル候補のみ2回目観測を行う。他チャンネルに割り当てる予定であった観測時間を選抜したチャンネルに割り振ることにより観測時間を相対的に長くすることができ、観測精度を向上できる。また、割り当てずに観測時間を短くすることでスループットを向上できる。

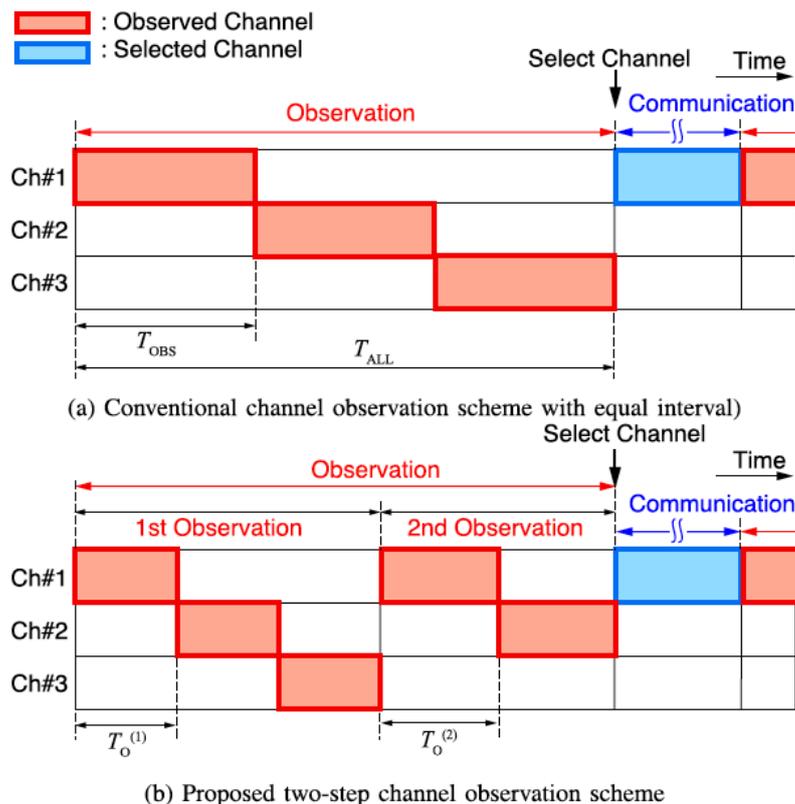


図2 タイムチャート例

無線 LAN の W52/W53 帯の使用を想定し、使用可能なチャンネル数が 8 の場合において計算機シミュレーションを行った。チャンネル毎に干渉システムが存在すると仮定し、それぞれ独立に信号を送信する。COR 真値 $\rho(n)$ は $\{0.22, 0.26, 0.30, 0.34, 0.38, 0.44, 0.48, 0.54\}$ とし、観測区間と通信区間において $\rho(n)$ は変化しないものとした。自システムはチャンネル観測結果をもとにチャンネルを選択し、CSMA/CA により通信を行う。自システムはペイロード長 64 バイトの packets を 39 Mbps のデータレートで送信するものとし、packet 発生はポアソン生起 ($\lambda = 100$ 個/sec) とした。従来法における 1 チャンネルあたりの観測時間は 500 ms とした。図 3 に通信の信頼性の CDF 特性を示す。ここで、信頼性とは packet が発生してから 2 ms 以内に正常受信される packet の受信確率と定義する。提案法における、1 回目の観測時間は 100/200/300 ms とした。1 回目の観測時間 βT_{OBS} を 200 ms 以上とすることで、従来の 1 回観測かつ等間隔でのチャンネル選択技術と較べて、通信の信頼性を向上できることがわかる。図 4 に、観測時間を省いた場合におけるスループット特性を示す。従来法と比べて約 1.3 倍のスループットが得られていることがわかった。スループットの改善効果に加えて、観測時間を省くことにより伝送遅延時間を短縮することができる。 $T_{\text{OBS}} = 100$ ms では、観測から通信開始までの時間が 400 ms 短縮される。これは全観測期間が半分になることを意味し、その分の伝送遅延時間を短縮することができる。観測時間の短縮率は、 $(N\beta + (N - N_E)(1 - \beta)) / N$ であらわすことができる。観測時間の短縮率は T_{OBS} の絶対量によらず同じとなるため、 $\beta = 0.2$ 、 $N_E = 5$ の場合はすべての T_{OBS} において観測時間を半減することができる。

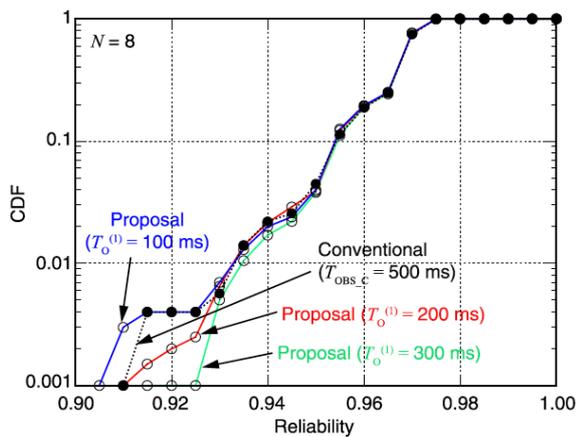


図 3 信頼性の CDF 特性

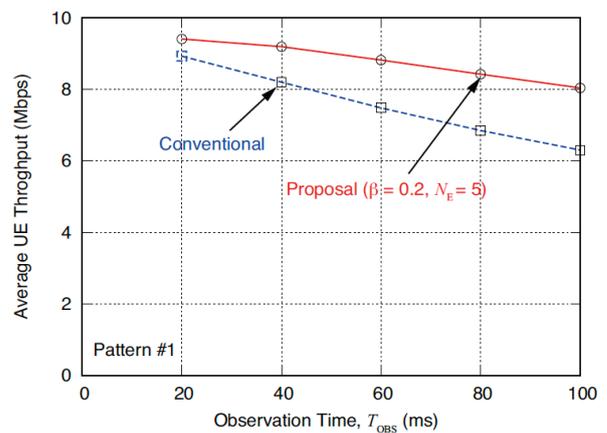


図 4 スループット特性

提案法の一般性を確認するために、干渉パターンを変化させたときの提案法の特徴を明らかにする。表 1 に用いた干渉パターンをしめす。

表 1 干渉パターン

Pattern	True COR
Interference pattern #1	[0.31, 0.35, 0.39, 0.43, 0.47, 0.54, 0.62, 0.62]
Interference pattern #2	[0.31, 0.33, 0.35, 0.37, 0.39, 0.41, 0.43, 0.45]
Interference pattern #3	[0.22, 0.25, 0.28, 0.31, 0.35, 0.39, 0.42, 0.47]

N_E を変化させたときの各干渉パターンの平均UEスループット特性を図5に示す。 $T_{OBS} = 20$ ms, $\beta = 0.2$ とした。どの干渉パターンにおいても、 N_E を大きくすると平均UEスループットは向上する。干渉パターン3は、他の干渉パターンと較べてスループットが高い。これは、干渉パターン3のCORの最小値が0.22であり、干渉パターンと較べて通信時に干渉の影響が小さくなるためである。一方、干渉パターン2は干渉パターン1と較べて約0.3 Mbpsだけスループットが低下する。これは、チャンネル毎のCOR真値の差が小さいため、最小CORとなるチャンネルを選択できていないためであると考えられる。 $T_{OBS} = 20$ ms, $N_E = 5$ における、 β を変化させたときの平均UEスループット特性を図6に示す。これまでの結果と同様の傾向になっていることが確認できる。

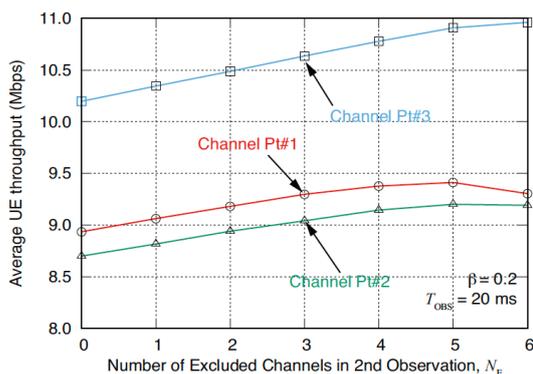


図5 除外チャンネル数による特性差

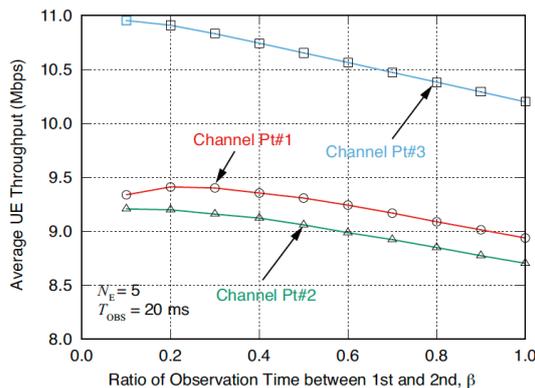


図6 観測時間比 β による特性差

図7に各干渉パターンにおけるチャンネル選択確率を示す。 $N_E = 5$, $\beta = 0.2$, $T_{OBS} = 20$ msとした。チャンネルインデックスはCOR真値の小さい順に対応している。干渉パターン1と3において、各チャンネルの選択確率はほぼ同じとなる。干渉パターン1のようにCOR間における最小の差分が約0.04であれば、0.45から0.5の確率で最小CORとなるチャンネルインデックス1を選択できる。一方、干渉パターン2では最小CORとなるチャンネルの選択確率が0.3と、他と較べて小さくなる。これはCORの差分が小さいためである。

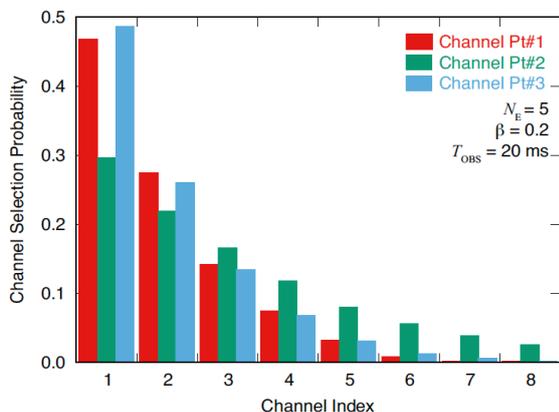


図7 チャンネル毎の選択確率 ($\beta = 0.2$, 除外チャンネル数5)

3 実測評価

ESP32により観測機を作製し、チャンネル観測の実験検証を行った。電波干渉源として、ESP32を用いたMQTT通信を行う干渉システムを作製し、干渉システムが送信するパケットをキャプチャすることでそれらの送信頻度やパケット長を抽出し、通信種別とパケットの特徴の紐付けを行った。図8に用いた観測系の構成を示す。ESP32を複数台用意し、MQTTを用いてPCへデータを送信する。送信データは、温度等のセンサデータを想定し、少量のメッセージデータとする。ESP32はそれぞれ1秒ごとにデータを送信する。実験装置は2m以内の範囲に配置し、すべてのデバイスは他デバイスの電場を観測できる環境とした。スペクトラムアナライザとパケットキャプチャはAPの周囲に配置した。使用周波数帯域は2.4 GHz帯を用いた。そのため、今回の測定に用意したデバイス以外も存在する環境での測定となる。

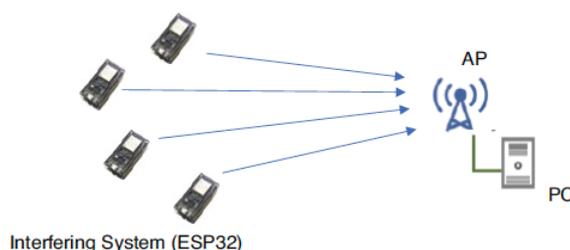


図8 観測系

図9にESP32の台数を5から10台まで変えたときの、使用率を示す。ESP32の台数を増加させることで使用率が増加していることがわかる。つぎに、パケットキャプチャ結果より各ESP32のパケットを取り出し、それぞれの送信回数をまとめる。図10にESP32の台数に対する、ESP32の送信回数の合計と平均値を示す。台数が増加することで送信回数が増加する。また、平均値は1を超えていることがわかる。これは、データの packets に加えて、制御パケットを送信しているためである。一方、送信回数が1以下となるESP32も存在した。これは他ESP32がパケットを送信することで自身の送信機会が得られず、つぎのパケットが到着したためである。この場合は、前のパケットとまとめてパケットを送信することが確認できた。

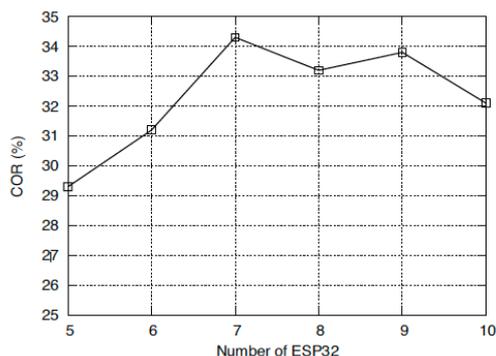


図9 使用率

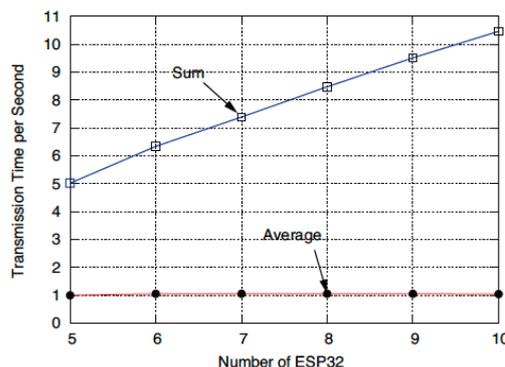


図10 パケット送信回数

つぎに、観測結果をもとにチャンネル選択を行った結果を示す。チャンネル観測および選択の動作フローを図 1 1 に示す。ここで利用可能なチャンネル数は i_{max} とする。まず、親機は i_{max} のチャンネルを順に観測（チャンネルスキャン）し、自局システムの周囲に存在する他 BSS の受信電力を取得する。第 i 番目チャンネルの観測受信電力の内、最も高くなる受信電力を γ_i として保持する。すべてのチャンネルをスキャン後、最も γ_i が低いチャンネルを選択する。

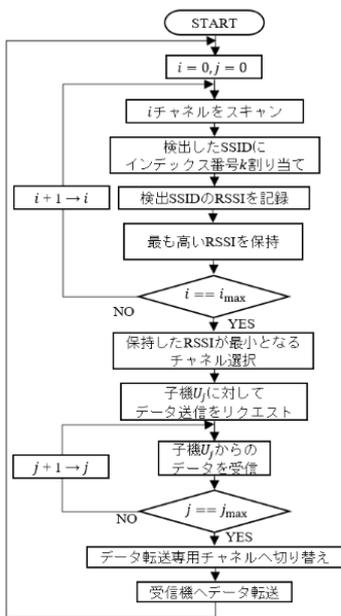


図 1 1 チャンネル観測および選択フロー

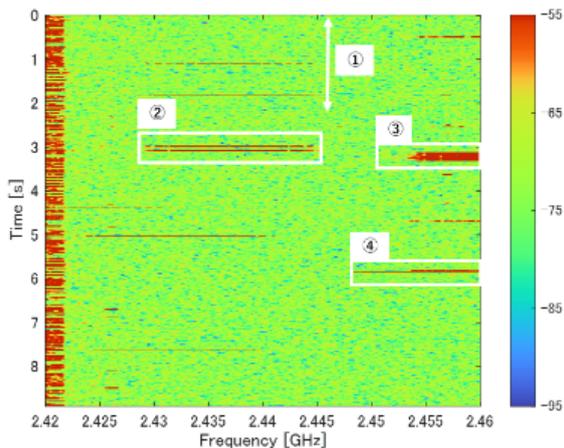


図 1 2 測定結果

提案システムが空きチャンネルを選択する動作を評価するため、干渉システムを用いて1つのチャンネルを使用中とした。ここでの干渉システムとしてAPでWi-Fi無線接続された2台のPCを準備し、両PC間でiPerf3より常にトラフィックを発生させた。この干渉システムの使用チャンネルとして1Chを固定的に使用した。図 1 2 にスペクトラムアナライザの測定結果を示す。横軸は周波数中心周波数が 2.44 GHz、測定周波数幅 40 MHz の範囲とし、縦軸は 0 から 9 秒間における受信電力を示す。図中では赤いほど受信電力が高く、測定周波数帯域内の受信電力を確認できる。1Ch の範囲となる 2.423 GHz までのスペクトラムを見ると、干渉システムが通信を行っているため、ほぼすべての時間で受信電力が -60 dBm を超えていることが分かる。0 から 2.5 秒の間では、チャンネルスキャンを行い、干渉システムにより使用されている 1Ch を回避し、6Ch を使用して、2.5 から 3 秒の間で通信を行う様子が確認できる。

4 まとめ

同一無線リソースを使用する複数の無線システムが共用する周波数共用において、他無線システムが使用する無線リソースの使用状況を観測し、観測結果から各無線システムが使用する無線リソースを決定するスペクトラムセンシング技術を検討した。本研究では、観測チャンネル選択技術と実測評価を行った。観測チャンネル選択技術では、すべてのチャンネルの観測結果より、チャンネルを選抜し2回目の観測を行うことにより、観測精度とスループットを改善できることを明らかにした。実測評価では、ESP32 を用いた観測機および模擬干渉システムを作製し、観測機およびスペクトラムアナライザにより干渉量を観測、その結果を用いたチャンネル選択アルゴリズムを実装した。干渉環境下においても、チャンネル選択が行われていることを評価した。

【参考文献】

- [1] S. Bhattarai, J. J. Park, B. Gao, K. Bian, and W. Lehr, “An overview of dynamic spectrum sharing: Ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 2, no. 2, pp. 110–128, Jun. 2016.
- [2] S. Haykin, D. J. Thomson, and J. H. Reed, “Spectrum sensing for cognitive radio,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 849–877, May 2009.
- [3] S. C. Horng and S. S. Lin, “Dynamic channel selection and reassignment for cellular mobile system,” *IEEE IS3C2014*, pp. 1006–1009, June 2014.
- [4] S. Takeuchi, M. Hasegawa, K. Kanno, A. Uchida, N. Chauvet, and M. Naruse, “Dynamic channel selection in wireless communications via a multi-armed bandit algorithm using laser chaos time series,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, Jan. 2020.
- [5] G. Umashankar and A. P. Kannu, “Throughput optimal multi-slot sensing procedure for a cognitive radio,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2292–2295, Dec. 2013.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Two-step channel observation scheme considering spread of observation results in dynamic spectrum sharing	IEEE Open Journal of Vehicular Technology (OJVT)	2022年7月
無線 LAN 環境におけるデータ集約型自律チャンネル選択手法	電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究専門委員会	2023年2月
ダイナミック周波数共用のための二段階無線チャンネル観測法のスループット特性評価	電子情報通信学会 無線通信システム研究会	2023年3月
干渉局が複数存在する環境におけるシャドウイングによる占有率観測への影響評価	電子情報通信学会 2023年電子情報通信学会総合大会	2023年3月
無線チャンネル切り替え制御のための無線環境観測の実測検討	電子情報通信学会 第28回東京支部学生会研究発表会	2023年3月
複数の干渉が存在する環境におけるシャドウイングによる占有率観測への影響評価	電子情報通信学会 無線通信システム研究会	2023年5月
土木建設分野における異種無線ネットワークを用いた安価なデータ収集システムの提案	電子情報通信学会 和文論文誌 B	2023年5月（投稿中）