

ソフトウェア無線機を用いた
アンテナスイッチング方式
MIMOチャネルサウンダの開発
Development of an Antenna Switching
MIMO Channel Sounder with Software Defined Radio

2023年7月12日

IEICE TC-AP@北海道立道民活動センター

○池上十五，金ミンソク
新潟大学大学院 自然科学研究科

本研究は，JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA22P22683407 の助成を受けたものです。

研究背景 | 伝搬路測定装置



- 伝搬路情報：通信システムの設計に必要
 - 測定装置・アンテナを空間的に配置しインパルス応答を取得
- 動的測定の要求
 - 車車間通信における特性評価
 - ・ 経路損失・信号フェージング・遅延広がり・ドップラー広がり
 - 多重波伝搬を用いた屋内測位
 - ・ 複数のMIMO伝搬路測定装置で短時間測定
- 既存の測定装置
 - VNA
 - MIMOチャネルサウンダ
 - 高価・対応周波数が限定的
- ソフトウェア無線機（SDR）に着目
 - ソフトウェアを使用して様々な通信方式に対応
 - 複数の周波数帯で柔軟に測定可能



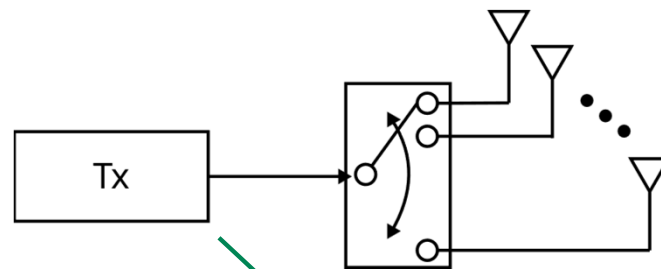
VNA



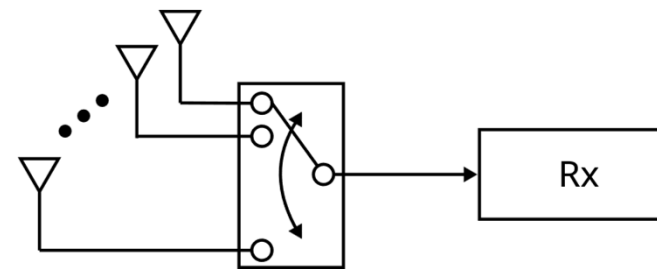
MIMO
チャネルサウンダ

■ アンテナスイッチング方式

- 複数の送受信アンテナをスイッチにより切り替えて使用
- フルMIMO方式と異なり1系統の送受信回路で測定可能
- 一般に切り替えに時間を要するため低速または静的な環境に有効
- 高速なスイッチングにより動的測定を可能に



送受信回路は1系統



スイッチングにより
アンテナ切り替え

➤ 目的：動的測定可能な伝搬路測定装置の開発

- ソフトウェア無線機を使用して周波数帯を容易に変更
- 高速なアンテナスイッチング

ソフトウェア無線機 | 概要

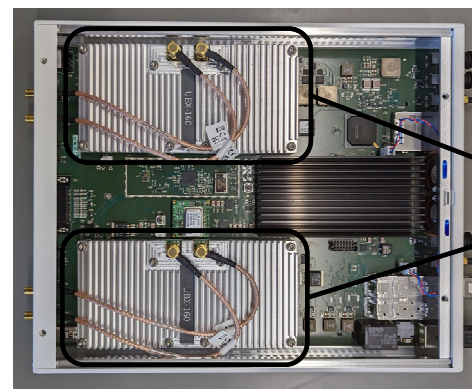


■ USRP (Universal Software Radio Peripheral)

- Ettus Research社製ソフトウェア無線機
- 回路図・FPGAプログラムが公開されたオープンソースのソフトウェアプラットフォーム
- 豊富な開発環境
 - C / C++・Python用のオープンソースAPI
 - GNURadio・LabVIEWのようなグラフィカルプログラミング
 - MATLAB・Simulink
- ドーターボードの差し替えで様々な周波数帯に対応



USRP外観



USRP内部

ドーターボード

ソフトウェア無線機 | 仕様



■ 本研究の構成

● USRP X310

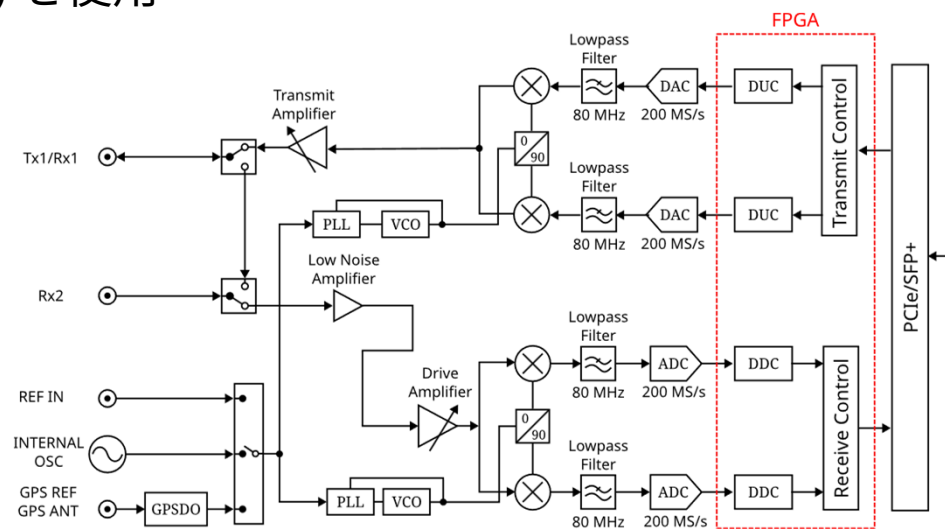
- 2 チャンネル（それぞれTx/RxとRx）
- ホストとの接続インターフェース：USB・PCIe・1G/10G bit Ethernet
（最大200 MSps / channel）
- 最大伝送電力：約 20 dBm

● ドーターボード：UBX-160

● 開発環境はUHD C++ API (v4.4.0) を使用

X310+UBX-160 の仕様

項目	仕様
対応周波数帯	10 MHz - 6 GHz
最大パスバンド帯域幅	160 MHz
DAコンバータの性能	16 bit, 800 MS/s
ADコンバータの性能	14 bit, 200 MS/s

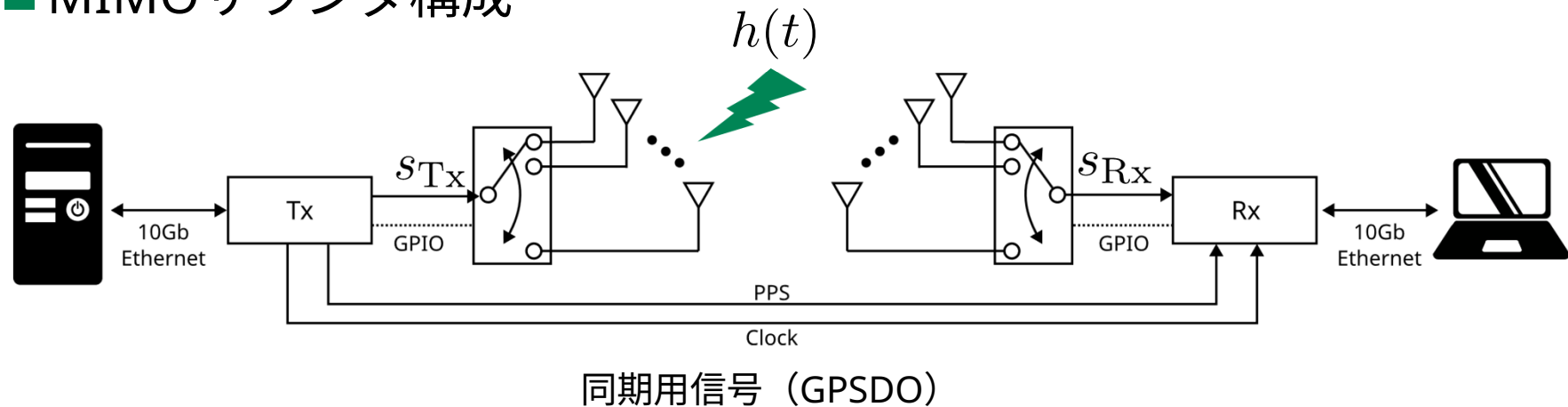


ブロック図

サウンド構成



■ MIMOサウンド構成



■ 信号処理

- チャネルのインパルス応答を導出
- 伝達関数を求め逆フーリエ変換

$$\begin{array}{ccc} s_{Rx}(t) = h(t) * s_{Tx}(t) & \xrightarrow{\text{FFT}} & S_{Rx}(f) = H(f)S_{Tx}(f) \\ & \xleftarrow{\text{IFFT}} & H(f) = \frac{S_{Rx}(f)}{S_{Tx}(f)} \\ h(t) & & \end{array}$$

サウンド構成



■ 各種パラメータ

項目	仕様
搬送波周波数	6 GHz (最大)
サンプリング周波数	200 MHz
信号帯域幅	100 MHz
送信信号	ニューマン位相 マルチトーン信号
副搬送波数	128

項目	仕様
副搬送波間隔	781.25 kHz
シンボル長	1.28 μ s
遅延時間分解能	10 ns
FFT点数	256
送信電力	15 dBm (typ.)
測定時間	164 μ s (8 $\times$ 8MIMO)

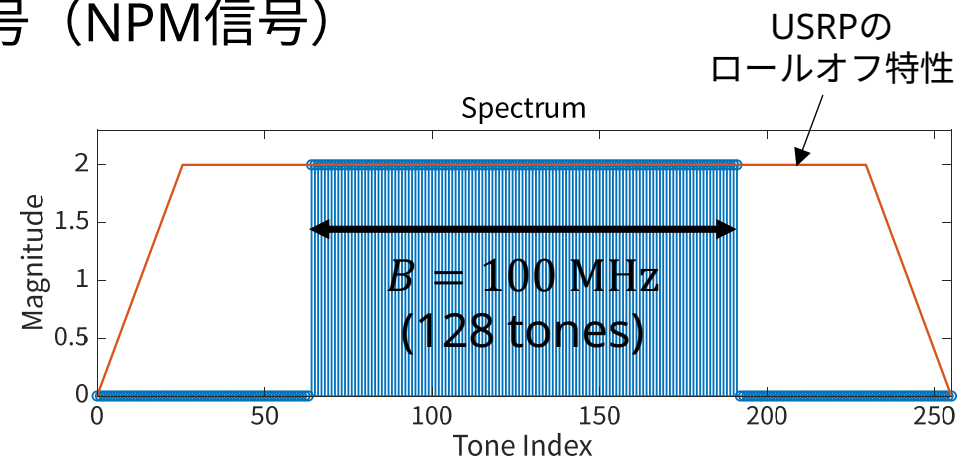
■ ニューマン位相マルチトーン信号 (NPM信号)

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \exp(j2\pi\Delta_f t + j\phi_k)$$

N : トーン数 B : 信号帯域幅

$\Delta_f = \frac{B}{N}$: トーン間隔

$\phi_k = \frac{k^2\pi}{N}$: ニューマン位相



サウンド構成



■ RFスイッチ

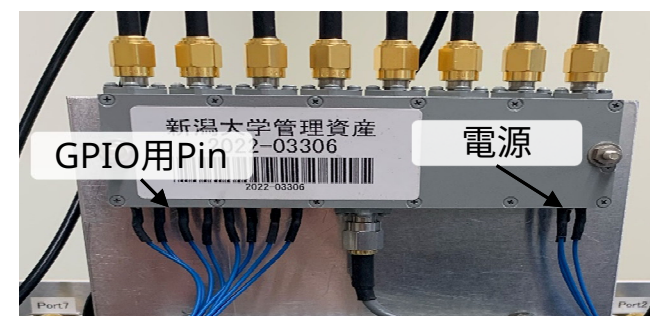
- SR-J030-8S (Universal Microwave Components Corp.)
- X310の15ピン汎用GPIOを使用
 - UHD APIでは制御用関数が提供

スイッチ仕様

項目	仕様
動作周波数帯	0.5 GHz – 12.4 GHz
挿入損失	3.0 dB Max
アイソレーション	0.5 – 6 GHz: 60 dB Min 6 GHz – 12.4 GHz: 50 dB Min
VSWR (オン状態)	1.8:1 Max
立上り/立下り時間 (10% to 90 % RF, 90% to 10%RF)	40 ns Max
On/Off 時間 (50% TTL to 90% RF, 50% TTL to 10% RF)	90 ns Max



GPIOポート



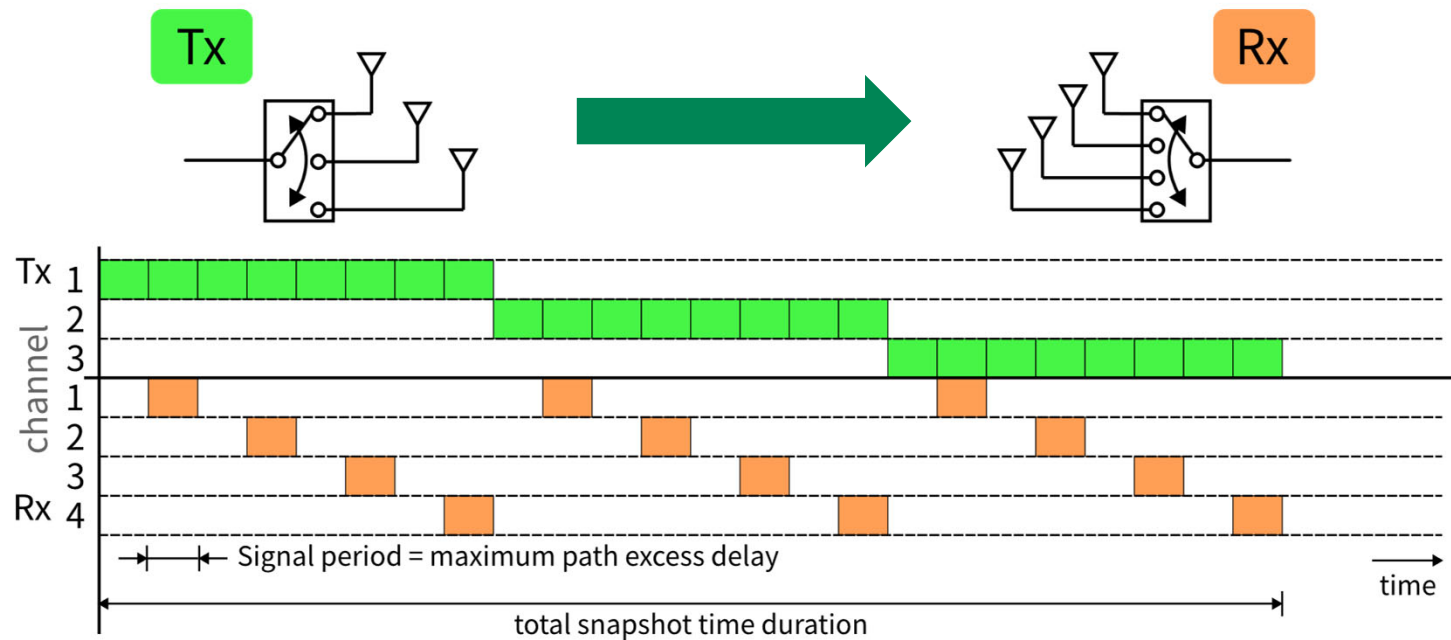
スイッチ外観

送受信シーケンス



■ アンテナスイッチング

- 信号を2回送信→後半1信号を受信

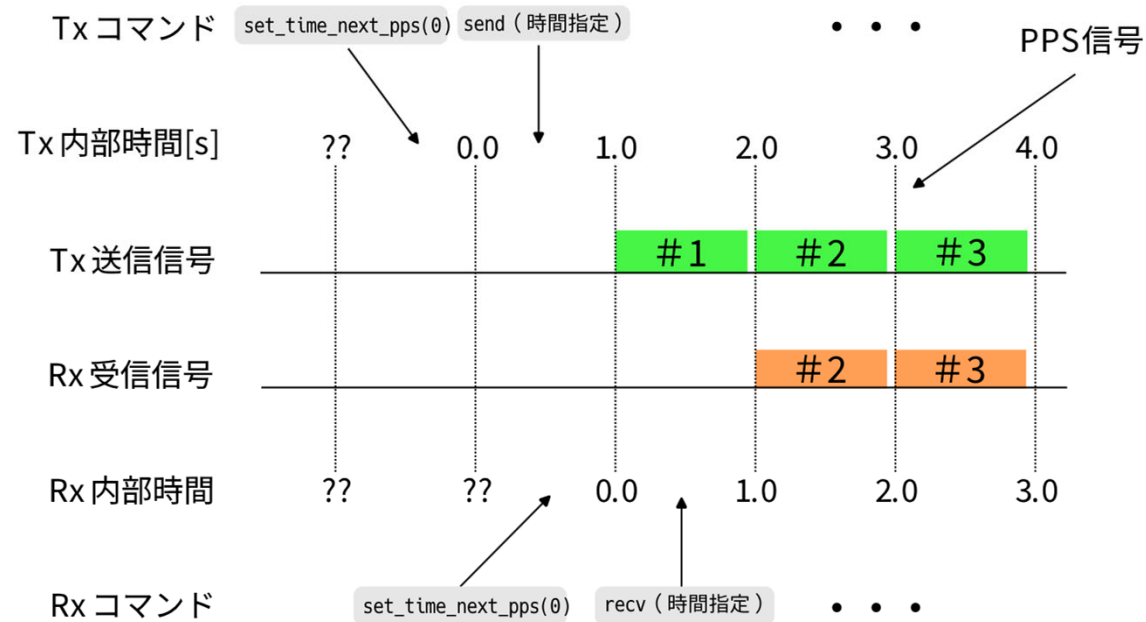


- 信号長：1.28 μs (256 samples / 200Msps)
- 8×8MIMOチャネル測定にかかる時間：164 μs ($=1.28 \mu\text{s} \times 2 \times 8 \times 8$)

送受信タイミング同期



- USRP間の送受信タイミング同期のためにPPS信号を利用
 - PPS信号：周期1秒のパルス信号（USRP内部GPSDOで生成）
 - 送信機と受信機でPPS信号・Clock信号を共有
 - PPSに合わせてUSRP内部時間を設定
 - Tx-Rx間で内部時間の小数点以下が同期



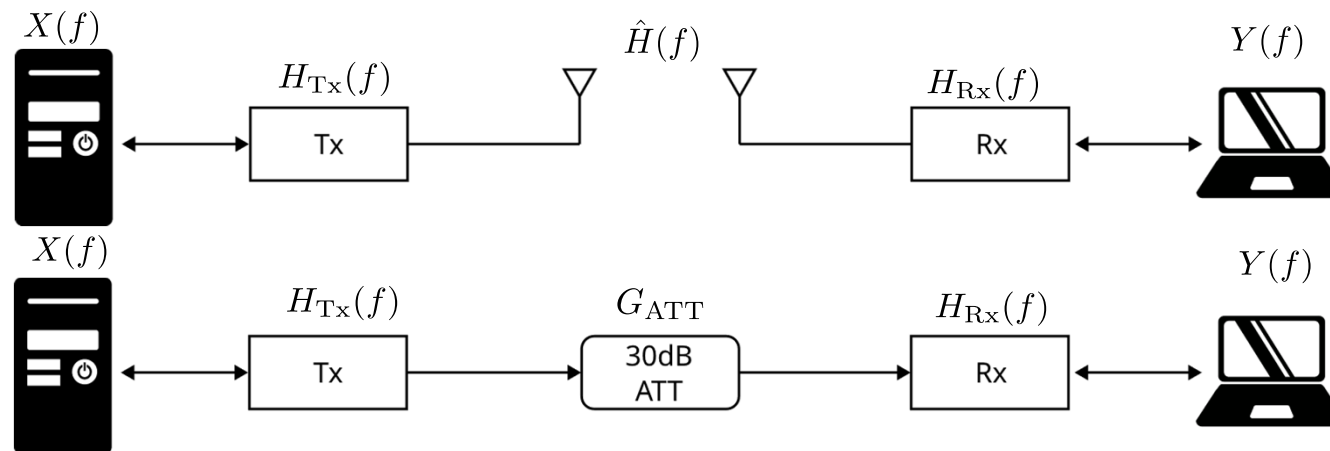
例：1秒ごとに送受信を行う場合

Back-to-back キャリブレーション



■ Back-to-back校正

- 正確な伝搬路測定のために無線機のハードウェア特性を除去
- 送信機と受信機を減衰器・ケーブルを介して直接接続
- 送受信信号から回路の伝搬特性を測定・逆特性を掛け合わせて校正



$$\hat{Y}(f) = X(f)H_{Tx}(f)\hat{H}(f)H_{Rx}(f)$$

$$Y_{BtB}(f) = X(f)H_{Tx}(f)G_{ATT}H_{Rx}(f)$$

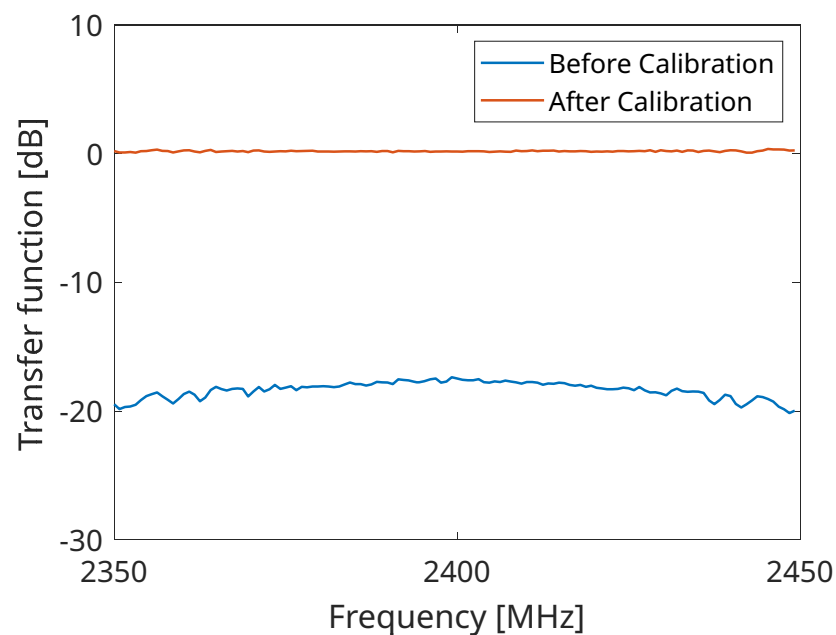
$$\hat{H}(f) = \frac{\hat{Y}(f)}{Y_{BtB}(f)}G_{ATT}$$

$\hat{Y}(f)$	受信信号
$Y_{BtB}(f)$	受信信号（校正用）
G_{ATT}	減衰器
$\hat{H}(f)$	ハードウェア特性を除去した伝達関数

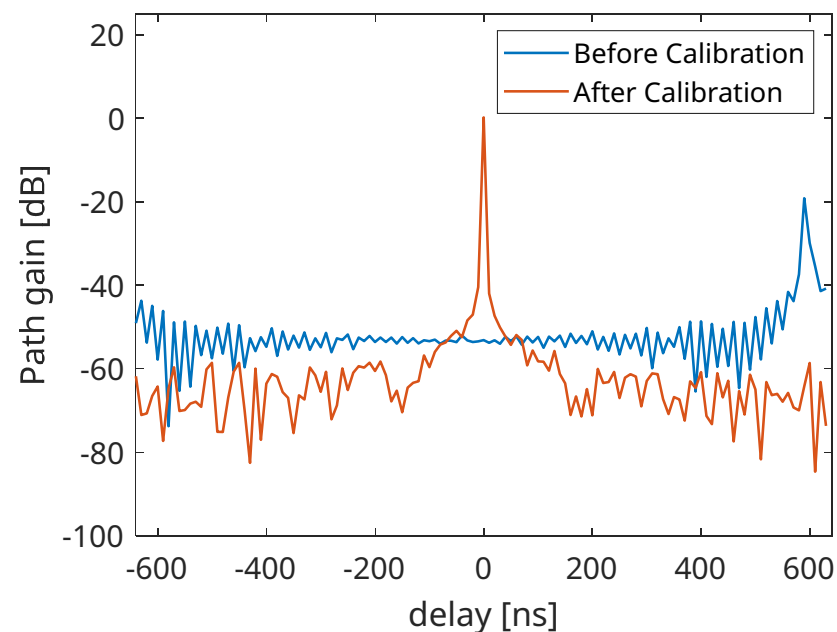
Back-to-back キャリブレーション（実験）

■ 校正前後の伝達関数・インパルス応答を比較

- 30 dB 減衰器を介して送受信機を直接接続
- 10回測定した平均をB2Bデータとして保存
- 同様のセットアップで測定した結果をB2Bデータでキャリブレーション



伝達関数



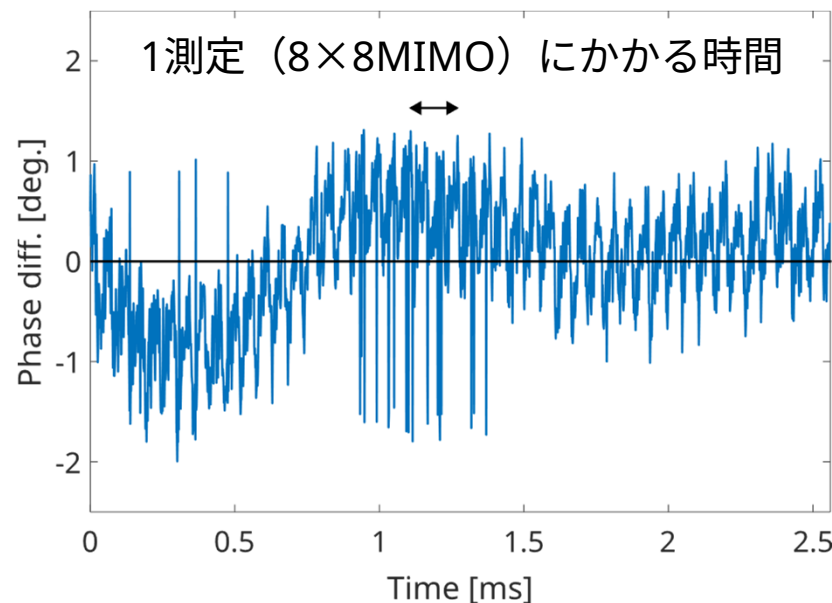
インパルス応答

■ スイッチング方式MIMOにおける位相変動

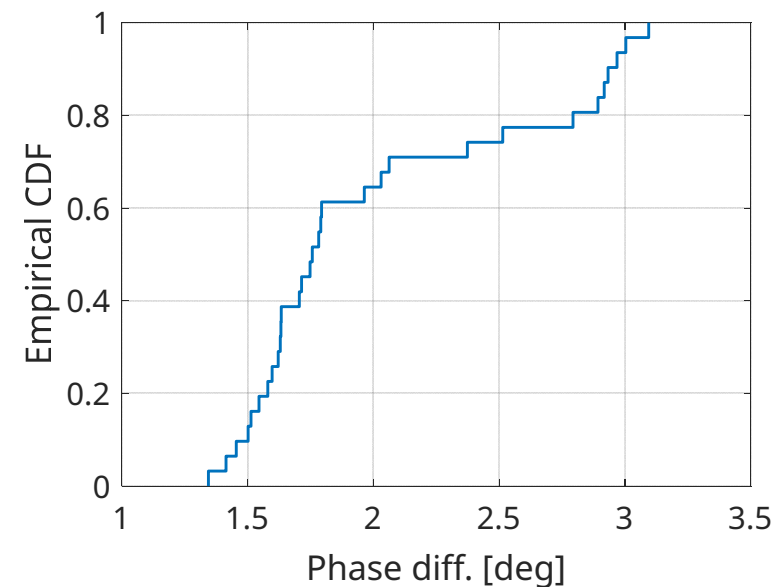
- 空間特性を正確に測定するためには素子間での相関特性が重要
- 全チャネルを測定する間の位相ドリフトが大きいと空間特性測定が困難に

■ 位相変動の測定

- 1信号256サンプルのNPM信号を送信し受信信号の位相を測定



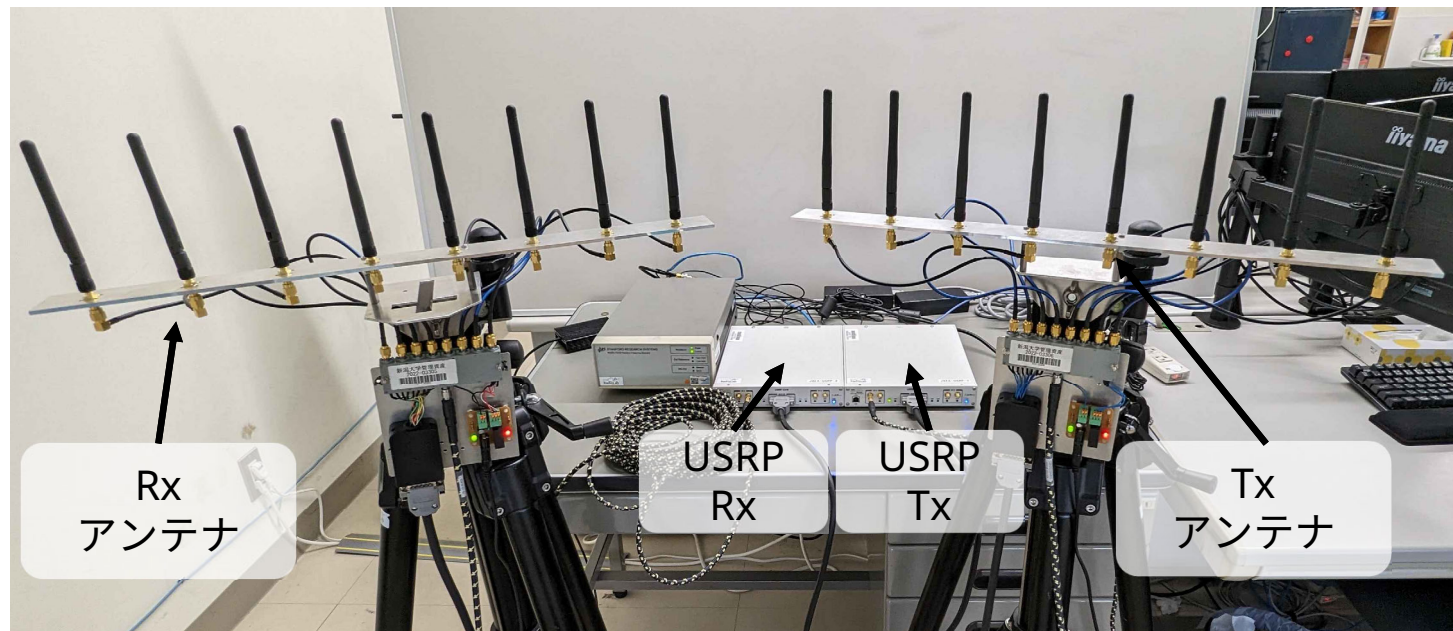
位相変動測定結果



1測定ごとの最大位相差

■ 放射角・到来角推定

- ビームフォーミングにより放射角・到来角を推定
- 無指向性スリーブアンテナを用いた8素子アレーアンテナ
 - ・ 半波長間隔で配置



測定系

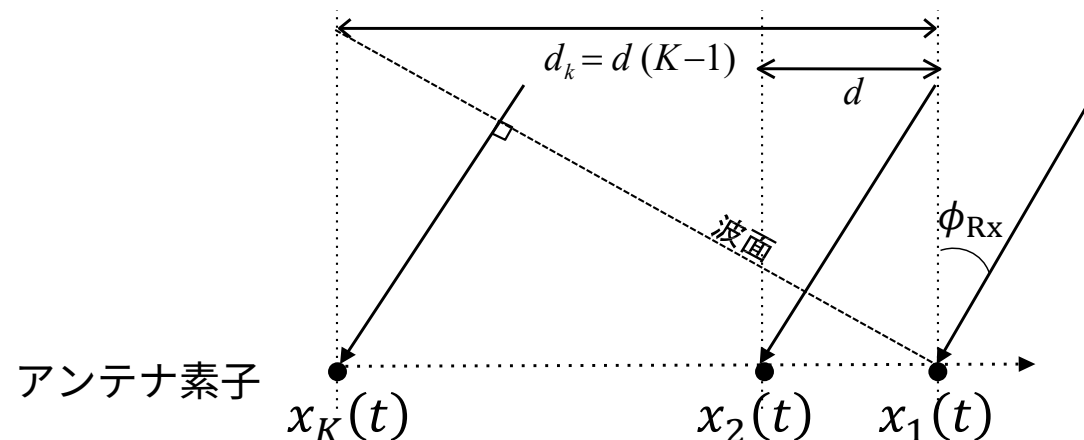
■ DDADPS（双角度遅延電力スペクトル）を導出

- 遅延時間方向に足し合わせてDDAPS（双角度電力スペクトルを取得）

$$\text{DDADPS}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \underbrace{\mathbf{w}_R^H(\phi_{Rx})}_{\text{受信BF}} \underbrace{\mathbf{h}(\tau)}_{\text{MIMO チャンネル行列}} \underbrace{\mathbf{w}_T^*(\phi_{Tx})}_{\text{送信BF}}$$

$$\mathbf{w}_T(\phi_{Tx}) = \left[1, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_{Tx}\right), \dots, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} (K-1) \sin \phi_{Tx}\right) \right]^T$$

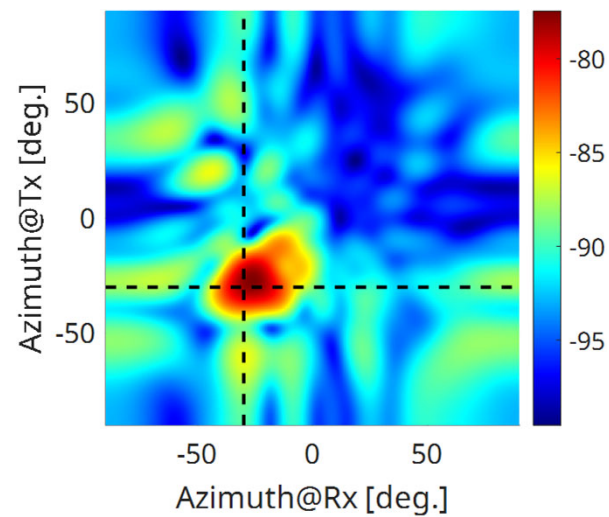
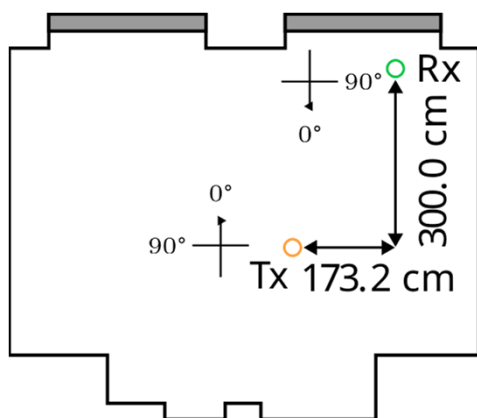
$$\mathbf{w}_R(\phi_{Rx}) = \left[1, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_{Rx}\right), \dots, \exp\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} (K-1) \sin \phi_{Rx}\right) \right]^T$$



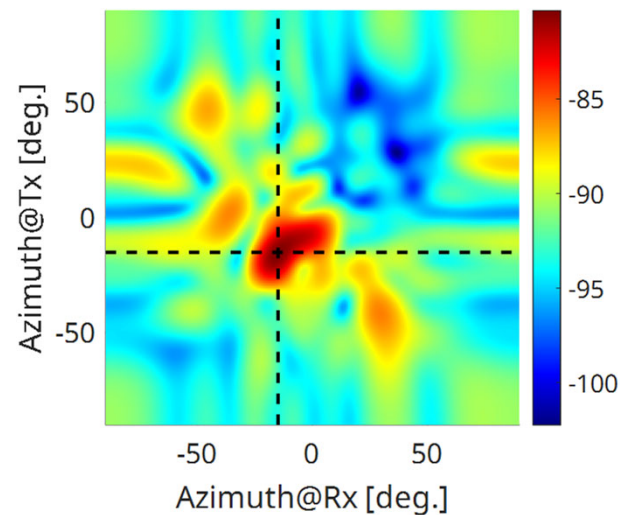
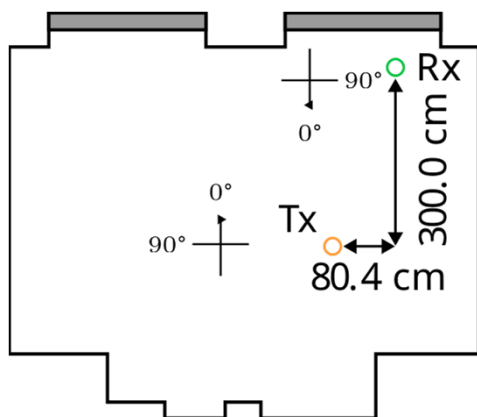
評価 | 空間特性測定



■ 測定結果 (-30°)



■ 測定結果 (-15°)

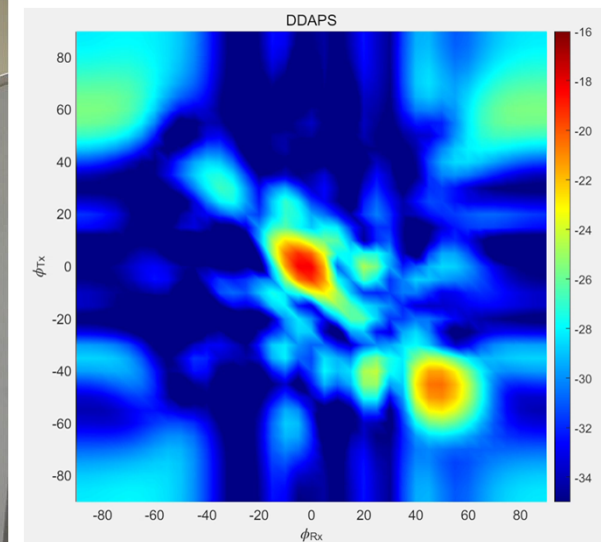
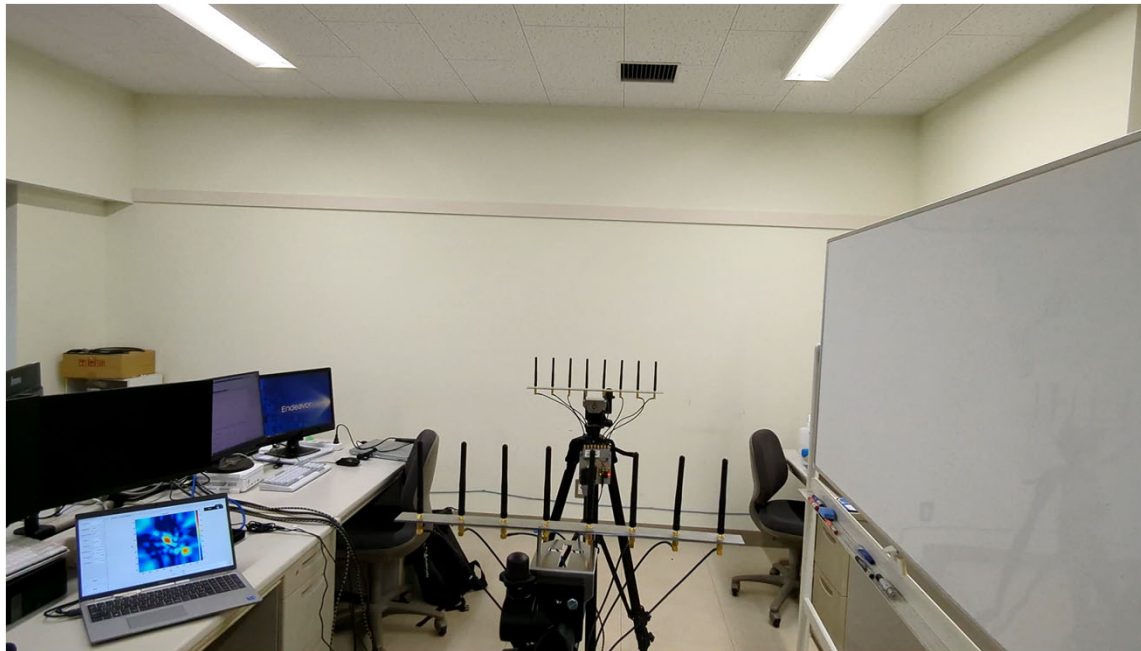


評価 | 空間特性測定



■ 遮蔽による電力減衰を確認

- 直接波 15 dB
- 反射波 8 dB 程度の減衰

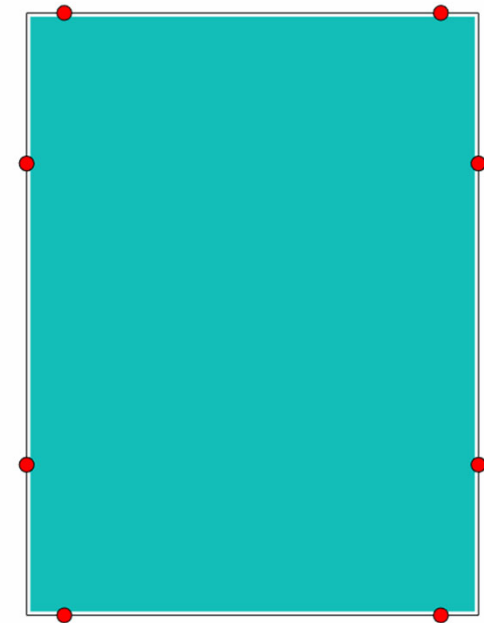


マルチリンクMIMOへの拡張



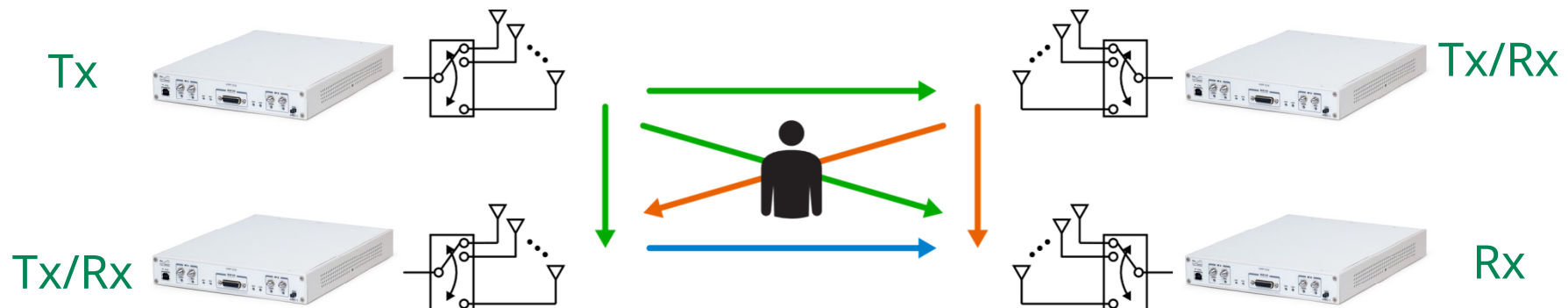
■ 多重波RTI法

- 多重波伝搬を用いた屋内測位法
- 遮蔽による多重波経路の受信電力変化を利用
- 複数のMIMOセンサを部屋に配置し送受信角・遅延時間をもとに多重波経路の受信電力を測定



■ マルチリンクMIMO

- 複数のサウンダの送受信機を適宜切り替え
- 複数リンクのMIMOチャネルを短時間で取得



■ 目的

- ソフトウェア無線機を用いたチャネルサウンダの開発
- アンテナスイッチング方式によるMIMO測定の実現

■ 実施内容

- UHD C++ APIを用いた測定プログラムの開発
- RFスイッチとGPIO制御によるアンテナスイッチングの実現
- 各種性能評価・放射角到来角推定・遮蔽損失の確認

■ 今後の予定

- マルチリンクMIMOの実現
 - ・ 複数台のUSRPの連携・送受信切替の実現
 - ・ 多重波RTI法への適用

■ スイッチング動作の検証

- 直流信号を送信
- スイッチングを行い1536サンプル (Rx1~3) 取得
- Rx 2 のみTxと接続
- 50~90サンプル (250~450 ns) の遅延
 - 256サンプル以上の遅延はなし

