

SDR（ソフトウェア無線）を用いた

ローカル5G（Sub6帯）におけるマイクロ波測定システムの開発

菅間 秀晃（電子技術部）

土屋 明久（電子技術部 電磁環境グループ）

水矢 亨（企画部 経営戦略課 新事業戦略グループ）

今井 大貴、橋本 修、須賀 良介（青山学院大学）

1. はじめに

KISTECでは県内中小企業へのDX（デジタルトランスフォーメーション）支援サービス提供を目指して、2021年3月にローカル5G（Sub6帯）の無線局を開設した。ローカル5Gは最新の無線通信技術を活用して高速・高セキュリティな無線ネットワークを構築できる。図書室（図1）および試作実験棟の3つの実験室に設置したローカル5Gを活用して企業や大学と共同研究を実施している。設置したローカル5G基地局はSub6帯と呼ばれる中心周波数4.85GHz、占有帯域幅100MHzのマイクロ波を使って規格上最大1.9Gbps（上り・下りの合計）の高速無線通信が可能である。しかし、従来の4Gの主要周波数800MHz帯に比べて5倍以上高い周波数帯であるため、電波の直進性が強く、障害物による反射・減衰が大きいなど通信品質の劣化が懸念されている。そこでローカル5G通信エリアの電波状況を評価するために簡便に電波強度測定できる小型スペクトラムアナライザが有用である。近年、SDR（Software Defined Radio；ソフトウェア無線）を用いた低価格の無線通信機器やスペクトラムアナライザ（周波数4.4GHzまで）などの高周波計測器などが市販されるようになった¹⁾。SDRはソフトウェアで無線機能を自由に追加・変更できるため、低コスト・短期間で測定システムの開発が可能である。

本報告は、SDRを用いたローカル5G（Sub6帯）のマイクロ波測定システムについて報告する。

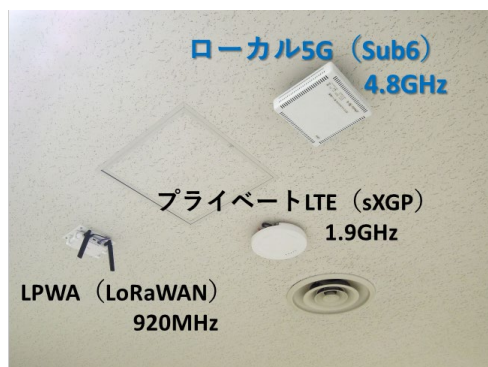


図1 ローカル5G（Sub6帯）基地局

2. 実験及び結果

2.1 SDRとGNU Radioによるスペクトラムアナライザ

ローカル5G（Sub6帯）の周波数に対応した安価なSDR機器は少数ではあるが市販されている²⁾。本研究で

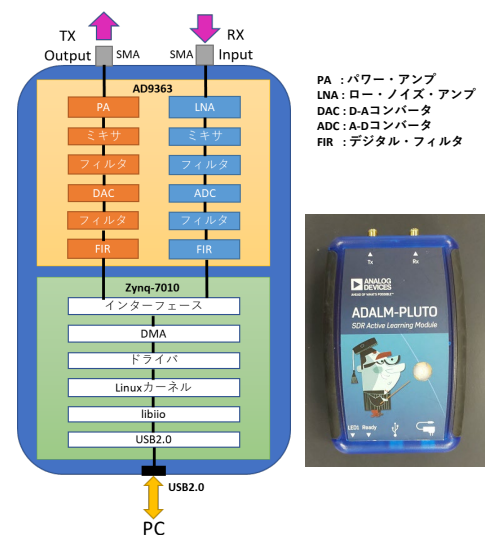


図2 ADALM-PLUTO(PlutoSDR)

表1 PlutoSDRの性能一覧

項目	仕様
トランシーバ	AD9363 RFアジャイル・トランシーバ ※AD9364相当に拡張設定
RFポート	1×TX, 1×RX
周波数範囲	70 M ~ 6 GHz ※拡張設定後
帯域幅	56 MHz ※拡張設定後
ADC/DAC分解能	12ビット
送信電力	+7 dBm
受信雑音指数	<3.5 dB
FPGA	Zynq-7010
インターフェース	USB2.0, micro USB Type-B
寸法/重量	117 mm × 79 mm × 24 mm / 114 g

は、ADALM-PLUTO（アナログ・デバイセズ製；以下、PlutoSDR）を採用した。PlutoSDRは、図2に示すようなブロック構成で、非公式ではあるが拡張設定後の諸性能は表1に示す通りである³⁾。周波数範囲が70 MHzから6GHz、帯域幅が最大56MHz、ADコンバータ（ADC）の分解能が12bitとローカル5G（Sub6帯）で使用される中心周波数4.85GHz、帯域幅100MHz、基地局出力50mWの測定に適している。

また、SDRと接続するPCは安価で小型なRaspberry Pi 4Bを用いて、オープンソースソフトウェアのGNU Radioでスペクトラム解析プログラムを作成した。Raspberry Pi 4BはWi-Fi5(IEEE802.11ac)とBluetoothの無線機能を標準で搭載しており、簡単に無線通信システムを構築できる。開発環境は全てオープンソースであるため低コストというメリットがあるが、開発に必要な情報が乏しく、ソフトウェアのバージョン違いによりSDRが動作しないなど難しい一面もある。

今回は、主要なSDR機器のドライバやGNU Radioを含むSDR制御ソフトウェアをバンドルしたRaspberry Pi OSのディストリビューションであるPiSDR（Ver.6.1, 64bit版）を利用して開発を行った⁴⁾。このPiSDRをコピーしたSDカードをRaspberry Piに挿入して起動すると、サポート対象のSDR機器をUSB接続するだけで、ドライバのインストール不要で使用できる。本測定システムは広い空間で効率的に測定を行う必要があるため、台車ロボットに搭載することを考慮した。Raspberry Piの電源定格は電圧5V・電流3Aとなっているので、長時間動作（目標2時間）させるために、定格出力が電圧5V・電流3Aで容量が10,000mAh（37Wh）のモバイルバッテリー（ANKER製PowerCore 10000 Redux）を採用した。

GNU RadioはGNU Radio Companion（GRC）を使用してフローグラフによるプログラミングによりスペクトラム解析ソフトウェアを短時間で開発することができる。必要な信号処理ブロックをフローグラフ上で配線接続することで、任意の受信システムを開発できる。SDRではFFT信号処理を行うと、FFTの中心周波数にDC成分が現れるため、DCカットの信号処理ブロックを挿入する必要がある。本研究では図3に示すように4.85GHzを中心周波数として帯域幅50MHzでパワースペクトラム測定とWaterfall表示するGUIを作成した。PlutoSDRは周波数拡張設定をしているが、インターフェースがUSB2.0（480Mbps）であるため、帯域幅50MHzでは信号処理速度が不足して十分な性能が得られていないので、Max Holdの測定時間を長くすることで測定精度を高めている。また、トリガー・モードを使用して測定の取りこぼしを減らしている。

2.2 台車ロボットと制御プログラム

図4に示す電波を受信するホーン・アンテナ（マイクロウェーブファクトリー製MDH0218）を取り付けた台車ロボット（Nexus Robot製3WD 100mm Omni Wheel Robot Kit 10013）はオムニホイール3輪で移動するタイプであ

る⁵⁾。Arduino328互換ボードを搭載しているので、外部PCから台車ロボットをシリアル通信で制御できるようにするために図5に示すオープンソースのArduino IDEでプログラムを作成し、Arduino328互換ボードのソフトウェアを書き換えた。外部PCからのシリアル通信で前進・後退・右移動・左移動・右回転・左回転・停止と移動速度・回転速度の制御が可能である。

Raspberry Piから台車ロボットを操作するプログラムはThonny（オープンソースPython IDE）を使用して図6のように作成した。GUIはPySimpleGUIライブラリを使用し、前進・後退・右移動・左移動・右回転・左回転・停

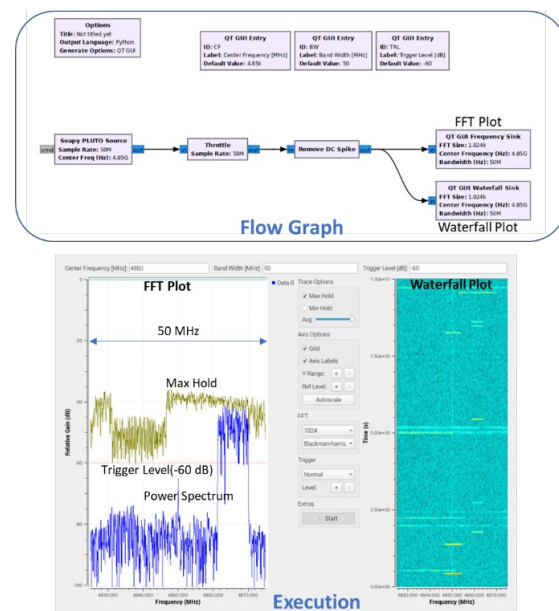


図3 SDRとGRCによるスペクトラムアナライザ

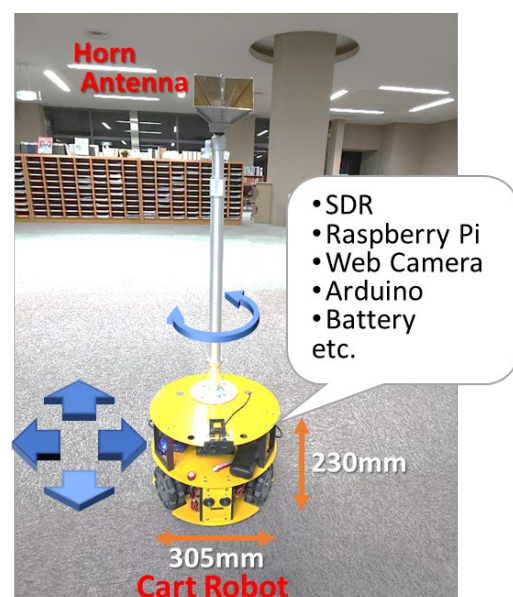


図4 ホーン・アンテナを搭載した台車ロボット

止のボタンスイッチと移動速度・回転速度の数値入力ボックスを配置した。シリアル通信（通信速度 9600bps）は PySerial ライブラリを使用した。台車ロボット前方に Web カメラ（解像度 1K）を搭載し、Raspberry Pi と USB 接続した。Web カメラのリフレッシュレートは 15Hz 以上を確保するために画面解像度を 640×480pix としている。

2.3 SDR 機器の電磁干渉対策

PlutoSDR の本体ケースがプラスチック製であるため、図 7 に示すように台車ロボットに搭載したときに、Raspberry Pi や Arduino ボードなどから発生する無線電波や電磁ノイズなどを受信してしまう EMI（電磁干渉）問題が発生した。PlutoSDR はアンテナを未接続の状態でも様々な周波数の電波を受信しており、正確な電波強度測定が困難であった。このため、図 8 に示すように PlutoSDR の本体ケースの内側に電磁シールド塗料（プラスチック製 PCS-107AgCu）を塗布することで、4.8GHz 帯において 30dB 以上のシールド効果を確認した。

2.4 スマートグラスを活用したリモート操作システム

台車ロボットの遠隔操作は、図 9 に示すスマートグラ

ス（エプソン製 BT-30E ; 1280×720 pix）を装着して、実空間に仮想スクリーンを融合した映像を見ながら行うことができる。スマートグラスと Raspberry Pi を HDMI 接続することで、実空間に 40 型相当の仮想スクリーン（仮想視聴距離 2.5 m 時）を表示して効率的な電波測定が可能

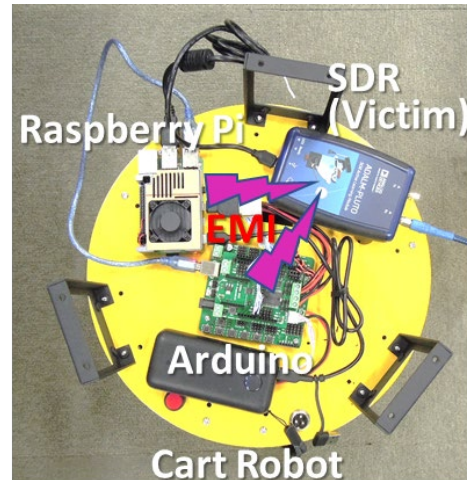


図 7 SDR と制御機器との電磁ノイズ干渉

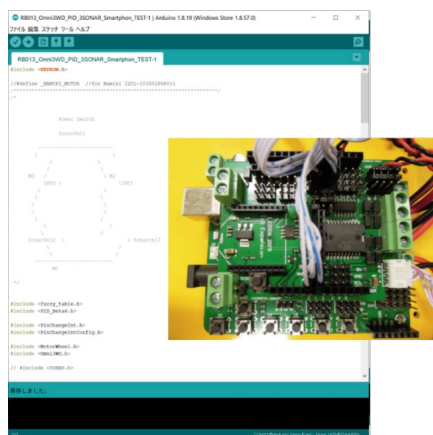


図 5 Arduino IDE によるロボット制御プログラム



図 8 電磁シールド塗料による SDR の電磁ノイズ対策



図 6 Python によるロボット・コントロール GUI



図 9 スマートグラスと遠隔制御

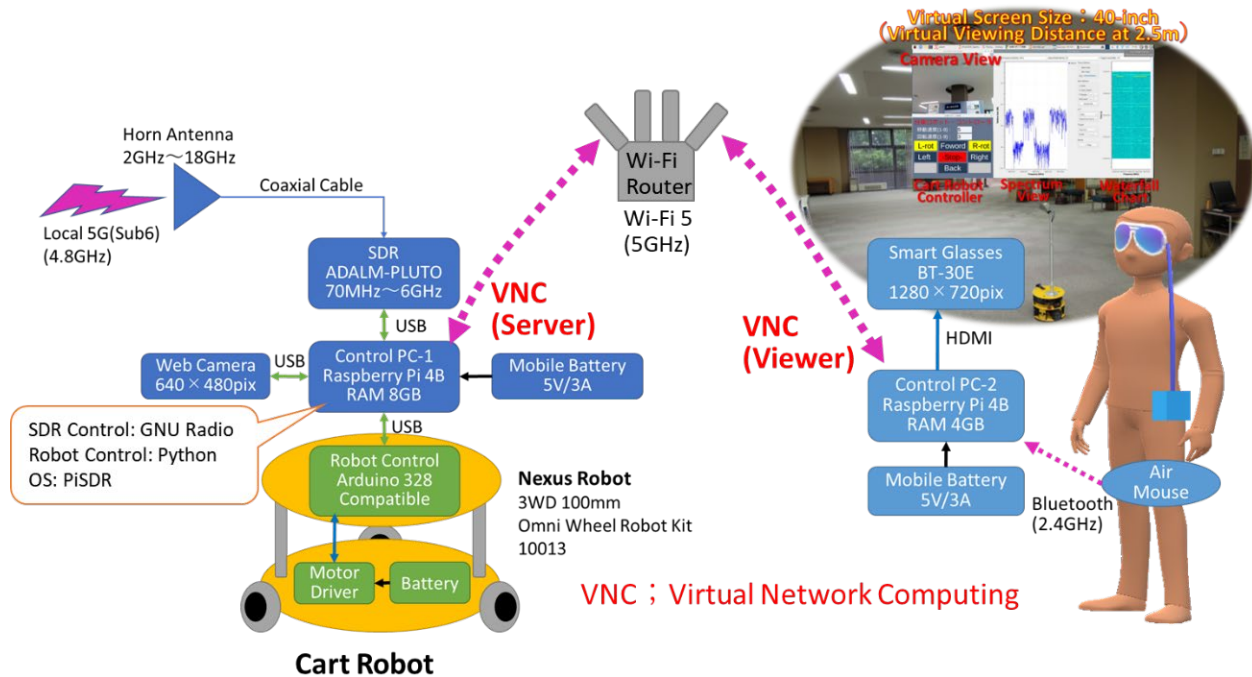


図 10 SDR を用いたローカル 5G (Sub6 帯) におけるマイクロ波測定システム

能である。ウエストポーチに入れた Raspberry Pi から台車ロボットに搭載した Raspberry Pi に無線ネットワーク接続して、空中マウス（エレコム製 M-RT1BR；Bluetooth 2.4 GHz）でリモート操作が可能である。スマートグラスを装着しての台車ロボットの操縦と電波強度の測定は訓練を要するが、見えない電波の可視化により、現場での作業効率が高まり、信頼性の高い無線通信システムの実現に貢献できる。

具体的には図 10 に示すように 2 台の Raspberry Pi (PC-1 と PC-2) を Wi-Fi 5 (IEEE802.11ac；5 GHz 帯) で VNC (Virtual Network Computing) 接続してリモート制御を行った⁹⁾。PiSDR には RealVNC Server が標準インストールされており、PC-2 に RealVNC Viewer を追加インストールすることで、PC-1 の画面を PC-2 から直接制御できる。Wi-Fi 5 は MIMO を活用して、広い範囲で通信可能であり、図書室内での無線通信に問題がないことを確認した。初期段階で台車ロボットのリモート制御はラジコン用アプリをインストールしたスマートフォンから Bluetooth (2.4 GHz 帯) 通信で試みたが、基地局から一番離れた本棚の奥（距離 約 15 m）では、制御不能に陥ることが確認されたため、Wi-Fi 5 でのリモート制御に変更した。

2.5 図書室におけるローカル 5G の電波強度測定

ローカル 5G を設置した図書室において、図 11 に示す電波伝搬経路の異なる A 点と B 点で測定を行った。PlutoSDR 内蔵の LNA 利得を 40 dB、トリガーレベルを -60 dB に設定し、台車ロボットを連続回転させ、Max Hold で電波強度を測定した結果の最大値を比較すると、A 点は約-37 dB (図 12)、B 点は約-47 dB であり (図

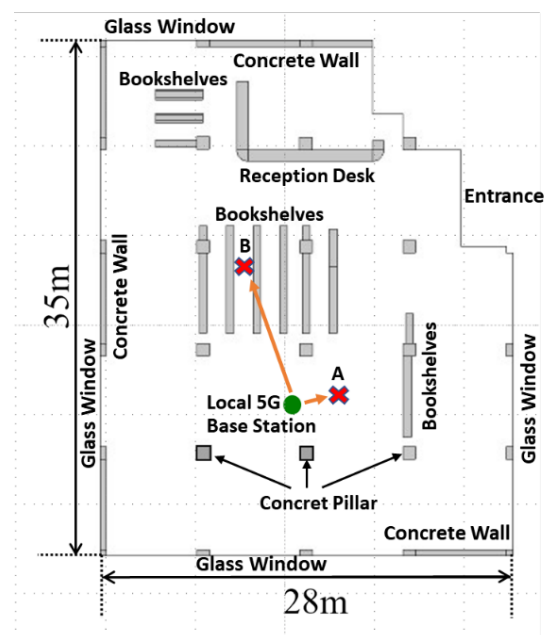


図 11 図書室と測定点

13)、約 10 dB の差異があることがわかる。なお、測定系の校正を実施していないため、電波強度の単位は dB としている。B 点は本棚により電波強度が約 10dB 減衰しているがローカル 5G の通信安定性に影響ないことが、共同実験等を通して確認できている。

3. 考察及び今後の展開

KISTEC の図書室に設置したローカル 5G (Sub6 帯) の電波状況について PlutoSDR を用いたマイクロ波測定シス

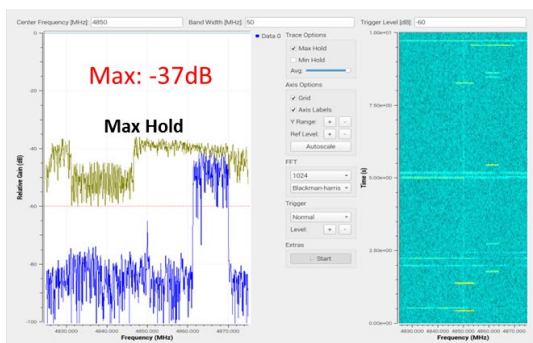


図 12 測定点 A における電波強度測定

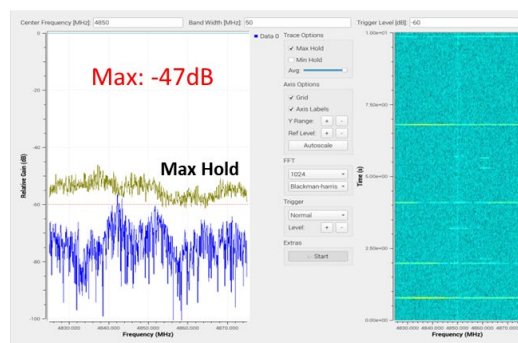


図 13 測定点 B における電波強度測定

テムを開発して実測を行った。本測定システムはローカル 5G (Sub6 帯) だけでなく、Wi-Fi6(IEEE802.11ax)、Bluetooth、プライベート LTE など周波数 6GHz までの無線通信システムの電波強度測定に利用できる。

PlutoSDR 以外にも 6GHz までの周波数に対応した HackRF One (GREAT SCOTT GADGETS 製; 以下、HackRF) と NI-USRP 2900 (日本ナショナルインスツルメンツ製; 以下、USRP) も購入して検討を行っている。

HackRF は、Linux 環境と Windows 環境のどちらでも安定して動作し、多数のフリーソフトウェアがサポートしているため SDR の入門機として最適である。また、掃引型スペクトラムアナライザのような広帯域測定も可能なフリーソフトウェアも公開されている。ただし、ADC が 8bit であるためローカル 5G (Sub6 帯) の電波測定には感度不足であるので LNA (利得 20dB 程度) の追加が必要となる。

USRP は高価であるが、高速信号処理用の FPGA が搭載されていて、測定精度と効率性が高く、Windows PC とグラフィカル・プログラミング言語 LabVIEW (日本ナショナルインスツルメンツ製) の開発環境でフレキシビリティの高い測定システムが実現できるため、高精度を要求する測定には USRP を使用している。

今後の展開として、コンピュータ・シミュレーションを用いて、大規模空間の電磁界解析を行うために、令和 4 年 2 月にレイトレース法による電波伝搬解析シミュレータ (構造計画研究所製 RapLab) を導入した。図 11 に示す図書室の 3 次元モデルを作成して解析精度向上を模

索している。実測とシミュレーションを併用することで、ローカル 5G (Sub6 帯) をはじめ、マイクロ波を利用する Wi-Fi6、プライベート LTE、LoRaWAN などを使った無線 IoT システムの安定性向上に貢献できるように、デジタルツイン環境の構築を目指す。

【参考文献】

1. 高橋知宏, 富井里一, 通販ガジェッツで広がる RF 測定の世界, *RF ワールド*, 54, 8-41(2021)
2. 高橋知宏, GRC で広がる SDR の世界, *RF ワールド*, 44, 7-91(2018)
3. 藤井義巳, RF 送受信機 ADALM-PLUTO の準備, *Interface*, 5, 63-66 (2021)
4. <https://github.com/luigifcruz/pisdr-image/releases>, PiSDR Version 6.1 (64-bits)
5. https://www.vstone.co.jp/robotshop/index.php?main_page=product_info&products_id=3753, 3WD100mm オムニホイールロボット 10013
6. <https://www.indoorcorgielec.com/resources/raspberry-pi/raspberry-pi-vnc/>, VNC で Raspberry Pi にリモートデスクトップ接続 (Windows/Mac/Linux 対応)
7. <https://engineer-climb.com/hackrf-one-2/>, HackRF One を Windows で動かす

【外部発表】 口頭発表 1 件