

マルチリンク8×8MIMOチャネル測定系の 構築と評価実験

Multi-Link 8 × 8 MIMO Channel Measurement System
Construction and Evaluation Experiment

2023年12月14日

IEICE TC-AP@機械振興会館

○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

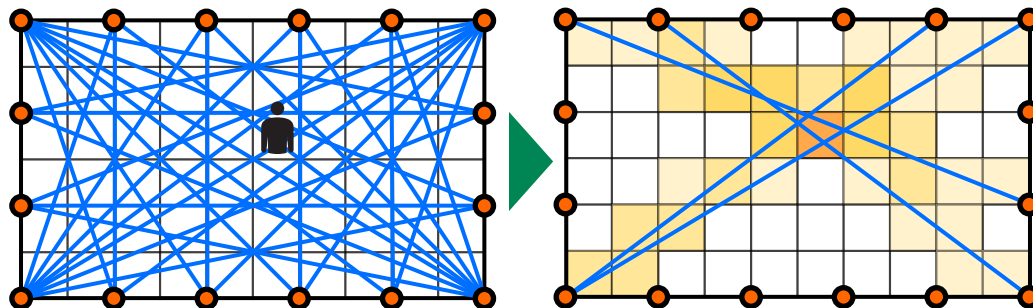


■ パッシブ型屋内測位の需要

- スマートホームへの利用
- GPSの届かない原子炉建屋内でのロボット・作業員の位置推定

■ 電波トモグラフィーイメージング法

- Radio Tomographic Imaging: RTI法
- 対象エリアに複数のアンカーノードを配置
- 遮蔽による受信電力（RSS）の変化から人の位置を画像化

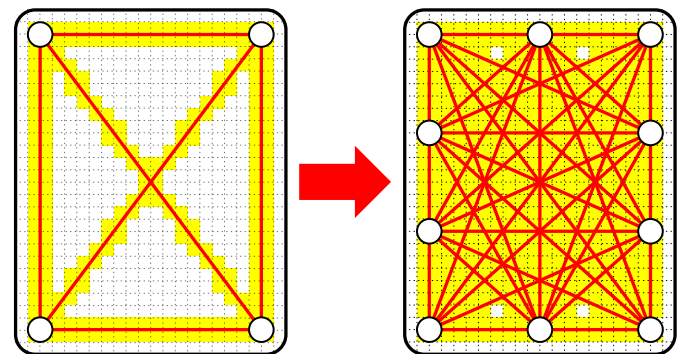


多重波RTI法



■ 従来のRTI法

- 見通し線上の経路のみを仮定
 - 多重波環境では測位性能が劣化
 - 精度はノード数に依存

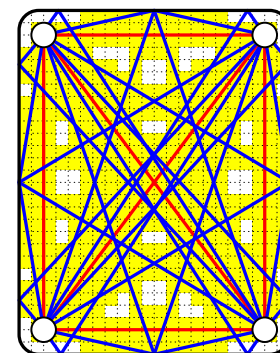


見通し経路のみ

エリアをカバーするためには
ノード数を増やす必要がある

■ 多重波RTI法^[1]

- 多重波を利用
 - ・ 多重波干渉を受けにくい
 - ・ ノード数の低減

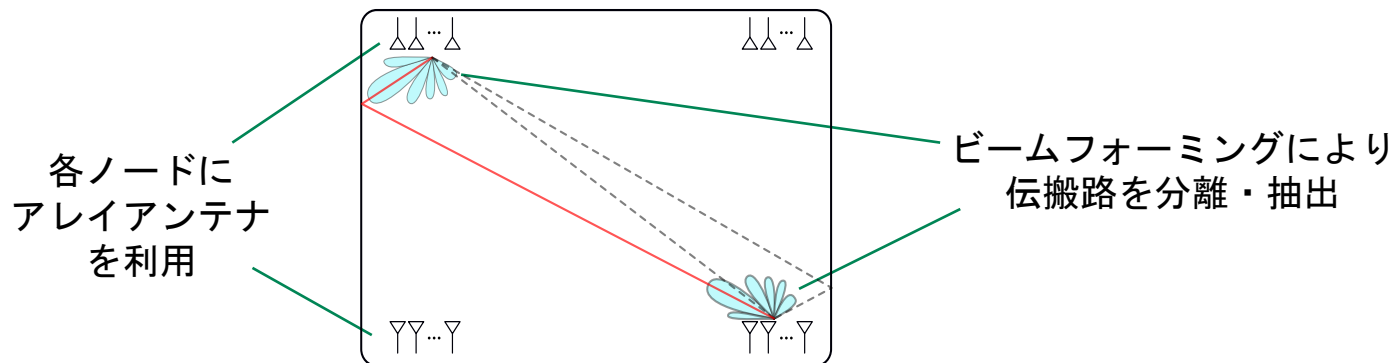


反射による経路も利用
少ないノード数で広いエリアをカバーできる

[1]Minseok Kim, Yuto Miyake, Togo Ikegami, Keiichiro Kumakura, Hibiki Tsukada, "Device-Free Localization Using Millimeter-Wave Double-Directional Channel Sounding Measurements," 2022 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Mar. 2022.

伝搬路の抽出

- 実在する多重波の伝搬路をどのように分離・抽出するかが課題
- 伝搬路抽出手法の検討
 - 伝搬路はレイトレーシングシミュレーションにより推定
 - 測定値を伝搬路ごとに分離・紐づけ
- マルチリンクMIMOシステム^[2]
 - マイクロ波帯狭帯域システム
 - 各アンカーノードにアレイアンテナを採用
 - ビームフォーミングによって多重波を分離・経路抽出

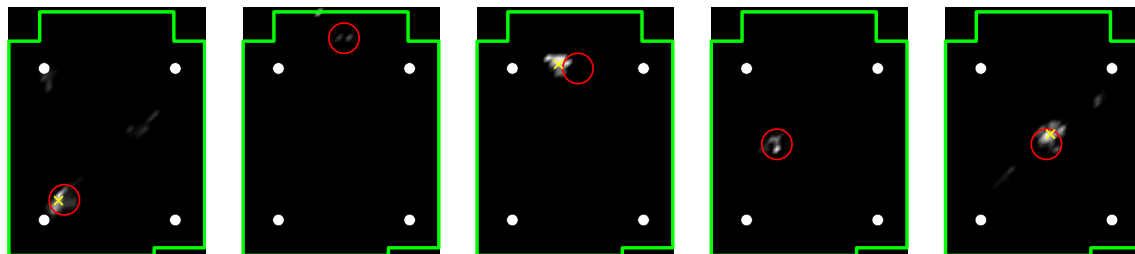
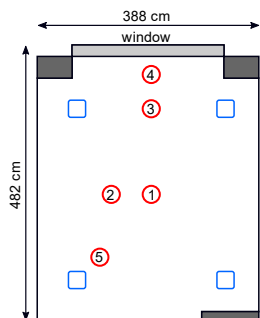


多重波RTI法の実験的検討



■ ミリ波を用いた実験

- 障害物のない部屋
- 半径0.3mの電波吸収体を人体モデルとして設置
- Tx・Rxの位置を移動させながら全リンクを順に測定



■ ソフトウェア無線機（USRP）を用いた

Sub-6 GHz帯アンテナスイッチング方式MIMOチャネルサウンダを開発^[2]

➤ 開発した系を拡張

複数台のサウンダを用いて短時間マルチリンク測定を目指す

[2] 池上十五, 金ミンソク, “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,” 信学技報, vol. 123, no. 103, AP2023-30, pp. 1-6, 2023年7月.

サウнда概要



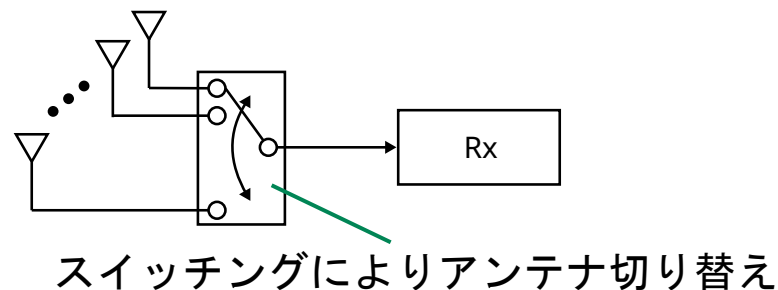
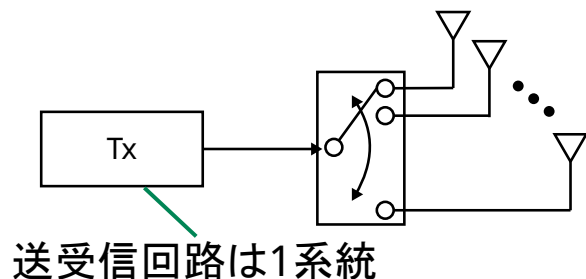
■ USRP (Universal Software Radio Peripheral)

- 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
- ドーターボードの差し替えで様々な周波数帯に対応
- USRP X310
 - UBX-160 ドーターボードを使用



■ アンテナスイッチング方式

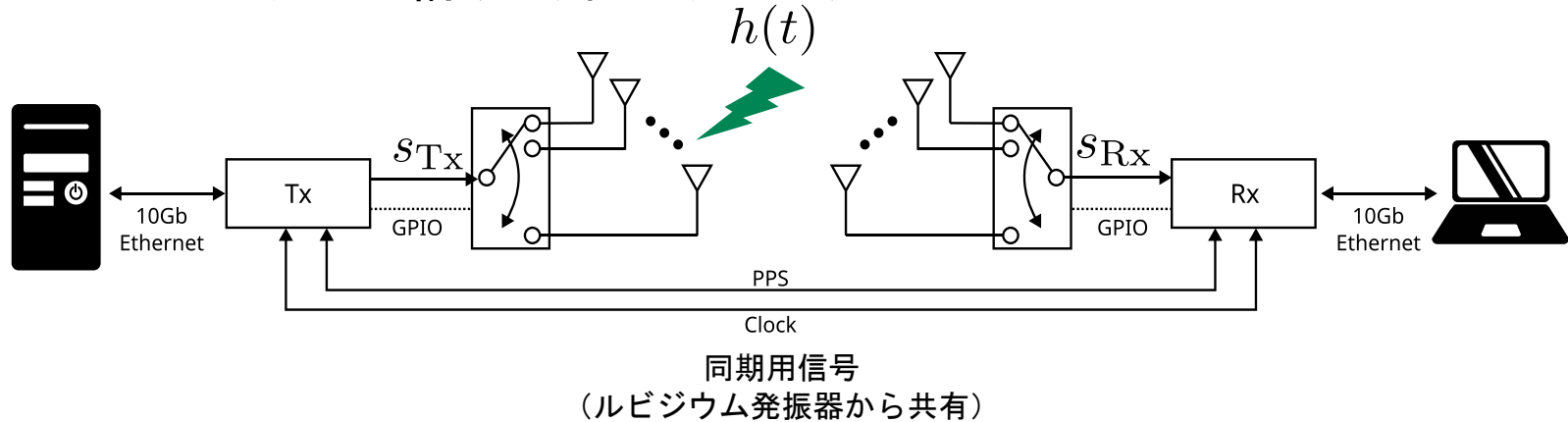
- 複数の送受信アンテナをスイッチにより切り替えて使用



サウンド構成



■ MIMOサウンド構成（単一リンク）



■ 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

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

サウンド概要



■ 各種パラメータ

項目	仕様	項目	仕様
搬送波周波数	4.85001 GHz	副搬送波間隔	781.25 kHz
サンプリング周波数	200 MHz	シンボル長	1.28 μ s
信号帯域幅	100 MHz	遅延時間分解能	10 ns
送信信号	ニューマン位相 マルチトーン信号	FFT点数	256
副搬送波数	128	送信電力	15 dBm (typ.)
		測定時間	164 μ s (8×8MIMO)

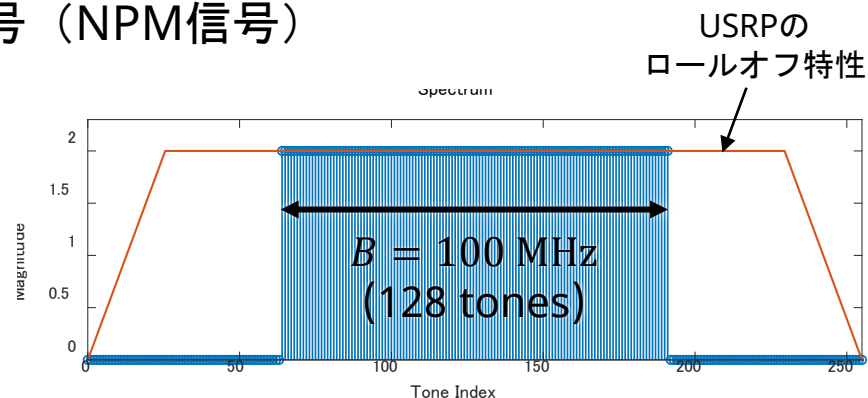
■ ニューマン位相マルチトーン信号 (NPM信号)

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

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

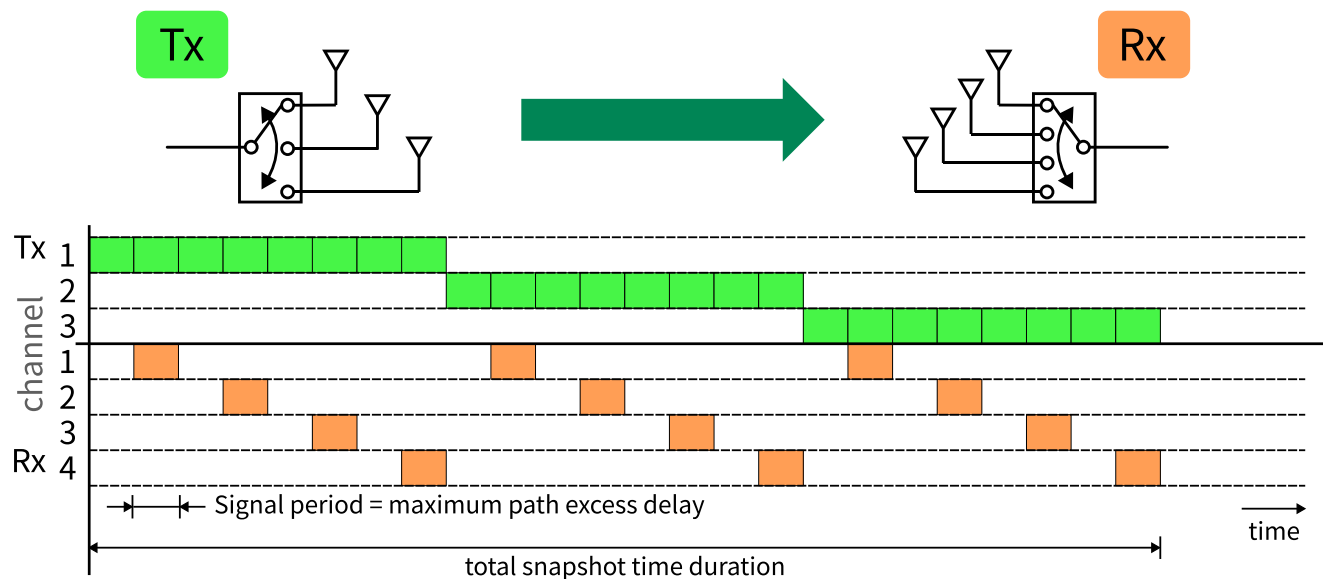


送受信シーケンス



■ 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

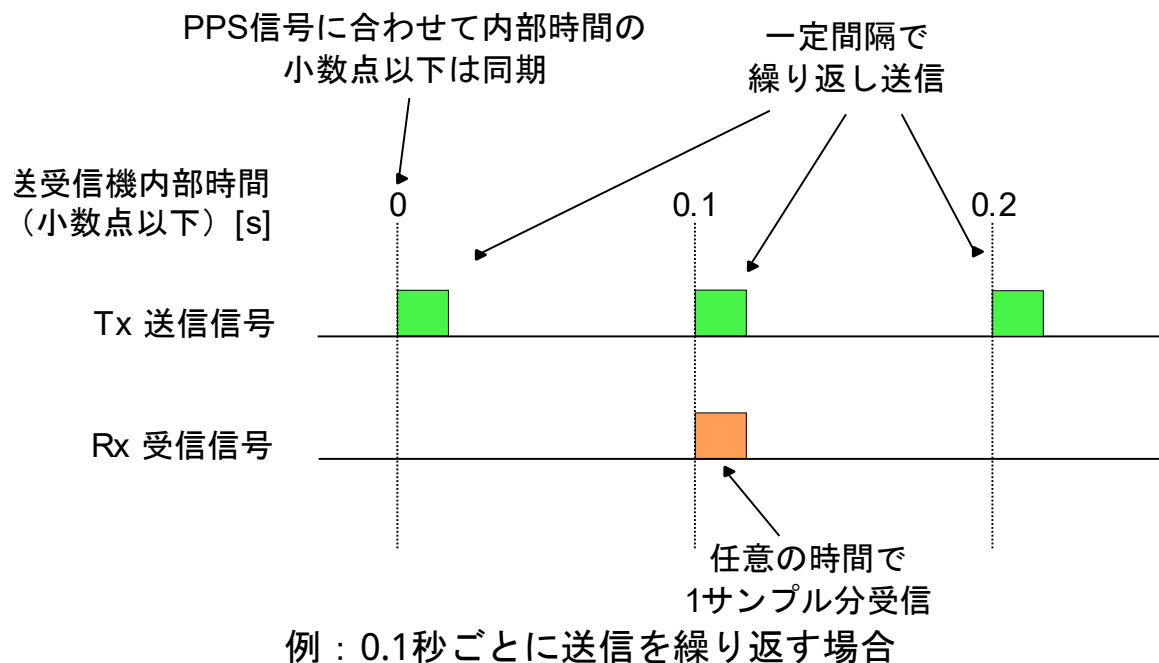


- 信号長 : $1.28 \mu\text{s}$ (256 samples / 200Msps)
- 8x8MIMOチャネル測定にかかる時間 : $164 \mu\text{s}$ ($=1.28 \mu\text{s} \times 2 \times 8 \times 8$)

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

- ルビジウム発振器からPPS（1秒周期のパルス）・10 MHz Ref. 信号を共有
- PPSに合わせてデバイス時間をすべてのUSRPで同期
- 送信は一定間隔でMIMO信号を送信
- 受信は送信周期に合わせて任意の時間で受信



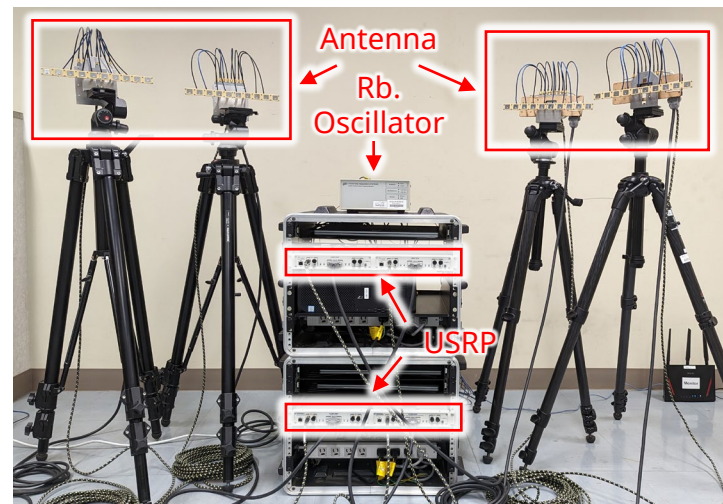
マルチリンク測定系

■ マルチリンク測定系への拡張

- 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

■ 開発した測定系

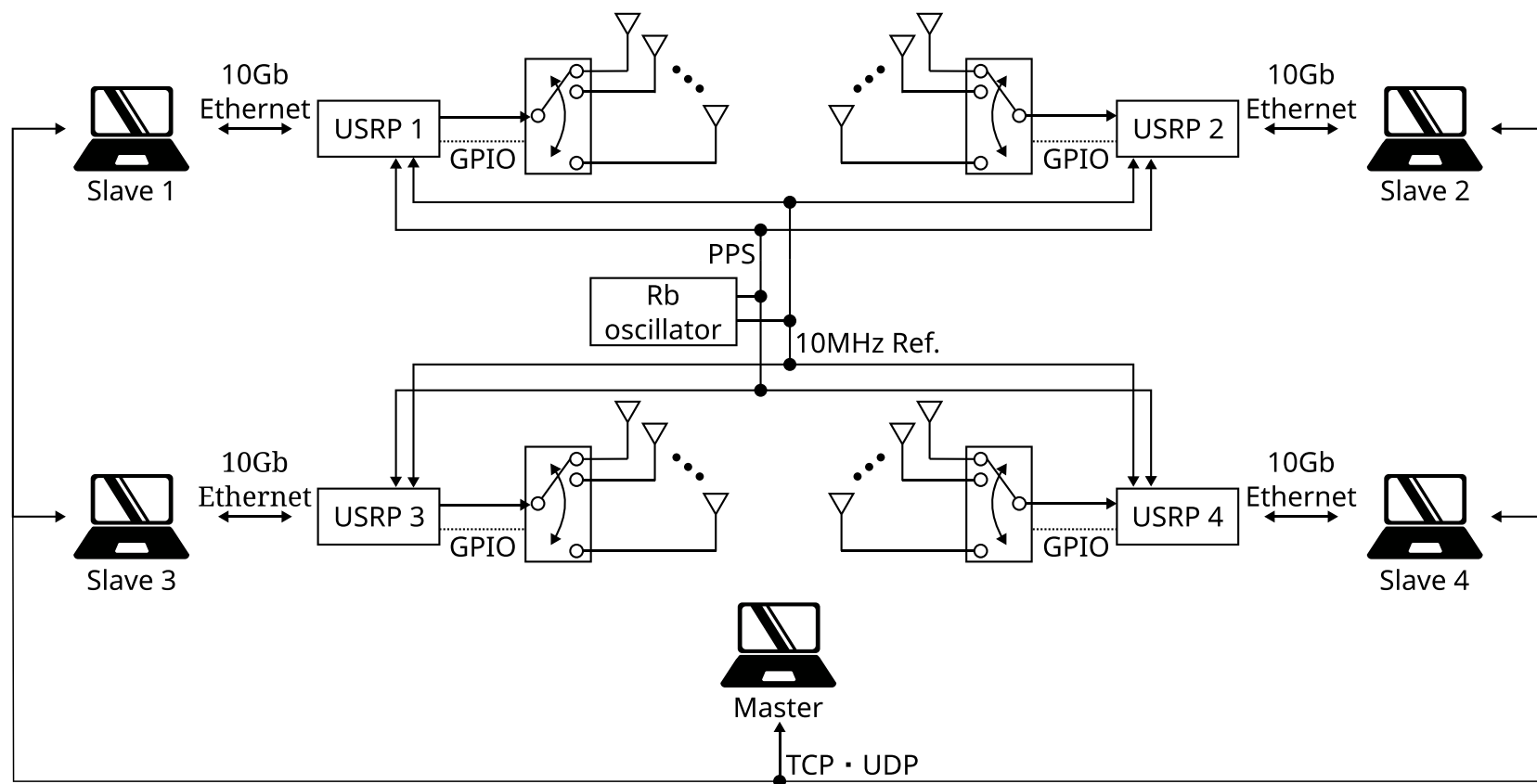
- 4ノード6リンク
- Master PC 1台とSlave PC 4台を使用
- Master PCからSlave PCへ送受信開始命令を順に送信
- 各Slave PCはUSRPを制御
- ルビジウム発振器を用いて全USRPを同期



マルチリンク測定系



■ ブロック図

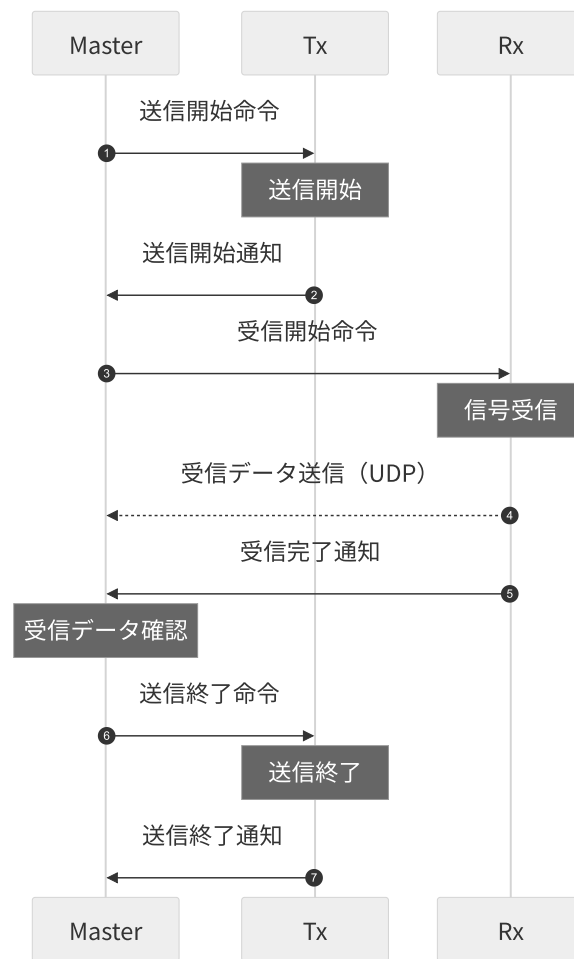
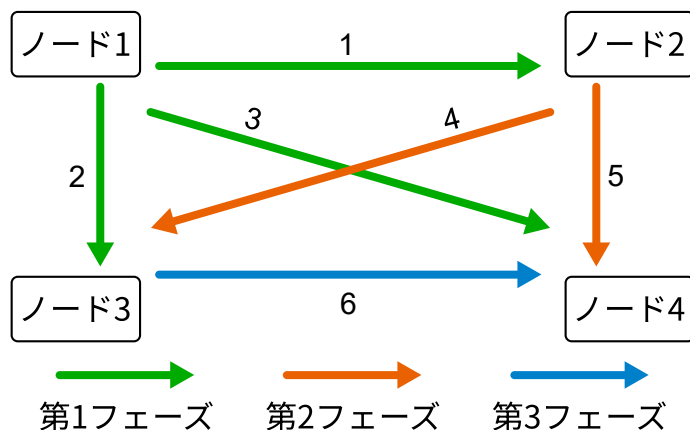


マルチリンク測定系



■ 測定シーケンス

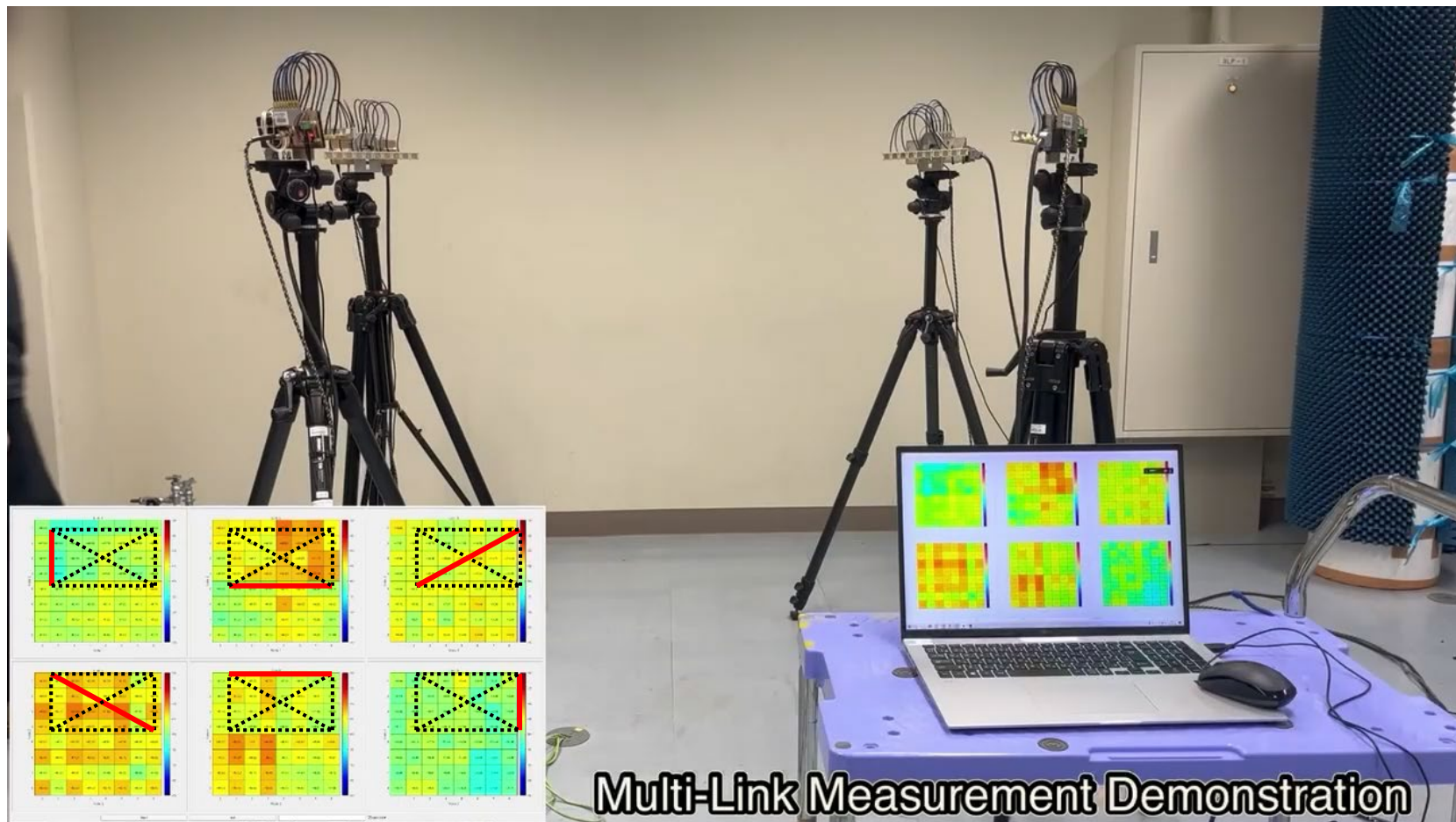
- 3段階に分けて6リンク測定
- Masterは各送受信命令発行後正常にプロセスが開始されたことを確認するまで待機
- 受信信号の保存方法は2通り
 - ・ UDPでMasterに集約
 - ・ 各Slave PCに保存
- 全リンク測定時間は 4 秒程度



動作のようす（単一リンク）



動作のようす（マルチリンク）



検証実験



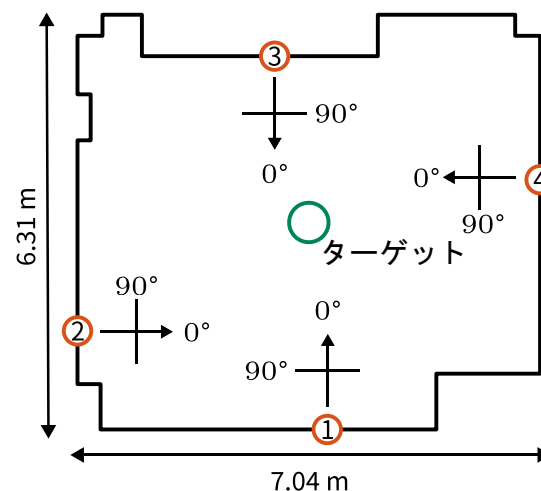
■ 伝搬実験を実施

- アンテナ高さに測位ターゲット以外の障害物のない部屋
- ターゲット（電波吸収体）あり・なしでそれぞれ測定
- 双方向角度電カスペクトル（DDAPS）を構築
- 多重波RTIを適用



アンテナ・ターゲット座標

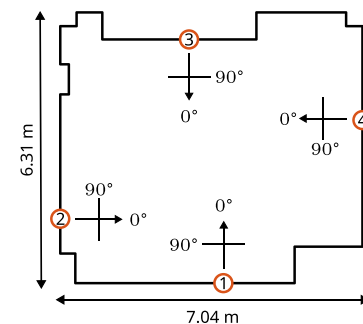
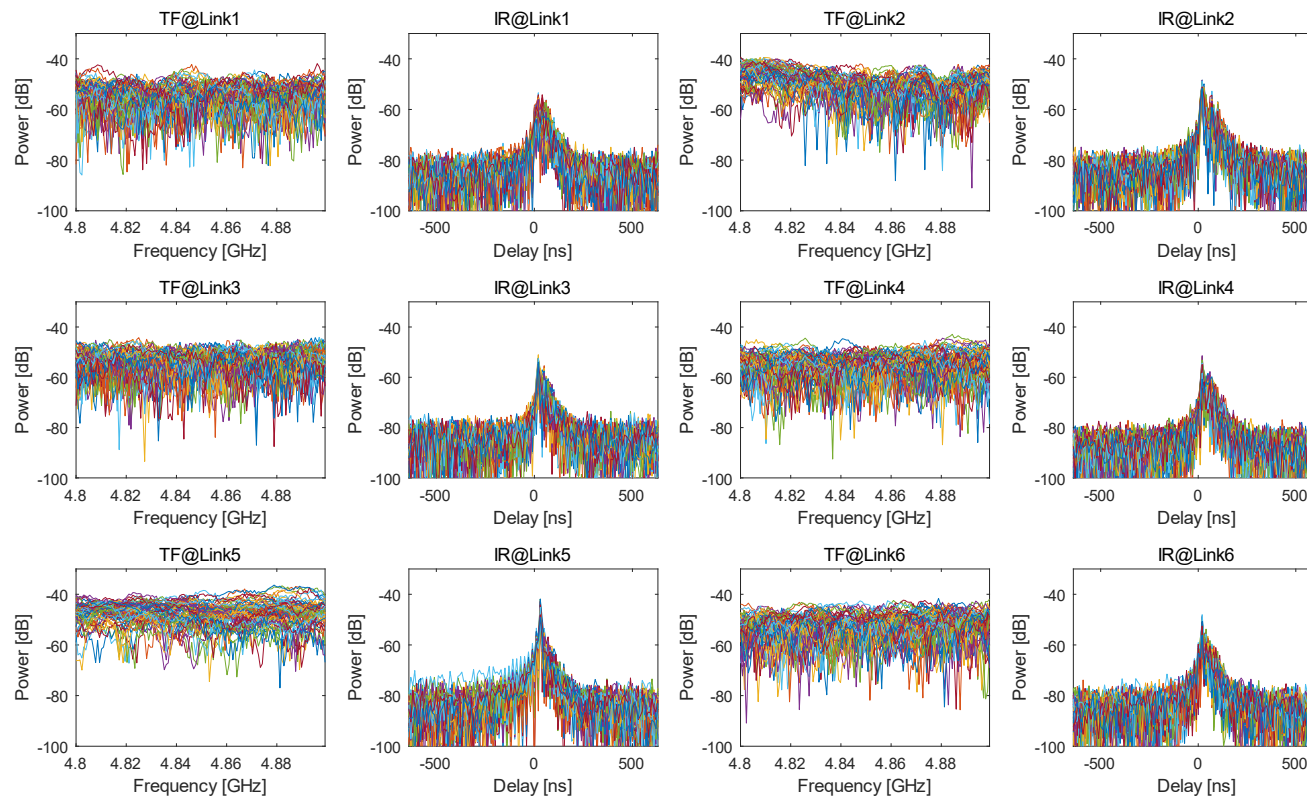
1	(3.8, 0)
2	(0, 1.5)
3	(3, 5.68)
4	(7.04, 3.8)
ターゲット	(3.52, 3.15)



結果（ターゲットなし）



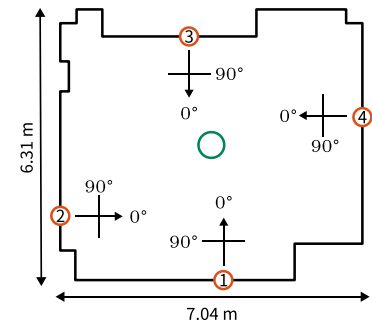
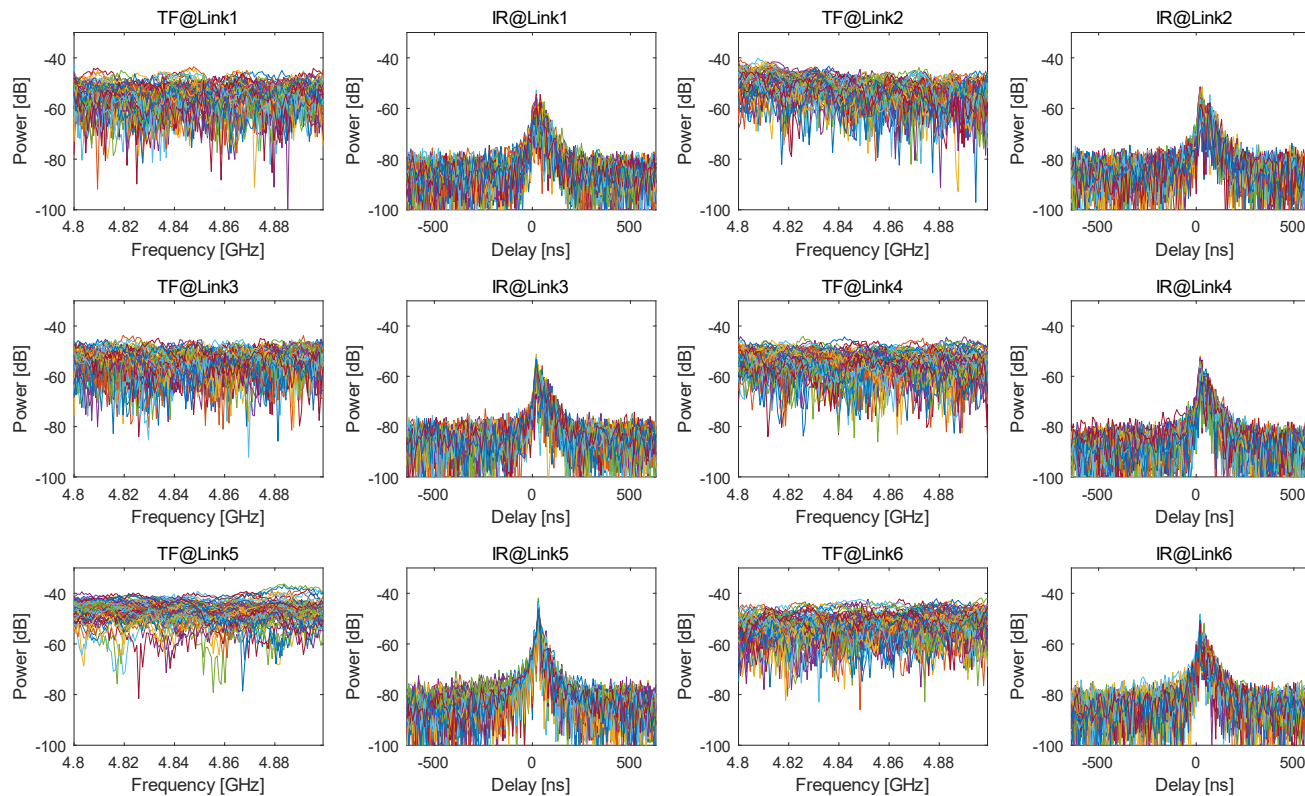
■ 各チャネルの伝達関数（TF）及びインパルス応答（IR）



結果（ターゲットあり）



■ 各チャネルの伝達関数（TF）及びインパルス応答（IR）

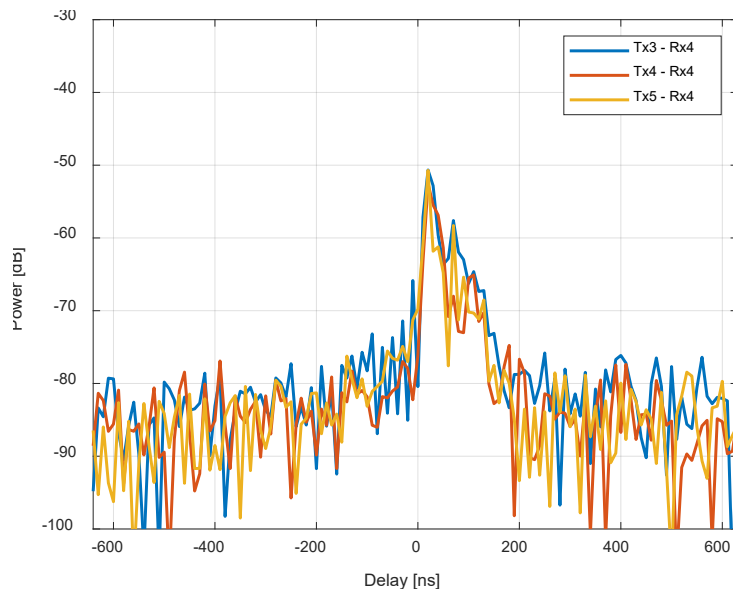
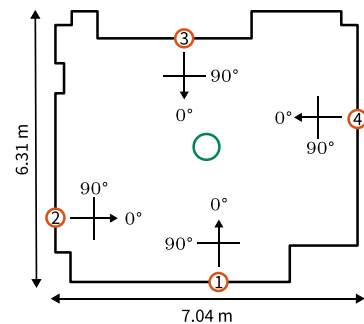


結果

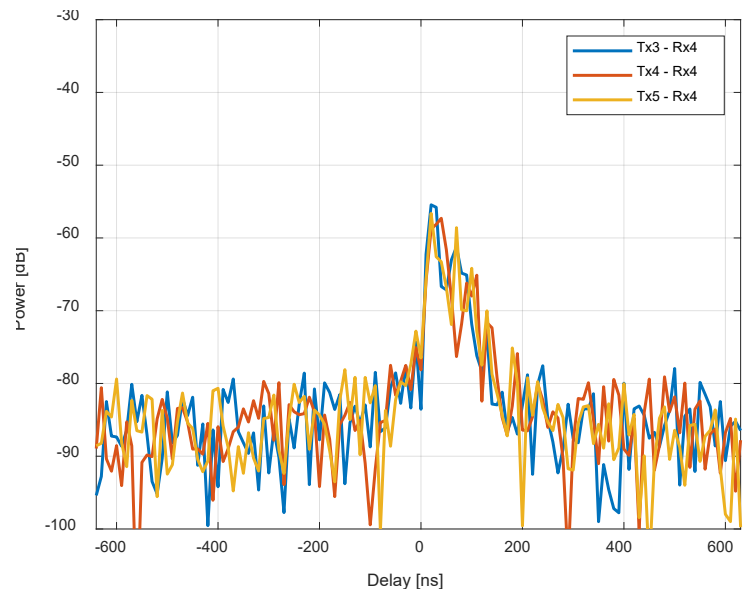


■ 一部チャネルを抜粋

- リンク 2 (ノード 1 - 3)
- ターゲットの遮蔽による受信電力の減衰を確認

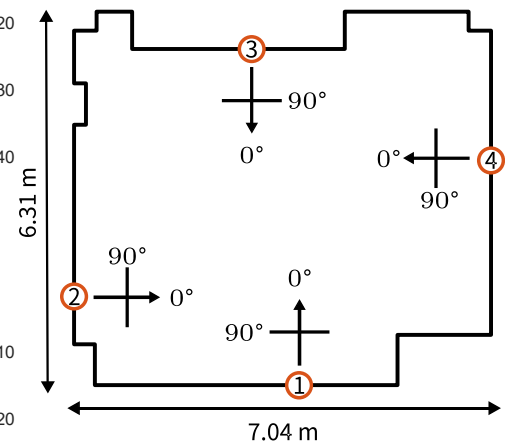
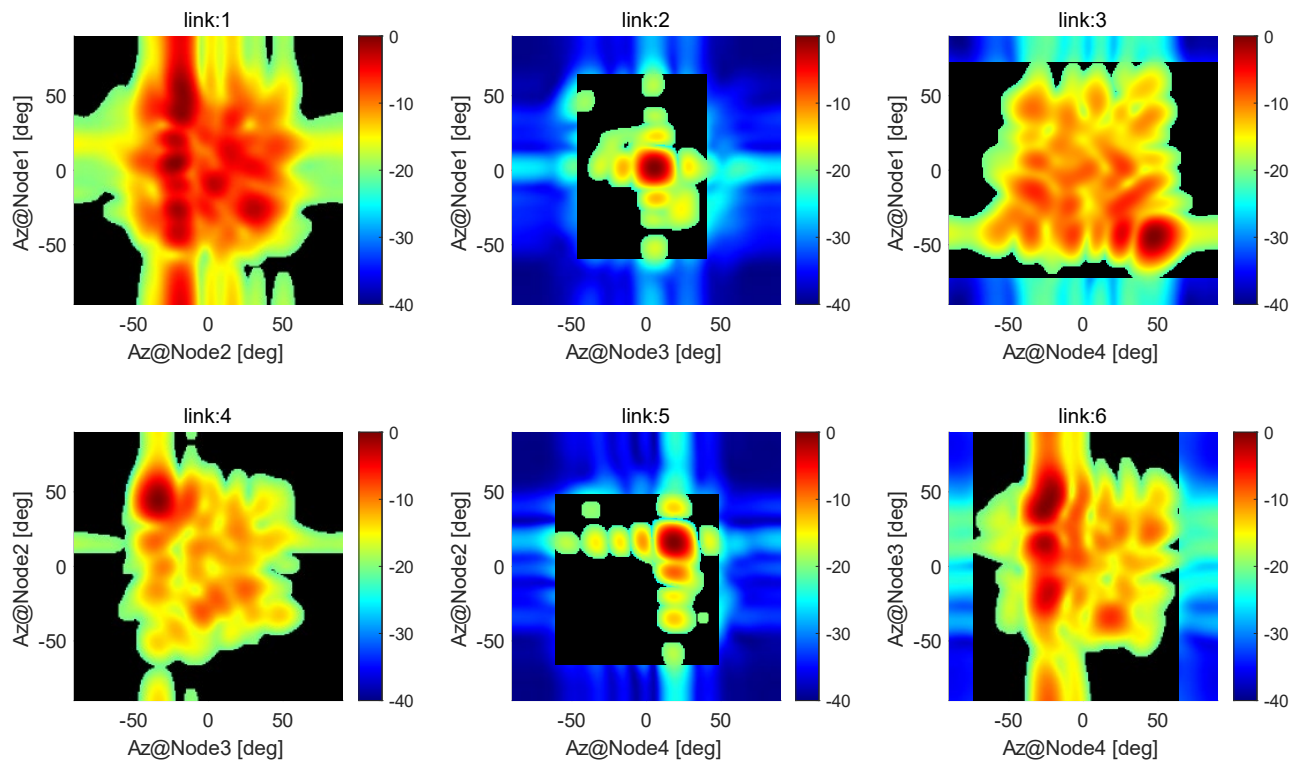


ターゲットなし

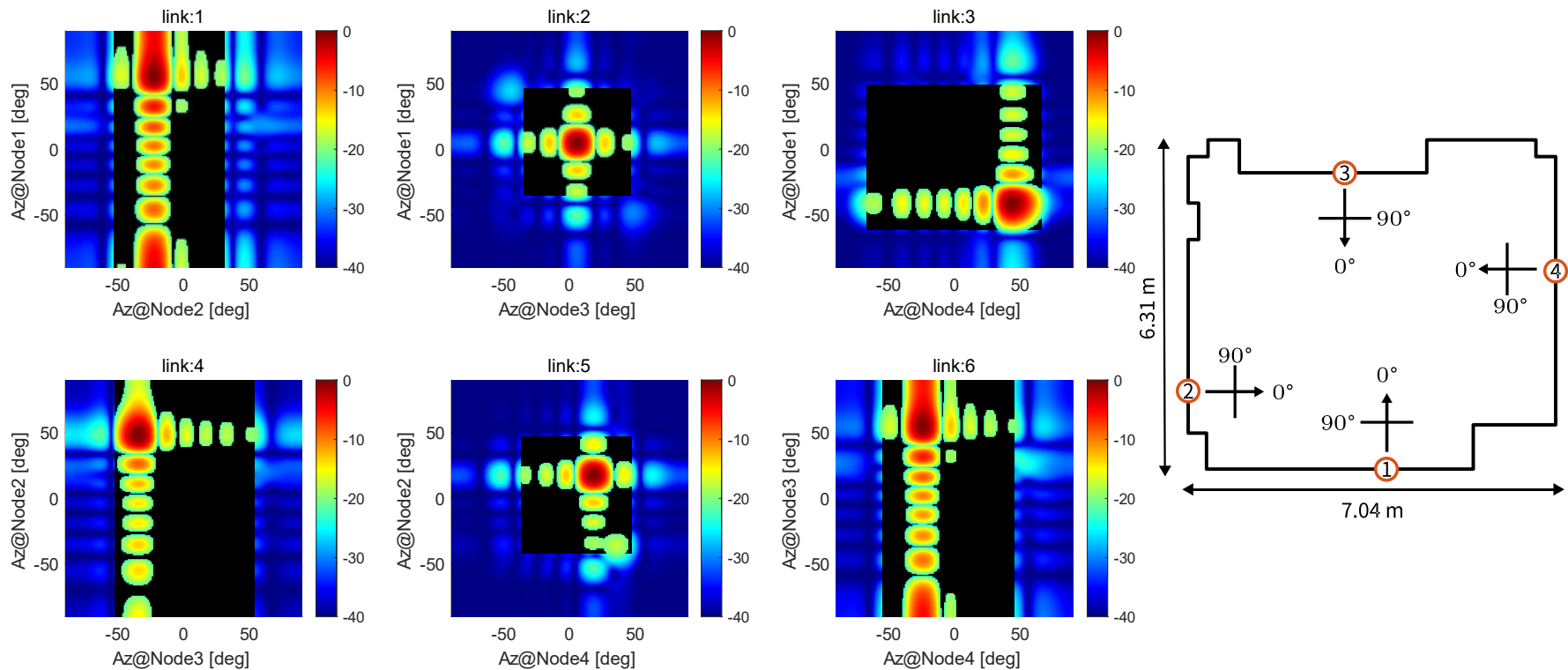


ターゲットあり

DDAPS (測定・ターゲットなし)



BF (シミュレーション)

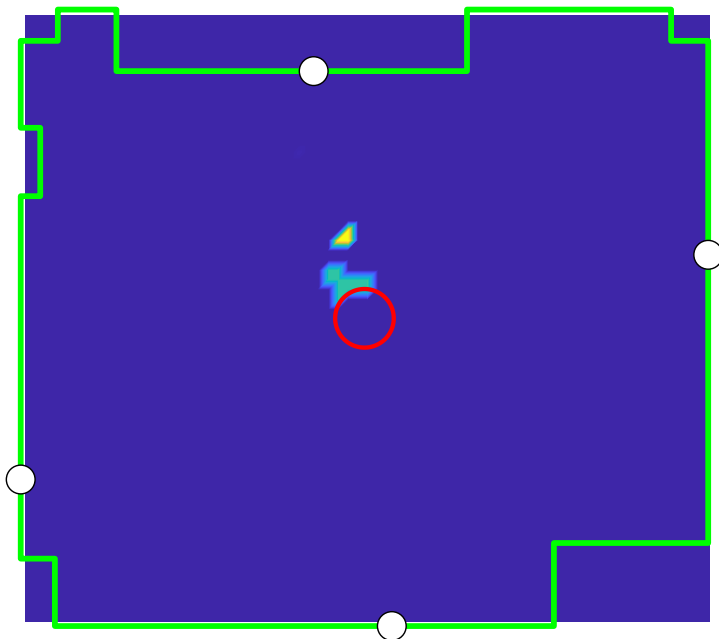


多重波RTI結果

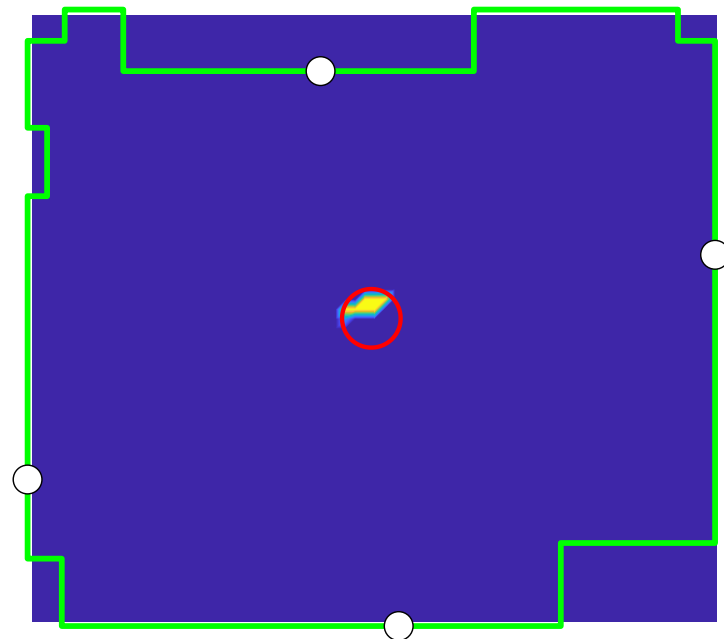


■ シミュレーション結果と実験結果を比較

- LoS を遮るため理想的な結果を得られた



シミュレーション結果



実験結果

まとめ



■ 実施内容

- マルチリンクMIMOチャネルサウンダの開発
 - ・ 複数のUSRPを連携し送受信を適宜切り替え
 - ・ 約4秒で4ノード6リンク測定
- 伝搬実験を実施
 - ・ 妥当性を確認
- ビームフォーミング・多重波RTIを適用
 - ・ 手法の有効性を確認

■ 今後の予定

- 測定時間の短縮
- 多重波RTIの精度向上

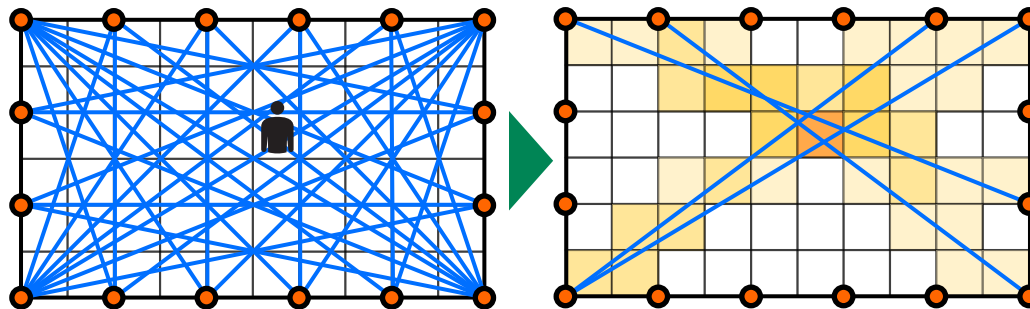
RTI法の原理

■ 概要

- 対象エリアに複数のアンカーノードを配置
- 遮蔽による受信電力（RSS）の変化から人の位置を画像化

■ 手順

1. 対象エリアを画素（voxel）として表す
2. 各ノード間経路（リンク）上の画素に重みづけ
3. 遮蔽物がない状況で各リンクのRSSを測定
4. 遮蔽物によるRSSの変化を測定（3.と比較）
5. 重みとRSS変化を合成し画素値を算出



観測データと画素値の変換

■ 観測行列 $\mathbf{y}$

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{n}$$

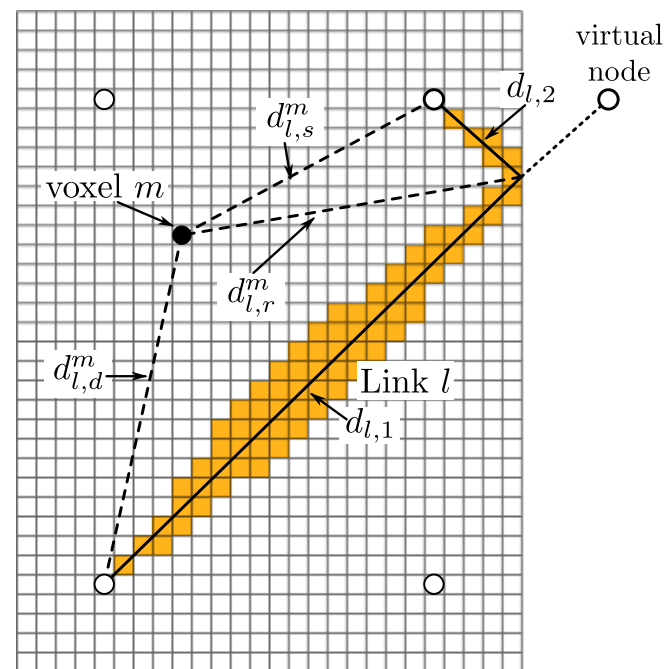
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N1} & \cdots & w_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix}$$

RSSベクトル 重みづけ行列 画素ベクトル ノイズベクトル

■ 重みづけ行列 $\mathbf{W}$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,s}^m + d_{l,d}^m < d_l + \gamma & \text{直接波} \\ 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,s}^m + d_{l,r}^m < d_{l,1} + \gamma & \text{1回反射} \\ 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,r}^m + d_{l,d}^m < d_{l,2} + \gamma & \text{1回反射} \\ 0, & \text{elsewhere} & \end{cases}$$

(2回反射は省略)



- 楕円パラメータ γ : 重みづけを行う範囲を決定

観測データと画素値の変換

■ 画素ベクトルの導出

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_0) = \mathbf{W} \Delta \mathbf{x}$$

事前に測定したRSS（遮蔽物なし）

- 重みづけ行列 $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{N \times M}$ は逆行列が存在しない
 - 1つの解 $\Delta \mathbf{x}$ を求めることはできない（不良設定問題）
 - 推定解 $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ を求める → 正則化

■ Elastic Net

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{W}\mathbf{x} - \Delta \mathbf{y}\|_2^2 + \lambda P_{\alpha}(\mathbf{x}) \right\}$$

$$P_{\alpha}(\mathbf{x}) = \frac{(1 - \alpha)}{2} \|\mathbf{x}\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{x}\|_1$$

- λ : 正則化パラメータ
 - ・ 正則化の強度を制御
- α : L_2 正則化と L_1 正則化のバランスを $(0, 1]$ の区間で決定
 - ・ α が1に近いほど疎に

伝搬路の抽出

■ 各伝搬経路の受信電力変化

$$y(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \left| \underline{\mathbf{a}^H}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) \underline{\mathbf{h}} \right|^2$$

ステアリングベクトル MIMOチャネルベクトル

■ MIMOチャネルベクトル

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega})\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{C}^{K^2 N \times 1}$$

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\Omega}) = [\mathbf{a}(\Omega_1), \dots, \mathbf{a}(\Omega_L)] \in \mathbb{C}^{K^2 N \times L}$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = [\Gamma_1, \dots, \Gamma_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = [\Omega_1, \dots, \Omega_L] \in \mathbb{C}^{L \times 1}$$

$$\Omega_l = [\phi_{Tx,l}, \phi_{Rx,l}, \tau_l]$$

$$\mathbf{a}(\Omega_l) = \mathbf{a}_T(\phi_{Tx,l}) \otimes \mathbf{a}_R(\phi_{Rx,l}) \otimes \mathbf{a}_\tau(\tau_l)$$

$$\mathbf{w}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau) = \mathbf{a}(\phi_{Tx}, \phi_{Rx}, \tau)$$

$$\mathbf{a}_\tau(\tau) = [a_\tau(\tau_0 - \tau), \dots, a_\tau(\tau_{N-1} - \tau)]^T$$

$$a_\tau(\tau) = \frac{1}{N} \exp(-j\pi\Delta_f\tau) \frac{\sin \pi N \Delta_f \tau}{\sin \pi \Delta_f \tau}$$

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

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

$\boldsymbol{\Gamma}$: 複素受信信号

$\mathbf{A}$: レスポンスベクトル

L : リンク数

K : MIMOアンテナ素子数

d : MIMOアンテナ間隔

N : 遅延時間ビーム数

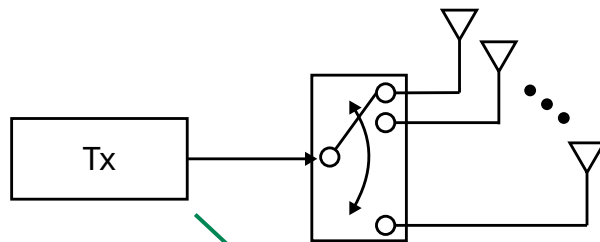
M : 対象リンクの伝搬経路数

研究背景 | 空間特性の取得

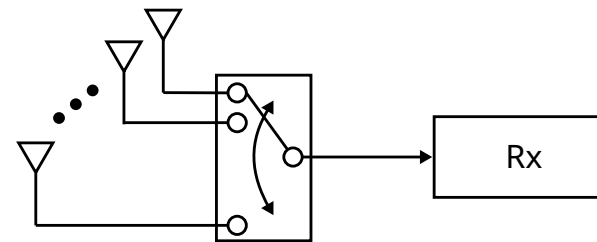


■ アンテナスイッチング方式

- 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

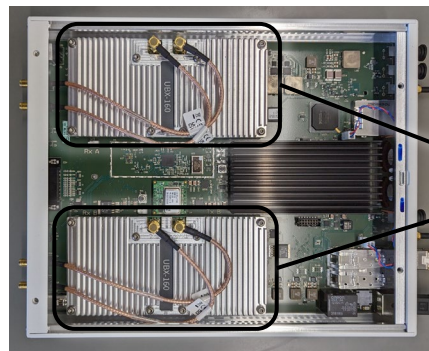
ソフトウェア無線機 | 概要

■ 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

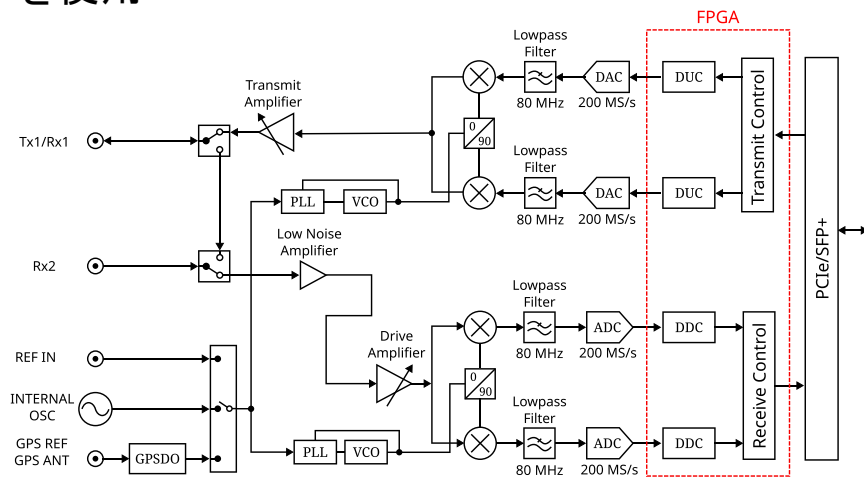


■ 本研究の構成

- 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



■ 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

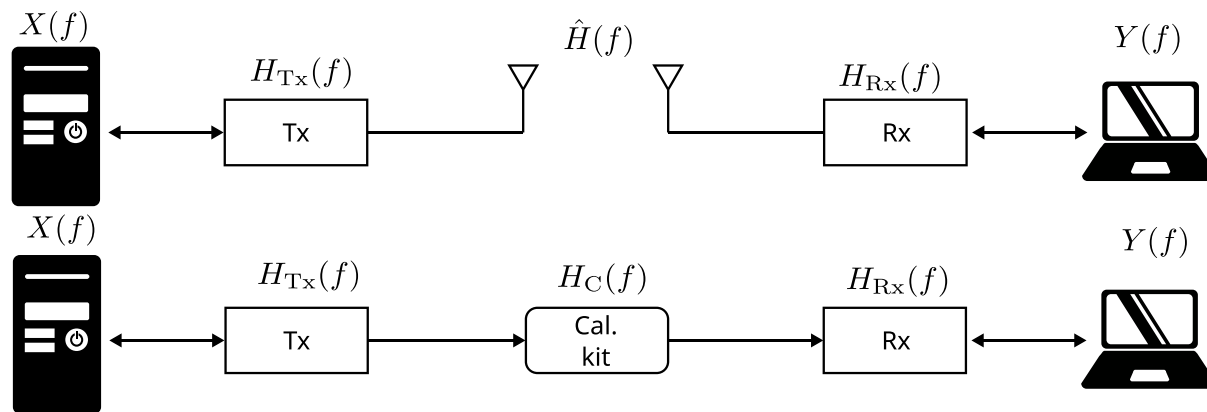


スイッチ外観

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



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

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

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

$\hat{Y}(f)$	受信信号
$Y_{BtB}(f)$	受信信号 (校正用)
$H_C(f)$	キャリブレーションキットの伝達関数
$\hat{H}(f)$	ハードウェア特性を除去した伝達関数