

大学の研究・動向

第6世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

情報学研究科 通信情報システムコース 通信システム工学講座 デジタル通信分野

教授 原 田 博 司

准教授 水 谷 圭 一

助教 香 田 優 介

1. はじめに

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークワーキングサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでのように人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。2020年からは世界各国で5Gのサービスが開始されましたが、先に述べたユーザからの厳しい要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。現在、すでに5G以降のシステム（Beyond 5G）および6Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。このような国際的な動向も踏まえ、当研究室ではBeyond 5G/6Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、新信号波形・新物理層方式、ミリ波帯、テラヘルツ帯等高周波帯活用技術、全二重複信（Full-duplex）セルラシステム、周波数共用システム、高度ソフトウェア無線技術、高能率スマート無線M2M（Machine-to-Machine）通信システム、機械学習の通信システムへの応用、仮想空間における電波模擬システム技術の高度化などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。本稿では当研究室の研究動向およびその成果の一部を紹介致します。

2. 次世代移動ブロードバンド通信システム

2.1. マルチバンド・ブロードバンド無線通信システム

本研究プロジェクトでは、通常のマイクロ波、UHF（Ultra High Frequency）帯携帯電話用周波数だけでなく、VHF（Very High Frequency）、UHF Lowバンド、ITS（Intelligent Transportation System）バンド、ミリ波、テラヘルツ波を用いた高能率ブロードバンド移動通信システムを実現するための、伝搬特性モデリング、周波数利活用方式、通信方式、伝送方式、アクセスプロトコル、位置推定アルゴリズムに関する研究を行っています。

2.2.1. VHF帯を用いたブロードバンド移動通信システム

Beyond 5Gや6Gにおいては、携帯電話システムのカバレッジ広域化や、超広域に設置されたセンサやメータ、モニタなどの人間以外のM2M機器を携帯電話などのネットワーク基盤で収容する方策の実現が課題となっています。超広域をカバーするための周波数帯としてVHF帯が注目を集めており、国内では200MHz帯が公共業務等通信に割当てられています。当研究室ではこれまでに、この200MHz帯における直交周波数分割多元接続（OFDMA）と無線多段中継を用いた広域無線通信システムの技術

開発と標準化（ARIB STD-T103/119）、及び商用化に取り組み、70 km 超の多地点多段中継広域データ伝送試験 [1]、単区間 100 km 超の双方向映像伝送試験 [2] に成功しています。また、本システムを用いて取得された VHF 帯電波伝搬情報と機械学習による端末位置（電波発射源）探索アルゴリズムを提案実装し [3]、京都市街地での実機実証に成功しています（図 1）。さらに当研究室では、VHF 帯における 5G システムの利用を提案し、10km を超える通信エリアを実現する VHF 帯超広域小型自営系（プライベート）5G システム（基地局、端末）開発にオープンソースを用いたソフトウェア無線技術を利用し成功しました（図 2） [4]。この成果により、数 km から 10km 程度の限定された範囲内においてセンサ、メータ、モニタが必要なさまざまなアプリケーションや災害時の仮設的な情報伝達、映像伝送手段として、簡易に 5G システムを提供することが可能になります。なおこれらの研究の一部は内閣府 ImPACT 原田博司プログラム「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」、総務省 SCOPE 電波 COE プログラム（JP196000002）、及び国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（05101）における受託研究の一環として実施されたものです。

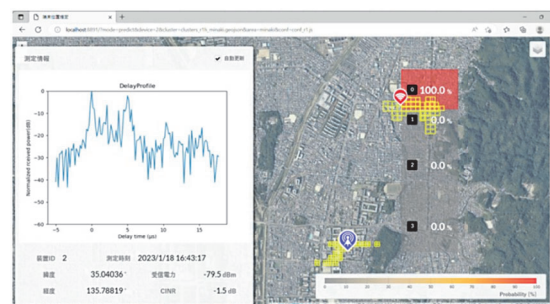


図 1：VHF 帯電波伝搬情報と機械学習を用いた端末位置測定実証試験（地図出典：地理院地図）



図 2：開発した超広域小型自営系 5G システムの評価系

2.2.2. ミリ波、テラヘルツ波を用いたブロードバンド移動通信システム

ミリ波帯、テラヘルツ波帯は、非常に広帯域を使用できることから、5G、Beyond 5G、および、6G における無線通信の使用帯域として注目されています。しかし、ミリ波帯、およびテラヘルツ波帯は、電波を遮蔽することによる電力の減衰が著しいという特徴があり、セルラシステムで使用しようとするとエリア形成が困難です。このことから、現状 5G ミリ波通信はあまり普及しておらず、テラヘルツ波通信においても同様の課題が生じると考えられます。当研究室では、ミリ波帯・テラヘルツ波帯の利用モデルを携帯電話基地局 - 端末間の通信に限定せず、近接機器や個人の端末を高速につなぐ無線 PAN (Personal Area Network) という比較的实现しやすい利用モデルから、徐々にその輪を広げていき、携帯電話基地局も含めた大きな高速無線ネットワークを構築するというビジョンを持って研究しています（図 3）。こうして構築される無線ネットワークは、近接する個人間のコミュニケーションとしても、電波の遮蔽に対してレジリエントなセルラー通信網としても利用できるようになります。このように、ミリ波・テラヘルツ波通信の展開にあたっては、公衆系通信（携帯電話網）と自営系通信（無線 PAN）を総合的にみたシステムをデザインすることが有効であると考えています。

本研究では、このシステムの実現のために電波伝搬モデリング技術、物理伝送方式、マルチホップ通信方式等について研究開発を行っております。公衆系・自営系を統合するとなると、これまでそれぞれ 3GPP、IEEE という標準化団体で個別に開発・

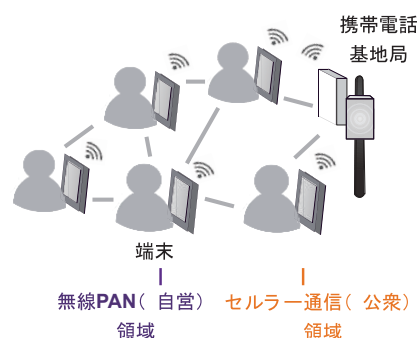


図 3：当研究室で提案しているミリ波・テラヘルツ波無線通信システム

仕様策定されてきた方式同士を統合し、統一的なフレームワークに落とし込む必要があります。当研究室では、まずは電波伝搬データ・モデルを見直し体系的に整理した上で、セルラー通信環境での電波伝搬特性と無線 PAN 環境でのミリ波・テラヘルツ波電波伝搬特性を同じアルゴリズムフローで計算機上に再生成するフレームワークを提案し [5]、プログラムを評価版として一部公開しました [6]。また、本来セルラー通信用途に開発された 5G の信号フォーマットに従いつつミリ波無線 PAN を構築するための方法を開発し、当該フォーマットに準拠したミリ波無線 PAN 制御信号用の新たな物理伝送方式を開発しています [7] (図 4)。なお、本研究の一部は、NICT の委託研究 (JPJ012368C04201) 及び、総務省における受託研究 (JPJ00595) の一環として実施されたものです。

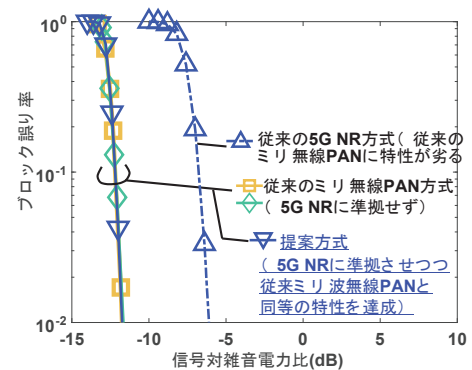


図 4：開発した 5G NR 準拠ミリ波無線 PAN 制御信号伝送方式の特性

2.2.3. 新信号波形・新物理層方式

Beyond 5G や 6G においては、超高速通信だけでなく大規模端末接続や超低遅延通信などへの対応が期待されており、一層の周波数利用効率改善が急務となっています。そのためには有限の無線リソースを無駄なく利用する技術が必要です。利用可能な無線リソースをさらに拡大するためには、送信信号の帯域外輻射 (Out-of-band emission, OOB) を抑圧することで、限られた周波数帯で多くの端末を収容することが方策の一つです。現行の 5G をはじめとする多くの無線通信システムにおいて採用されている直交周波数分割多重 (OFDM) 方式はマルチパスに耐性がある利点を持つ一方で、高い OOB が問題となっています。本研究室ではこの高い OOB を少ない計算量で大幅に抑圧することを可能にする、Universal time-domain windowed OFDM (UTW-OFDM) 方式を提案し

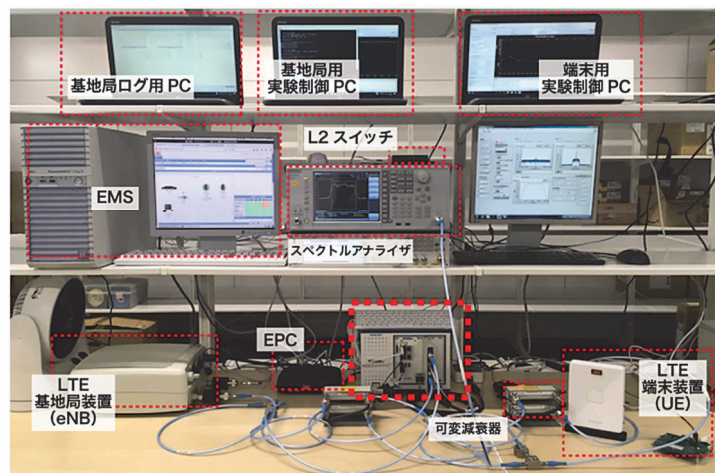
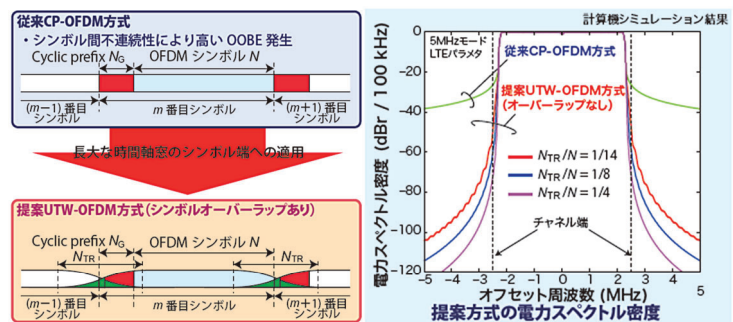


図 5：提案 UTW-OFDM の原理・性能・実機評価系

[8]、ソフトウェア無線機 [9] や LTE 商用基地局・端末を用いた実機実験に成功し [10]、実際にローカル 5G 商用無線機への一部導入を実現しました (図 5)。なお本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」の受託研究の一貫として実施されたものです。

2.2. 全二重複信 (Full-Duplex) セルラーシステム

本研究では、6G のセルラーシステムにおいて、これまで以上に通信容量の増大化を図るために、基

地局にアップリンクとダウンリンクを同時に行う機能を具備させた Full-Duplex セルラーシステム（図6）に関して、自己干渉キャンセル方式、干渉可視化方式、端末スケジューリング方式、送信電力制御方式、通信方式、実装方式の研究開発を行っています [11]-[13]。特に自己干渉キャンセル方式については、5G の制御信号を用いた高性能な手法を提案し、ソフトウェア無線機を用いた実機実証に成功しています（図7）。さらにこの Full-Duplex セルラーを導入した Beyond 5G を仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発し、都市空間 3D データと基地局及び端末の配置並びに端末移動パターンを入力することにより、端末移動時の場合のエミュレーションを実施し、Full-Duplex 導入効果の評価・可視化に成功しました [14]。本成果により、実空間に無線機を設置して試験を行わなくてもエミュレータを用いて現実空間を模擬した検証をすることが可能になり、システム導入によるスループット改善特性の評価を容易にすることが期待できます。なお、本研究の一部は総務省「第5世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」（JPJ000254）及び「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発」（JPJ000254）における受託研究の一環として実施されたものです。

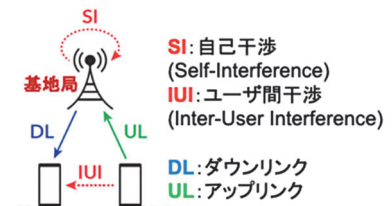


図6：Full-Duplex セルラーの基本形態



図7：開発した Full-Duplex セルラーシステム

3. ダイナミックスペクトラムアクセス通信

本研究では、既に特定の利用目的のために割り当てられている周波数において、「空間的」、「時間的」に利用可能な周波数帯であるホワイトスペースと呼ばれる周波数帯を利用して、既存利用者に対して干渉させることなく 6G 用周波数として共同利用するための、周波数管理方式、通信方式、通信プロトコルの研究開発、及び干渉検知のための電波センサ等の研究開発を行っています [15], [16]。

4. 高能率スマート無線 M2M 通信システム

6G においては、人間のみならず、固定、移動体に設置された大量のセンサ / メータ / モニタ等の各種計測機器からの情報を収集・利活用する必要があります。本研究では、電源供給のみならず電池駆動によるセンサ / メータ / モニタでも利用可能な低消費電力型の IoT 用無線通信システム Wi-SUN (Wireless Smart Ubiquitous Network) [17] の研究開発を行っています。研究成果は米国電気電子学会 (IEEE) および Wi-SUN アライアンス等で標準化、商用化を行っ

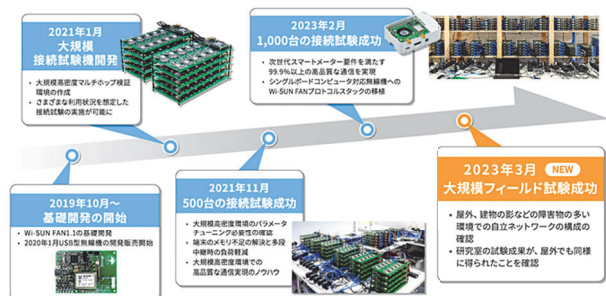


図8：当研究室における Wi-SUN FAN の研究開発動向

ています。

本研究では、Field Area Network (FAN) と呼ばれる 20 段程度の大規模マルチホップ接続に対応した国際標準規格を用いた研究開発を世界に先駆けて推進しています (図 8)。これまでにマルチホップ接続を駆使し多数の無線機からの情報を一つの基幹無線機に集約し収集するシステムを 1,000 台の機器を用いて開発に成功し、通信成功率 99.9% 以上の高品質な通信を実現しました。さらに大規模高密度環境における通信試験として、京都大学構内に 400 台の無線機を設置し、全無線機の自律的なマルチホップネットワーク構築の確認および通信試験を行うことに成功しました [18]。これにより、市街地や住宅地、集合住宅などでも Wi-SUN FAN の自律的なマルチホップネットワーク構築機能が有効に働くことが実証でき、今後実用化が進む次世代スマートメータやスマートシティでの実用化に目途が立ちました。

さらに、この Wi-SUN FAN を仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発し、住宅密集地の都市空間 3D データと Wi-SUN FAN 無線機の配置を入力することにより、スマートメータを 500 台配置した場合のエミュレーションを実施し、データの伝搬経路や伝搬品質の評価・可視化に成功しました (図 9) [19]。この成果により、実空間に無線機を数百台設置して試験を行わなくてもエミュレータを用いて現実空間を模擬した検証をすることが可能になり、システム導入前の電波の到達性や網羅性など、設置設計の精度向上が期待できます。なお本研究開発は、総務省 SCOPE 電波 COE プログラム (JP196000002) 及び、総務省「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発」(JPJ000254) における受託研究の一環として実施されたものです。

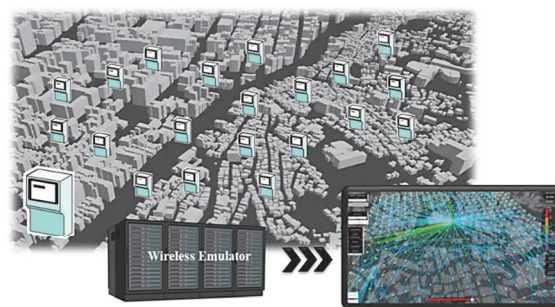


図 9：仮想空間上でのスマートメータ設置模擬実験 (横浜市周辺 3D データ上に Wi-SUN FAN 無線機を 500 台設置)

5. おわりに

原田研究室での研究概要についてごく簡単なながらも紹介させていただきました。皆様のご理解とご支援を賜れますと幸いです。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

参考文献

- [1] 【報道発表】IoT データ収集・制御用広域系 Wi-RAN システムによる 70 km 超無線多段中継伝送を用いた多地点広域データ伝送試験に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2017_08.html
- [2] 【報道発表】長距離化公共ブロードバンド移動通信システムによる単区間 100km 超映像伝送に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2019_02.html
- [3] T. Hayashida, et al., "Possibility of Dynamic Spectrum Sharing System by VHF-band Radio Sensor and Machine Learning", Proc. IEEE DySPAN, 1-6 (2019).
- [4] 【報道発表】長距離化公共ブロードバンド移動通信システムによる単区間 100km 超映像伝送に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2019_02.html
- [5] Y. Koda, et al., "Survey, taxonomy, and unification of standard mmWave channel models for WPAN, WLAN, and cellular systems in 6G," IEEE Communications Standards Magazine, in press.
- [6] 【報道発表】第 6 世代移動通信システムの研究開発に資するサブテラヘルツ帯電波伝搬シミュレー

- タを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_03.html
- [7] Y. Koda, et al., "Toward 3GPP sidelink-based millimeter wave wireless personal area network for out-of-coverage scenarios," IEEE Internet of Things Journal, in press.
- [8] K. Mizutani, et al., "Comprehensive Performance Evaluation of Universal Time-domain Windowed OFDM-based LTE Downlink System," IEICE Trans. Commun., E102-B (8), 1728-1740 (2019).
- [9] 【報道発表】 京都大学原田研究室が無線周波数資源を有効に活用する第5世代移動通信システム用通信方式 UTW-OFDM を開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2016_01.html
- [10] K. Mizutani, et al., "Experimental Evaluation of Universal Time-domain Windowed OFDM-based LTE Downlink System by Real-time Wave-shaping", Proc. IEEE PIMRC, 1-5 (2017).
- [11] K. Mizutani, H. Harada, "Quantization Noise Reduction by Digital Signal Processing-assisted Analog-to-digital Converter for In-band Full-duplex Systems," IEEE Trans. Wirel. Commun., 21 (8), 6643-6655 (2022).
- [12] K. Fukushima, et al., "Throughput Enhancement of Dynamic Full-Duplex Cellular System by Distributing Base Station Reception Function," IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 114-126 (2022).
- [13] S. Mori, et al., "A Digital Self-Interference Cancellation Scheme for In-Band Full-Duplex-Applied 5G System and its Software-Defined Radio Implementation," IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 444-456 (2023).
- [14] 【報道発表】 5G システムおよび Full-Duplex を導入した Beyond 5G システムを仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_05.html
- [15] A. Sakai, et al., "Highly Efficient Sensing Methods of Primary Radio Transmission Systems toward Dynamic Spectrum Sharing-based 5G Systems," IEICE Trans. Commun., E104-B (10), 1227-1236 (2021).
- [16] K. Minaki, et al., "Radio-Protected Area Estimation Model Using Location-Dependent Gain for a Spectrum Sharing System in the VHF-Band", IEEE Open J. Vehi. Technol., 4, 12-24 (2022).
- [17] H. Harada, et al., "IEEE 802.15.4g based Wi-SUN Communication Systems," IEICE Trans. Commun., E100-B (7), 1032-1043 (2017).
- [18] 【報道発表】 スマートメーター・シティ向け国際無線通信規格 Wi-SUN FAN 大規模フィールド実証に成功, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2023_02.html
- [19] 【報道発表】 都市空間に設置された IoT 用無線システムを仮想空間で評価するデジタルツイン・ワイヤレスエミュレータを開発, https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_04.html