

帯域外漏洩電力を大幅に抑圧し、高い周波数資源の利用を実現する オープンソース型ローカル 5G システムを開発

—商用端末も接続可能なシンプルで小型なローカル 5G の社会実装を加速—

概要

国立大学法人 京都大学大学院情報学研究科の原田博司教授、水谷圭一准教授、武田和樹修士課程学生の研究グループ（以下 京都大学）は、帯域外漏洩電力を大幅に抑圧し、周波数を高密度に利用することが可能な UTW-OFDM 方式と、基地局のみならず基地局に接続する端末の使用周波数帯域を適応的に制御する端末利用帯域適応制御技術を搭載した、商用端末も接続可能なシンプルで小型なローカル 5G システムをオープンソースによるソフトウェア無線技術で開発しました。今回の成果により、オフィス、工場等の限定されたローカルな範囲内において、商用端末と接続可能なシンプルな 5G システムを提供することができるようになり、ローカル 5G システムの普及が加速することになります。



図1 開発したオープンソース型小型ローカル 5G システム

1. 背景

現在、5Gシステムが複数の携帯電話の事業者によって提供され、5Gシステムがもつ超高速大容量、低遅延、多数同時接続といった特徴を有する新しいアプリケーションが創出されています。また、5Gシステムは携帯電話の事業者のみならず、地域の企業や自治体等のさまざまな主体が、主に建物内や敷地内での限定されたエリアにおいて、5Gを自営系無線通信システムとして利用するローカル5Gも普及しつつあります。このローカル5Gシステムは、Wi-Fiに代表される無線LANと比較して、無線局免許に基づいているため通信速度等が安定的な利用が可能である一方、無線機の価格が高価であること、商用端末の利用ができないこと等の課題があるため、未だ爆発的な普及には至っていません。このローカル5Gの普及促進を行うためには、商用端末が接続可能なWi-Fiのアクセスポイントのような小型無線基地局、コアネットワークの開発が必要になります。さらに、このような小型ローカル5Gが爆発的に普及した場合、限られた周波数帯域において、多くの周波数チャンネルが必要となり、これを実現するためには帯域外漏洩電力を大幅に抑圧し、周波数を高密度に利用することが必要になります。これを可能とするために基地局のみならず基地局に接続する端末の使用周波数帯域を適応的に制御する技術をローカル5Gシステムに搭載する必要があります。

2. 研究成果

帯域外漏洩電力を大幅に抑圧し、基地局のみならず基地局に接続する端末の使用周波数帯域を適応的に制御する小型ローカル5Gシステム（コアネットワーク、基地局）の開発に成功しました（図1）。

主に下記の5点について研究開発しました。

- (1) 5G NRを実現するオープンソースソフトウェア（以下5Gソフトウェアとする。）を利用し、小型PC2台内にそれぞれ5G NRの基地局のベースバンド処理機能（CU、DU機能）とコアネットワークの機能をソフトウェアで実現。（外観を図1、基本仕様は表1に示す。）
- (2) この基地局のダウンリンク信号処理を行う5Gソフトウェアに帯域外漏洩電力を大幅に抑圧し、周波数を高密度に利用することが可能なUTW-OFDM方式を実現する機能を追加
- (3) この基地局のアップリンク信号処理を行う5Gソフトウェアに基地局に接続する端末の使用周波数帯域を適応的に制御する端末利用帯域適応制御技術であるEdge-cutスケジューリング法を追加
- (4) 5G NRの基地局のベースバンド信号処理部が搭載された小型PCとソフトウェア無線機を接続することによりローカル5Gの運用周波数帯（4.9GHz帯）において変調、復調を実現。
- (5) このローカル5G基地局と商用端末（iPhone 14 Pro）を接続させ、通信に成功するとともに、基地局から遠隔で商用端末の送信周波数帯域幅を可変させることに成功（図2）

なお5G-NRの無線機の開発には京都大学が国内の大学として最初かつ唯一加入しているOAI(OpenAirInterface) software Allianceが供給するオープンソースを利用しました。また、UTW-OFDM方式とは、5Gで用いられているCP-OFDM方式に対して、帯域の利用効率劣化につながる帯域外不要輻射の発生原因である、隣接シンボル間の不連続性を長大な時間軸窓で波形整形することで、強力に抑圧する方式です（図3）。また、端末利用帯域適応制御技術であるEdge-cutスケジューリング法とは、端末が放射する信号の帯域外不要輻射を制限したいときに、基地局が端末に対して、信号の帯域外不要輻射を抑えるよう利用周波数を削減するようスケジューリングし、制御する方法です（図4）。この開発した基地局と商用端末（iPhone 14 Pro）を用いて、電波暗室内に基地局と商用端末を設置し、基地局、端末それぞれの帯域外輻射電力および最大データ伝送速度（スループット）の測定実験を行いました。送信電力は0dBm(1mW)と10dBm(10mW)で実施しました（図2）。シールドボックスでの測定の実験の結果、基地局の送信電力

が 0dBm の場合、UTW-OFDM 方式により帯域外輻射電力を約 22dB 抑圧でき、また送信電力が 10dBm の場合、約 18dB 抑圧できました (図 5)。また端末の送信電力は、Edge-cut スケジューリング法により約 11dB 抑圧できました (図 6)。

さらに図 2 の電波暗室の環境 (送受信間の距離は約 12m) でアプリケーション (OpenSpeedTest) を用いて最大データ伝送速度を測定したとき、基地局から端末への下り回線で 164.8 Mbps (送信電力 10dBm)、132.1 Mbps (送信電力 0dBm) が達成され、端末から基地局への上り回線で 56.1 Mbps (送信電力 10dBm)、48.2 Mbps (送信電力 0dBm) が達成されました (表 2)。

表 1 開発した小型ローカル 5G システムの仕様

項目	値
周波数	4.85 GHz
通信方式	5G NR OFDMA
開発した機器	基地局 (gNB) コアネットワーク (5GC)
送信電力	10 dBm / 0 dBm
変調方式	QPSK、16QAM、64QAM-OFDM (適応変調)
OFDMの方式	UTW-OFDM (基地局) CP-OFDM (端末)
端末側帯域幅	100 MHz (Edge-cut無) 80 MHz (Edge-cut有)
PRBs	273 (基地局) 273 (端末、Edge-cut無) 245 (端末、Edge-cut有)
HARQ rounds	4

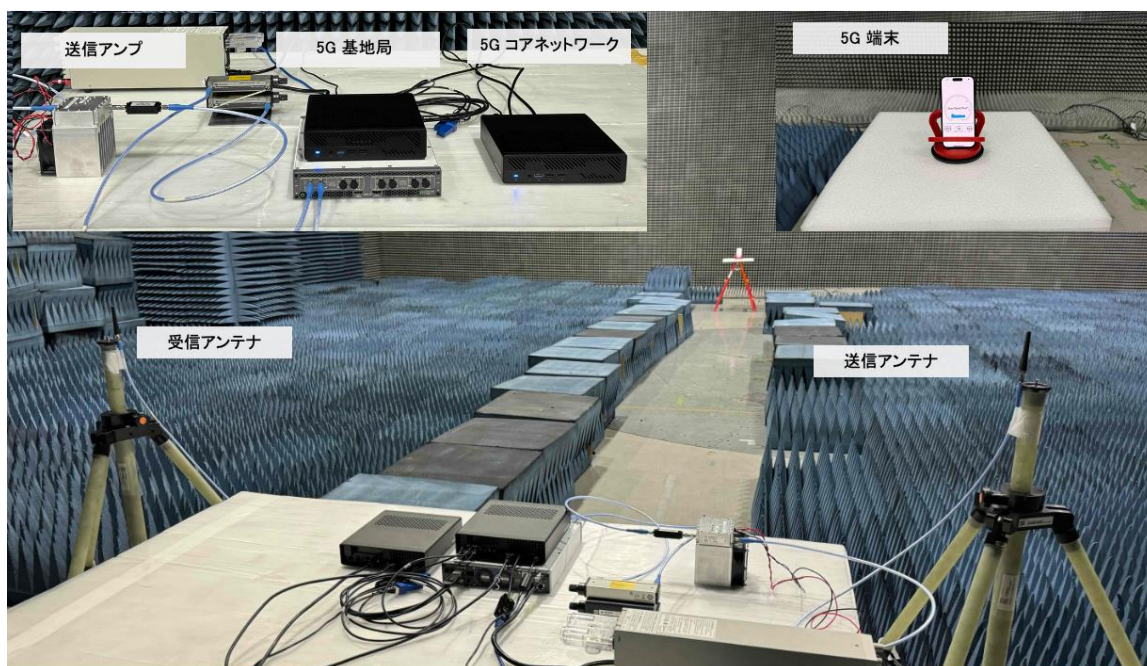


図 2 開発した基地局、コアネットワークと商用端末の接続試験の様子 (送信電力 10dBm の場合)

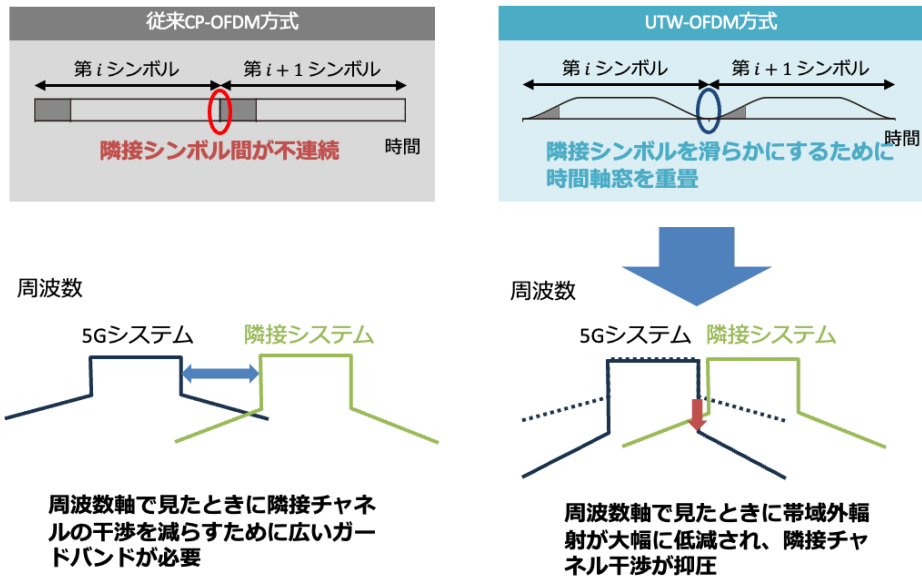


図3 UTW-OFDM方式の概要

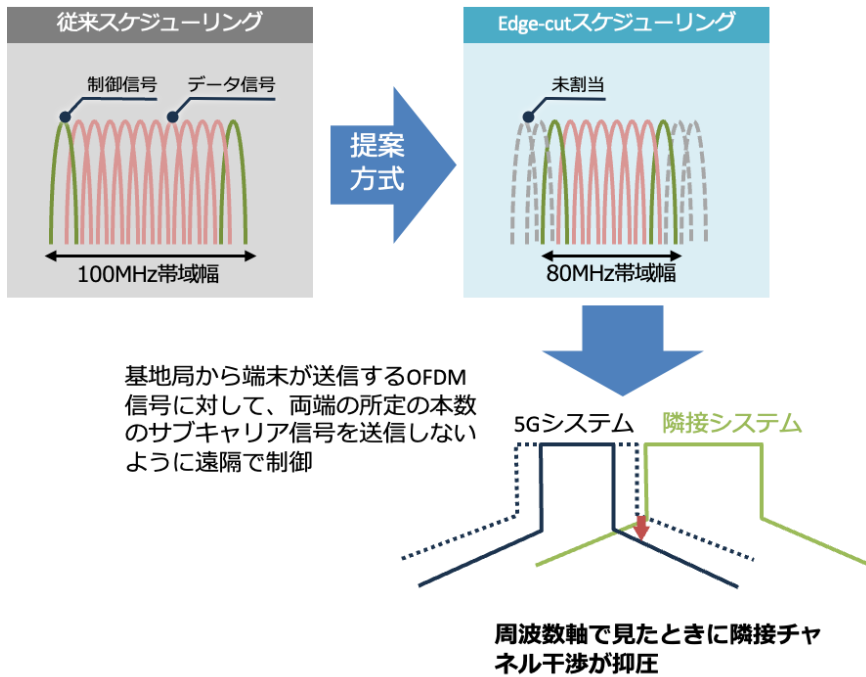


図4 端末利用帯域適応制御技術 (Edge-cut スケジューリング法)

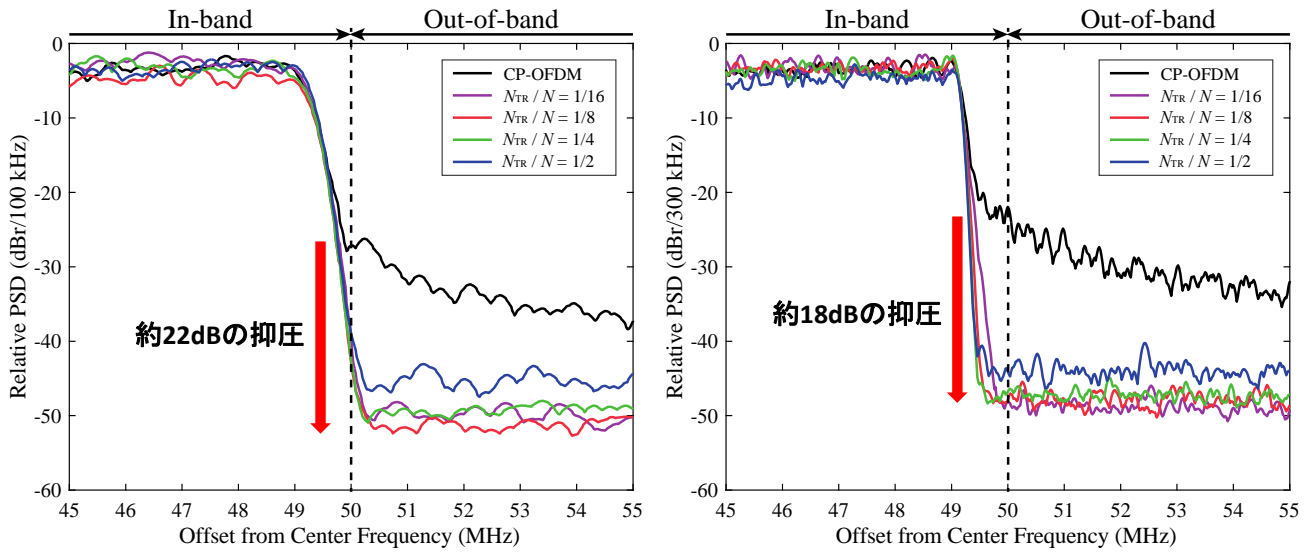


図5 基地局の UTW-OFDM 方式による
帯域外輻射電力の抑圧度 (右: 送信電力 0dBm、左: 送信電力 10dBm)

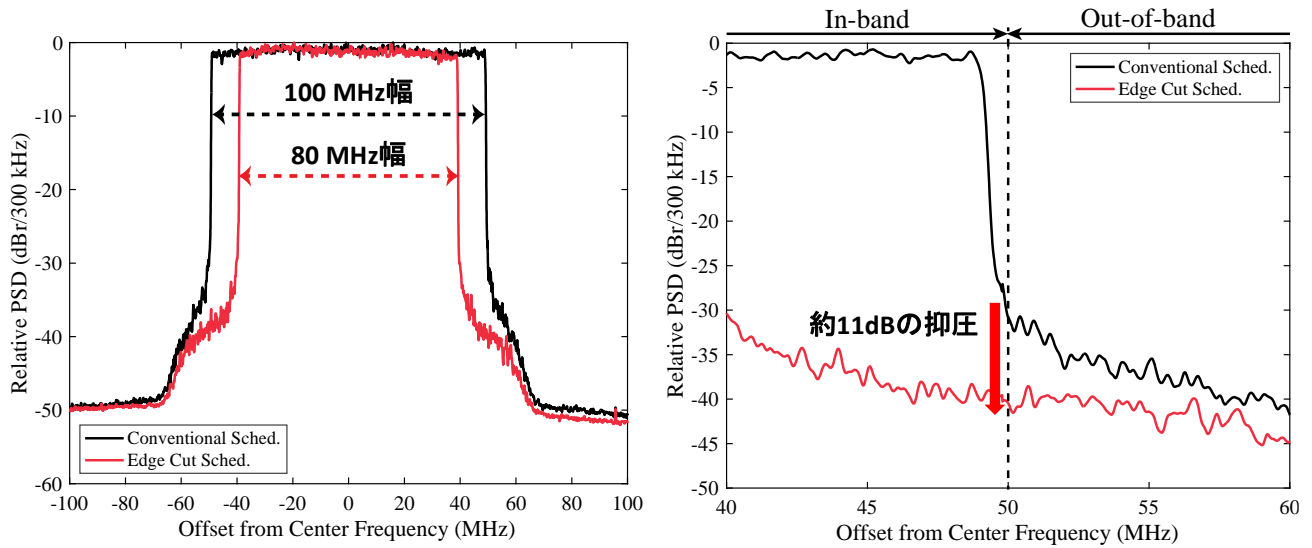


図6 端末の Edge-cut スケジューリング法による帯域外輻射電力の抑圧度
(右: 全体の周波数、左: 帯域外輻射電力)
約 11dB の帯域外輻射電力を抑圧可能

表2 電波暗室で測定した場合の伝送特性

送信電力	従来方式		提案方式	
	DL	UL	DL	UL
0 dBm	181.8 Mbps	67.9 Mbps	132.1 Mbps	48.2 Mbps
10 dBm	238.7 Mbps	73.8 Mbps	164.8 Mbps	56.1 Mbps

3. 波及効果、今後の予定

今回の成果により、商用端末も接続可能で、帯域外漏洩電力を制御可能な、シンプルな構成の小型ローカル5Gが実現できることが実機により示されました。この成功により、無線LANのアクセスポイントのように、オフィス、工場等の限定されたローカルな範囲内において、商用端末と接続可能なシンプルな5Gシステムを提供することができるようになり、ローカル5Gシステムの普及が加速することになります。今後は、当該無線機を用いて各種アプリケーションフィールドにおける伝送特性評価を行うとともに、商用化を目指します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究（JPJ010017C07501）および総務省の受託研究（JPJ000254）の一環として実施されたものです。電波暗室での実験は、京都大学生存圏研究所の全国共同利用設備マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)にて行われました。

<用語解説>

1. ローカル5G

携帯電話事業者による5Gの全国サービスと異なり、地域や産業の個別ニーズに応じて、企業や自治体などの様々な主体が自らの建物内や敷地内で5Gシステムを設置し、免許を取得し、自営的に運用する5Gシステム。現在周波数として、4.9GHz、28GHz帯がローカル5G用の周波数として割り当てられている。

2. 5G New-Radio

5Gで採用された無線インターフェースであり、国際標準化団体3GPP(3rd Generation Partnership Project)で標準化されています。様々なユースケースに応じた柔軟な信号生成を可能とします。

3. OAI(OpenAirInterface) software Alliance

5Gをオープンソースソフトウェアで構築することを目的としているコミュニティであり、2014年に設立されています。OAIアライアンスが供給する5G NRを実現するソフトウェアをPC等にインストールすることで標準化団体3GPPが制定する5Gシステム（コアネットワーク、基地局、端末）の信号処理部分の機能を実現でき、ソフトウェアを変更、追加することによりさまざまな研究開発を実施することが可能になります。京都大学はこのアライアンスに国内の大学として初めて正式に加入しています。