



電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会  
IEICE Technical Committee of Antennas and Propagation

# ソフトウェア無線機を用いた多目的マルチリンク MIMOチャネルサウンディングセンサネットワークの構築

Development of Versatile Multi-Link MIMO Channel Sounding Sensor  
Network Using Software-Defined Radios

2024年5月17日

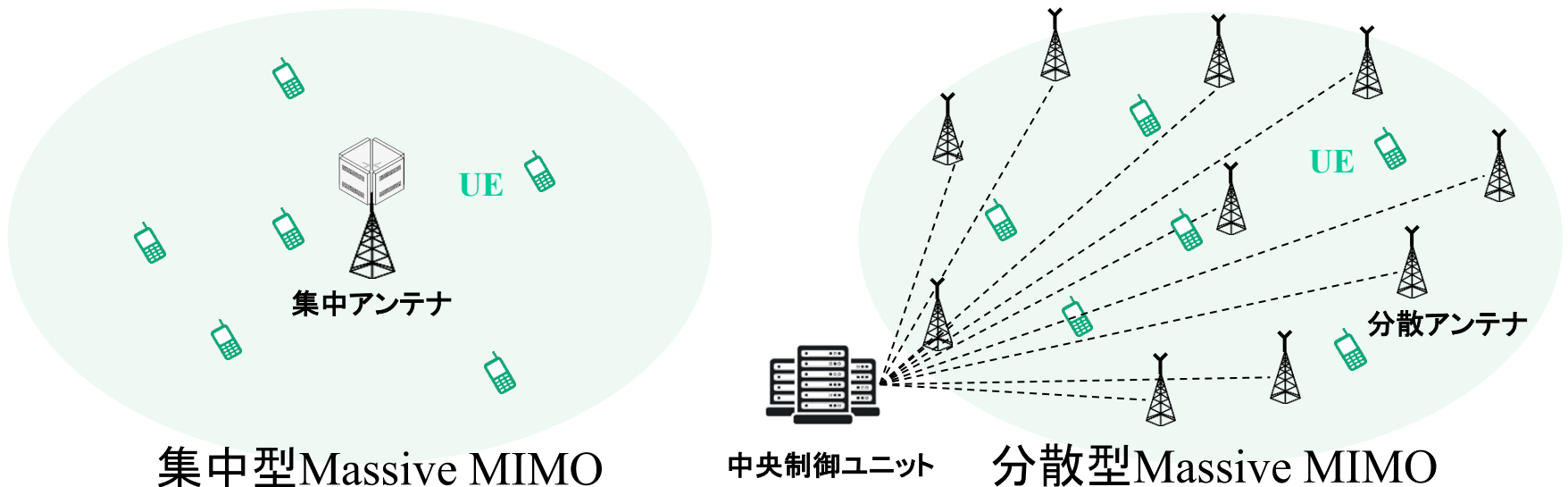
金 ミンソク, 池上 十五, 佐藤 正宗



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.

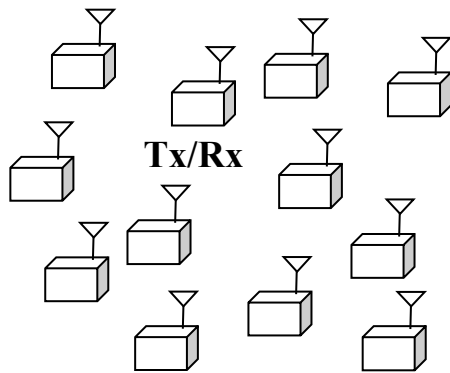
# 研究背景

- 分散型超多素子アンテナ技術
  - 分散型超多素子MIMO (Distributed massive MIMO)
  - セルフリー超多素子MIMO (Cell-free massive MIMO)
  - 測位とセンシング (Localization and Sensing)
- 期待される効果
  - DOF増加 → 通信容量増大
  - 分散配置 → ラージスケールフェージング対策・信頼性向上
  - ノード数増加 → 測位・センシングの精度向上



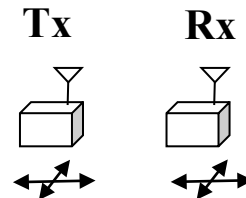
# 分散アンテナ間チャネル特性

- 分散アンテナシステムのシステム設計・評価に欠かせない
- 測定系の要求事項
  - 分散超多素子MIMO, マルチリンクMIMO
  - BS-UE間だけでなくBS間チャネル特性
  - 動特性 ⇒ 高速化
  - 拡張性 ⇒ 低コストのモジュール化
- アーキテクチャ



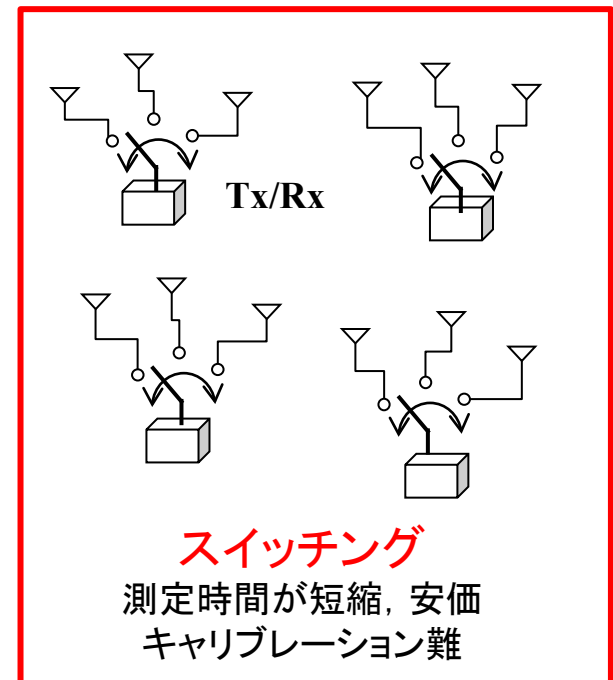
## フルMIMO

測定時間が短い, 高費用  
キャリブレーション難



## 仮想アレー

測定時間が長く非現実的  
キャリブレーションが容易



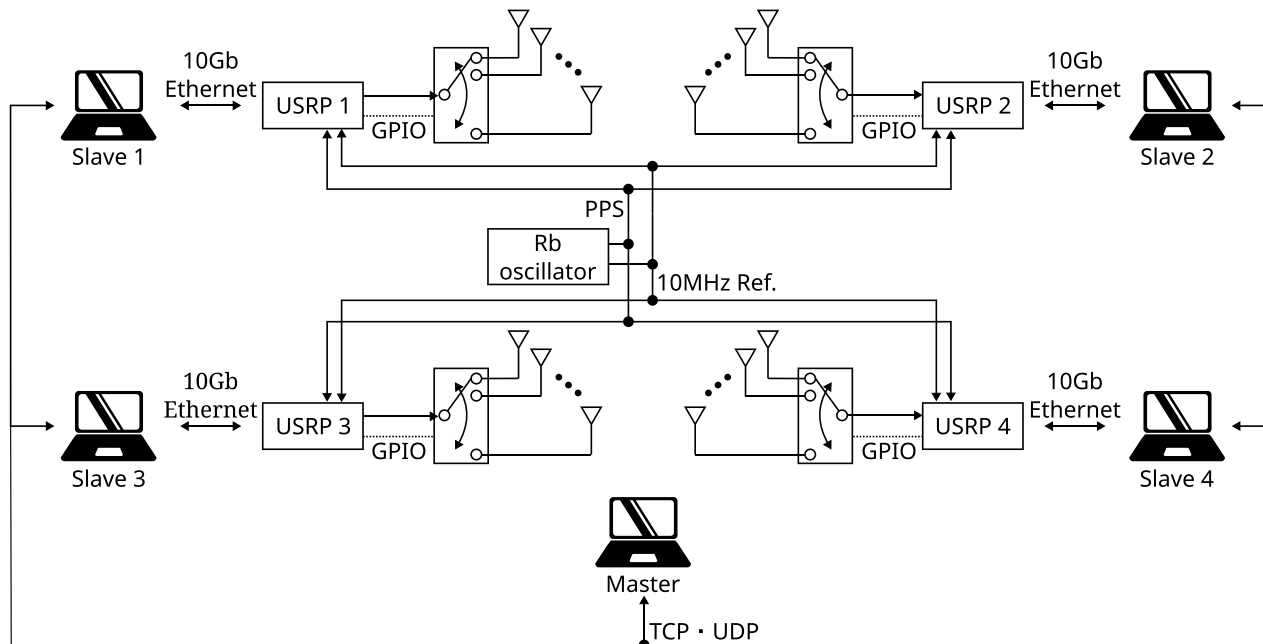
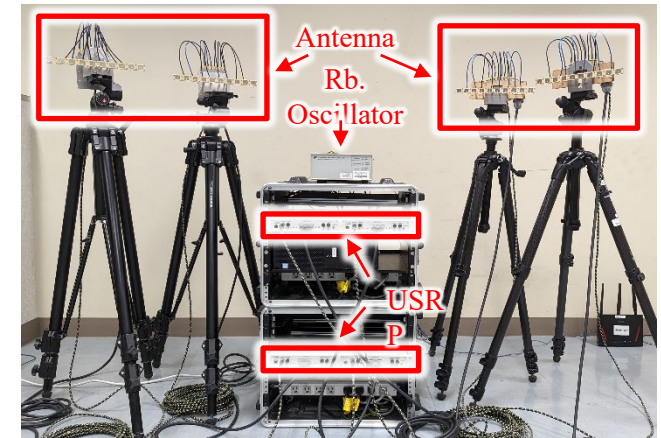
## スイッチング

測定時間が短縮, 安価  
キャリブレーション難

# マルチリンクMIMO測定系

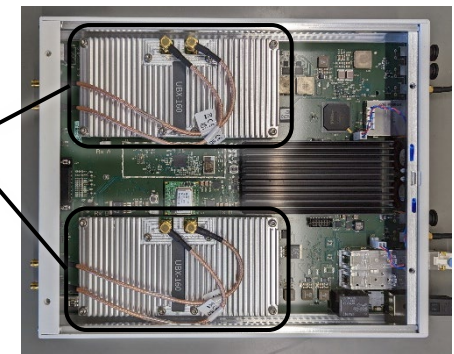
## ■ 開発した測定系

- 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



# チャンネルサウンダ構成

- 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
    - 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)
  - ドーターボード:UBX-160
    - 10 MHz~6 GHz, 160 MHz BW
    - 最大送信電力:約 20 dBm
  - 開発環境:UHD C++ API (v4.4.0)



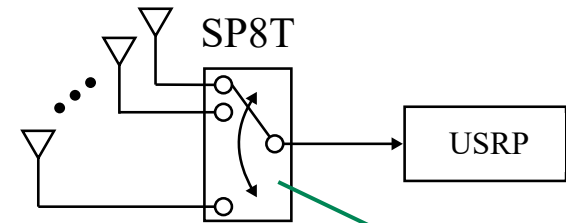
ドーターボード

USRP内部

# チャンネルサウンダ構成(2)

## ■ アンテナスイッチング方式

- 複数の送受信アンテナ(SP8T)をスイッチにより切り替えて使用
- RFスイッチ: SR-J030-8S (Universal Microwave Components Corp.)
- X310の15ピン汎用IO(GPIO)を使用
  - UHD APIでは制御用関数が提供



スイッチングによりアンテナ切り替え

Table 1 Specifications of the RF switch.

Item	Specification
Frequency range	0.5–12.4 GHz
Insertion loss	3.0 dB Max
Isolation	0.5–6 GHz: 60 dB Min
	6–12.4 GHz: 50 dB Min
VSWR (on state)	1.8:1 Max
Rise/Fall time <sup>*a</sup>	40 ns Max
On/Off time <sup>*b</sup>	90 ns Max

<sup>\*a</sup> 10–90%RF, 90–10%RF

<sup>\*b</sup> 50%TTL–90%RF, 50%TTL–10%RF



GPIOポート



スイッチ外観

# チャンネルサウンダの仕様

## ■ 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 $\mu$ 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 $\mu$ s (8 $\times$ 8MIMO)

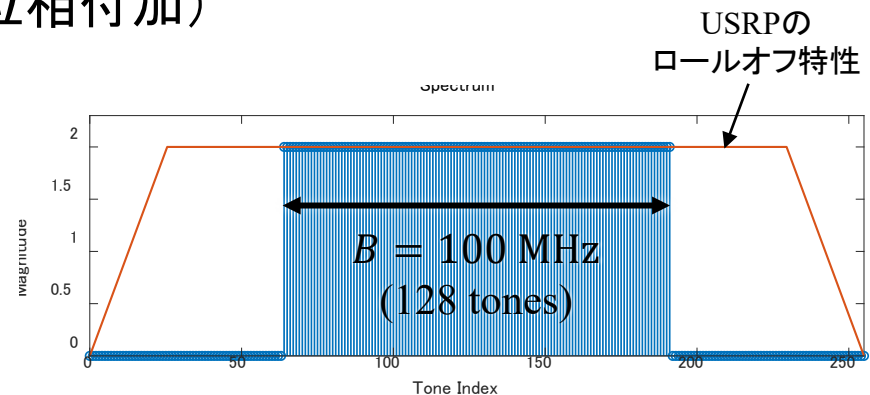
## ■ マルチトーン信号 (Newman位相付加)

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

$N$ : トーン数     $B$ : 信号帯域幅

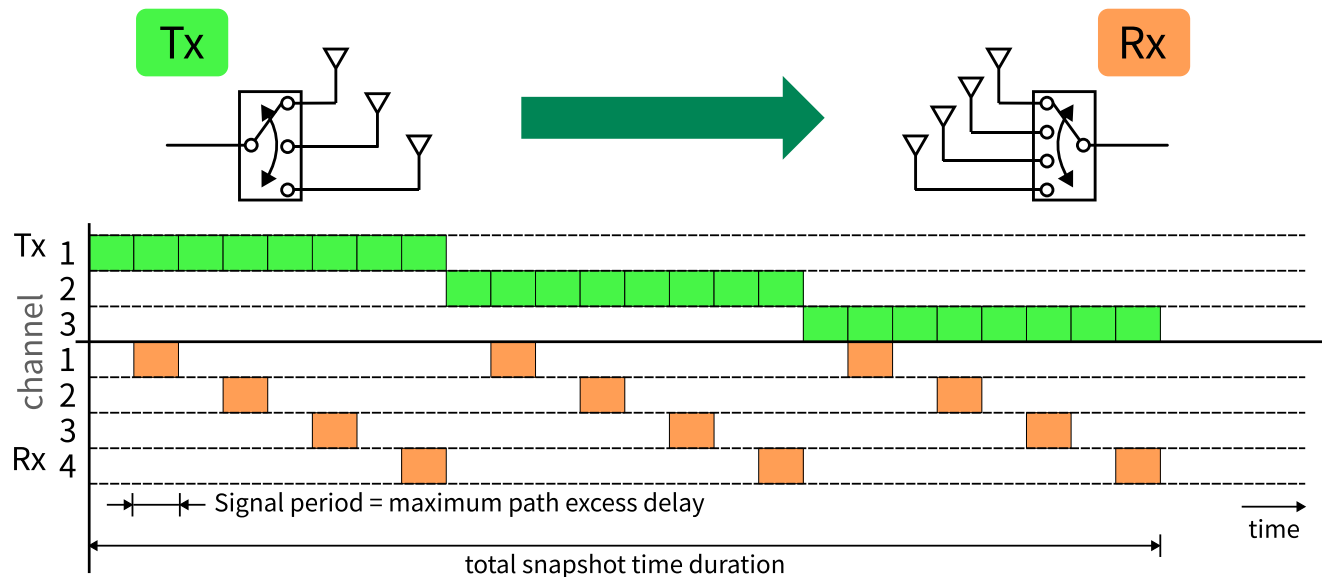
$\Delta_f = \frac{B}{N}$ : トーン間隔

$\phi_k = \frac{k^2\pi}{N}$ : 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

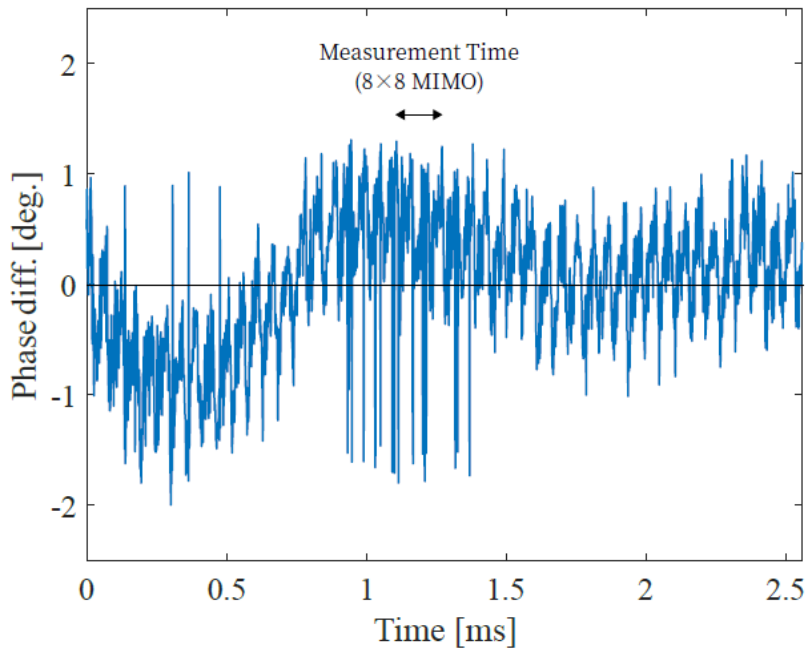


- シンボル長:  $1.28 \mu\text{s}$  (256 samples / 200Msps)
- $8 \times 8$ MIMOチャネル測定にかかる時間(MIMOスナップショット)  
:  $164 \mu\text{s}$  ( $=1.28 \mu\text{s} \times 2 \times 8 \times 8$ )

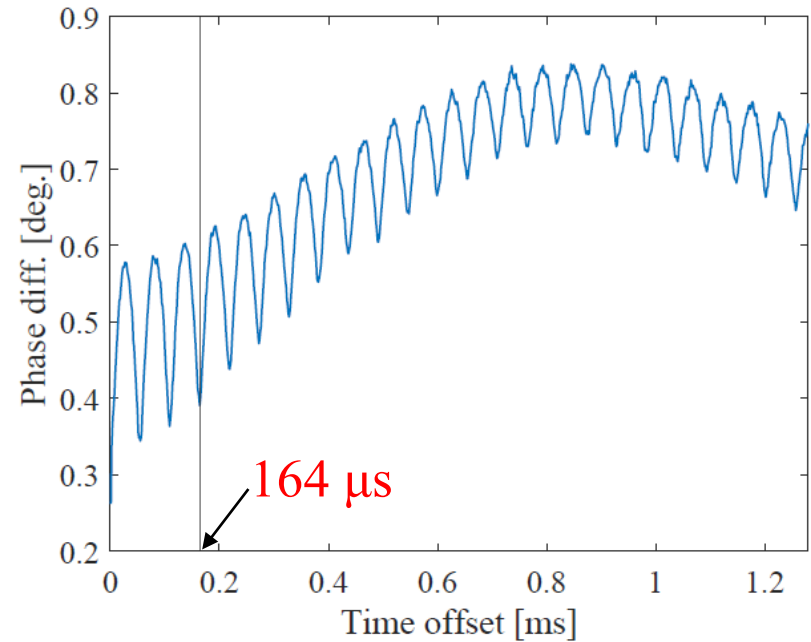


# 位相同期精度

- 基準信号と1PPSは、共通のRbから送・受のUSRPへ供給
- 約3度位の変動幅⇒MIMOチャネル測定への影響は無視できる



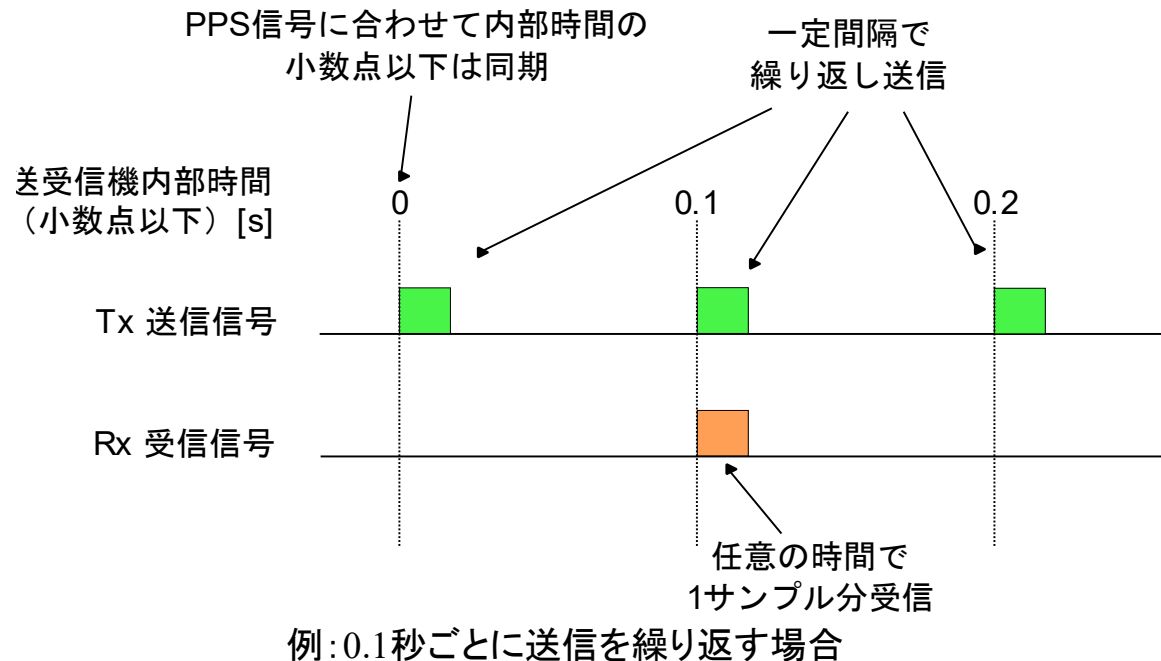
(a) Phase stability of the local oscillator.



(b) Average absolute phase difference at each time offset.

# USRP間送受信タイミング同期

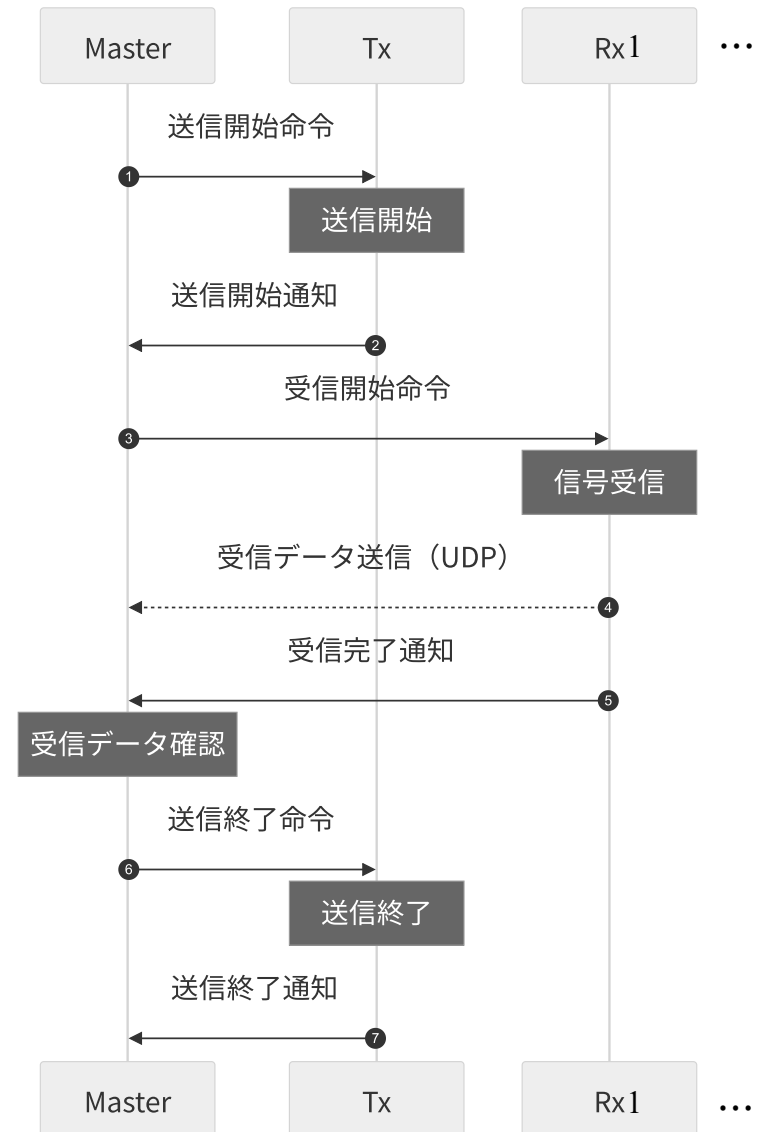
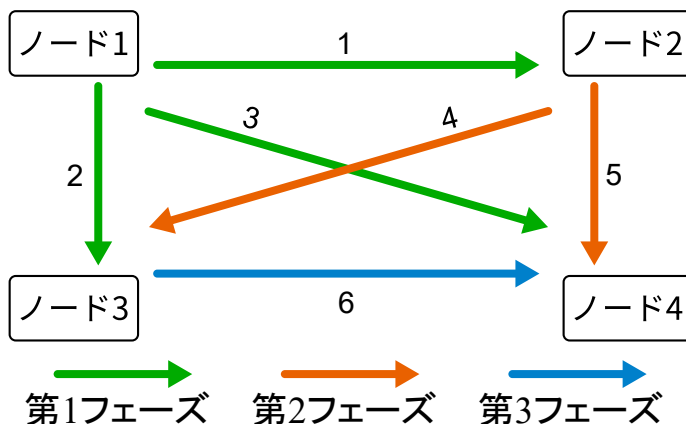
- USRP間の送受信タイミング同期の仕組み
  - ルビジウム発振器から同期信号共有
    - 10 MHz ref ⇒ 各USRPの内部クロックの同期
    - 1PPS ⇒ 送受信タイミングの同期
  - 送信 一定間隔でMIMOスナップショット(164us)を送信
  - 受信 送信周期に合わせて任意の時間で受信



# マルチリンクMIMO測定系への拡張

## ■ 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**



# 評価実験①：マルチリンクMIMO

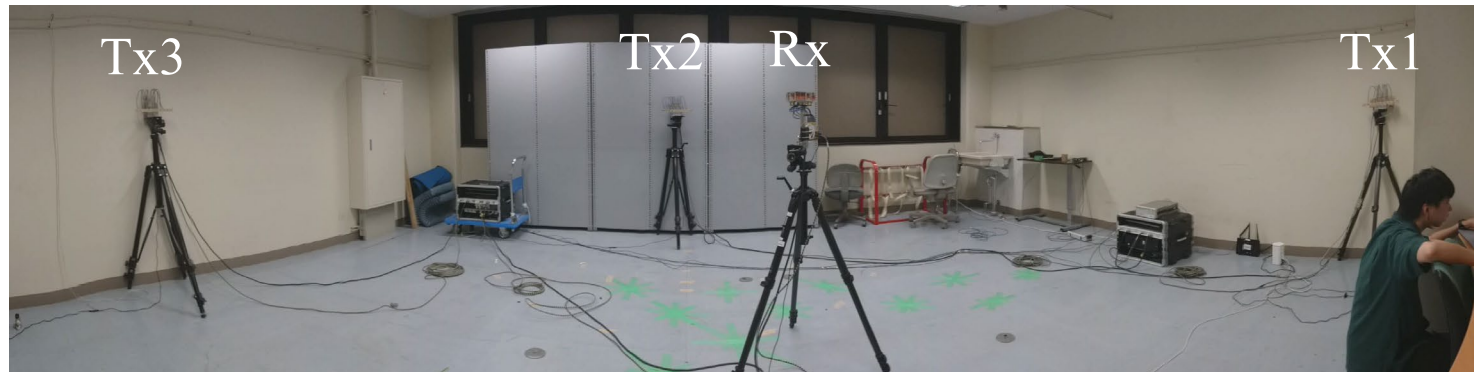
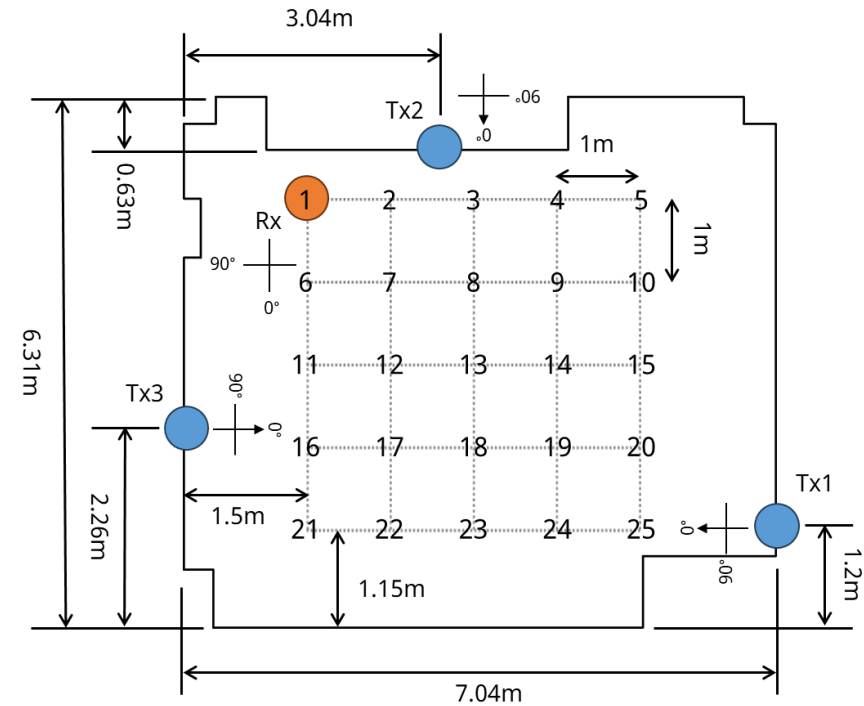
- 送信アンテナ：8素子線形アレー (3カ所)
- 受信アンテナ：8素子円形アレー
- 測定ポイント数：25



8素子線形  
アレーアンテナ

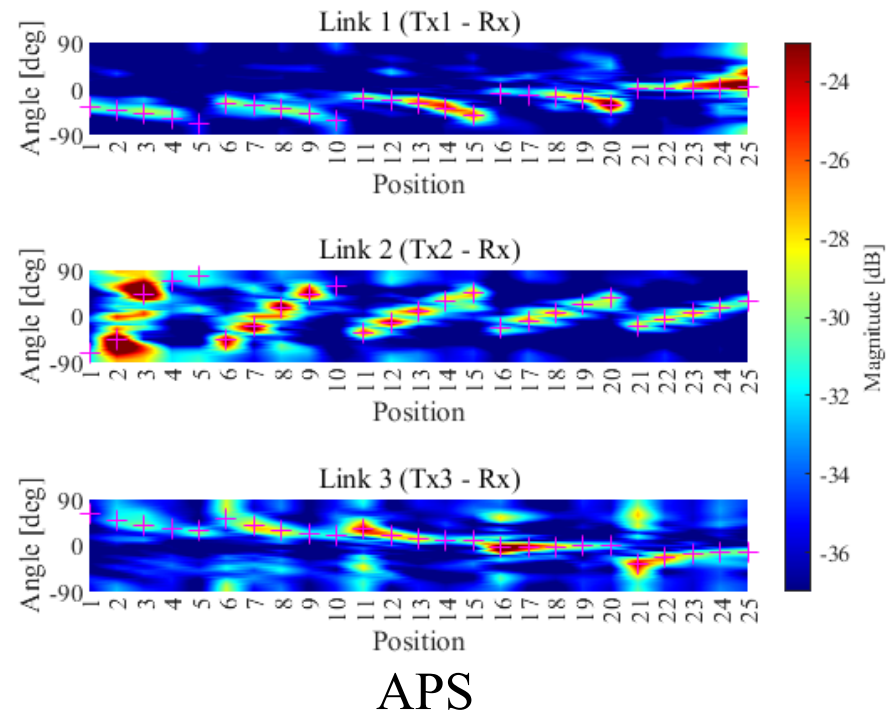
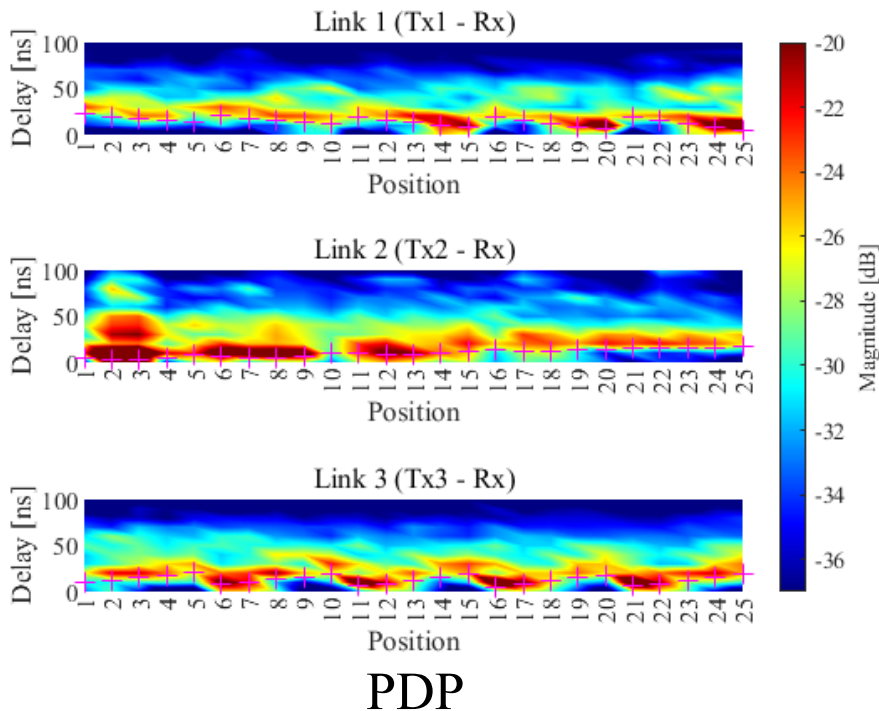
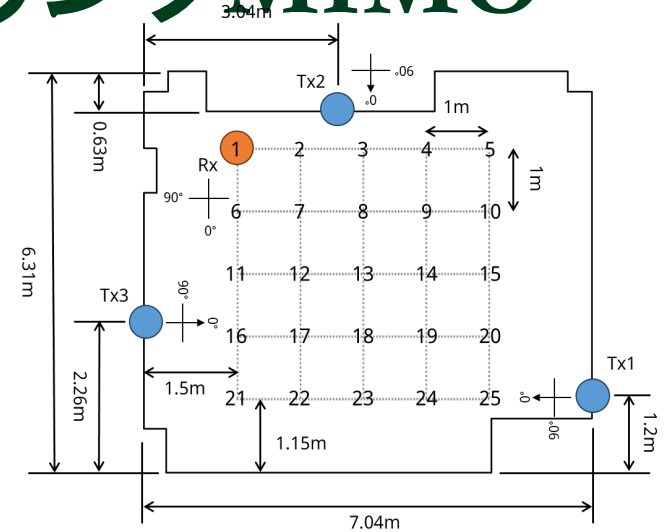


8素子円形  
アレーアンテナ



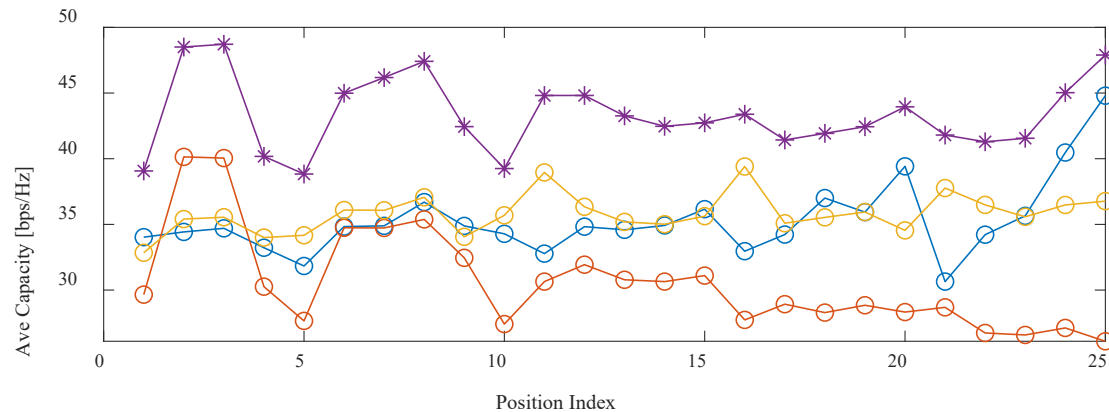
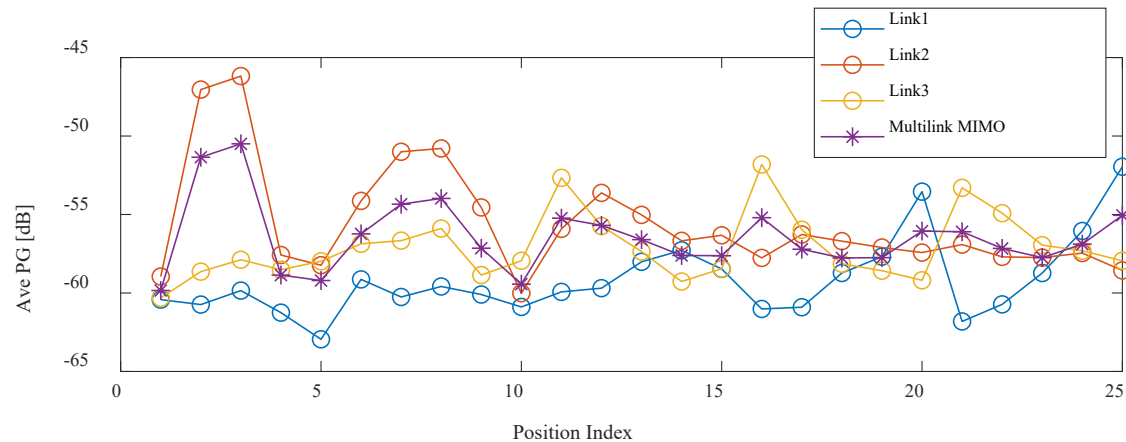
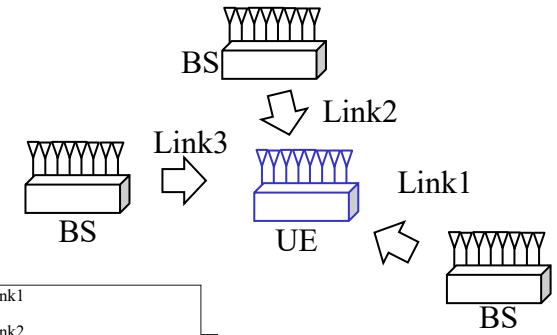
# 評価実験①：マルチリンクMIMO

- 遅延電力プロファイル(PDP)と放射角度電カスペクトル(APS)の導出
- マーカーは直接波の理論値を示す
  - 測定結果と理論値はよく一致



# 評価実験①：マルチリンクMIMO

- 分散MIMO ( $(3 \times 8) \times 8$ ) の評価
- Ave SNR = 20 dBとなるように設定



# 評価実験②：RTI測位

## ■ マルチリンクMIMO:4ノード6リンク

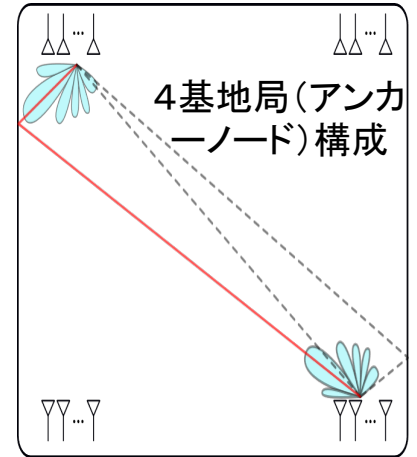
$$y_{\Delta} = w_R^H H_{\Delta} w_T = W x_{\Delta} + n$$

受信BF (Left), 送信BF (Right), 多重波経路情報 (事前情報) (Top Right)  
 各径路の電力変化 (Left), 差分MIMOチャンネル行列 (Center), 画素ベクトル (Bottom Center)

差分MIMO  
チャンネル行列

$$H_{\Delta} = H - H_0$$

Current (under  $H$ ), Baseline (under  $H_0$ )

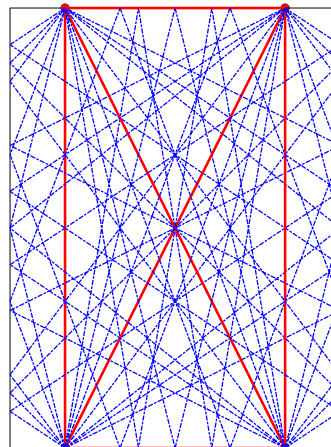


Erastic Net

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

### 測定仕様

アンテナ素子数 $K$	8
アンテナ素子間隔 $d$	0.5 波長
RTIボクセルサイズ	0.05 m
信号帯域幅	100 MHz
遅延時間ビーム数 $N$	128
RTI楕円パラメータ $\gamma$	0.05 m
正則化パラメータ $\lambda$	5分割交差検証により決定
正則化パラメータ $\alpha$	0.25



多重波経路  
(事前情報)

● アンカーノード    \* 真位置    × 推定位置



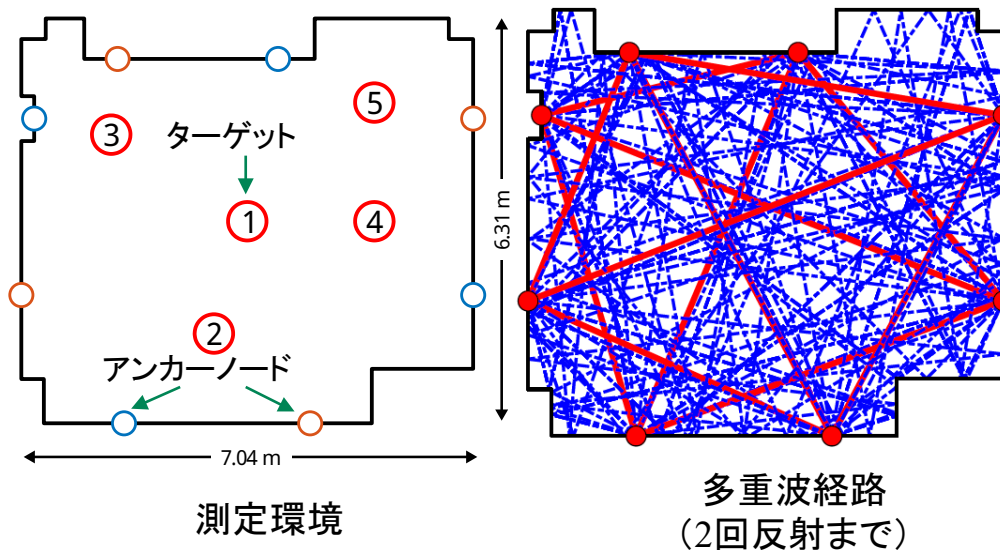
正しく位置推定が可能

# 評価実験②：RTI測位

## ■ 評価条件

- 12リンク測定 | 4ノード6リンク測定を2回
- 測位ターゲットには半径 0.3 m の電波吸収体を使用
- 測位法: Multipath-RTI法[\*]

Human  
model



[\*] Togo Ikegami, Minseok Kim, Yuto Miyake, Hibiki Tsukada, “Multipath RTI: Millimeter-Wave Radio Based Device-Free Localization,” IEEE Access, vol. 12, pp. 42042-42054, 2024



# 評価実験②：RTI測位

## ■ シミュレーションと実験結果を比較

○ 実際のターゲット位置 × 推定ターゲット位置

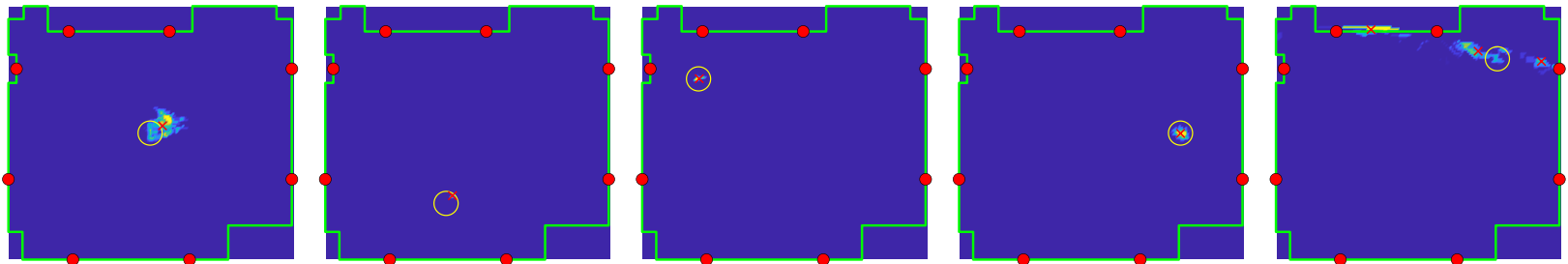
①

②

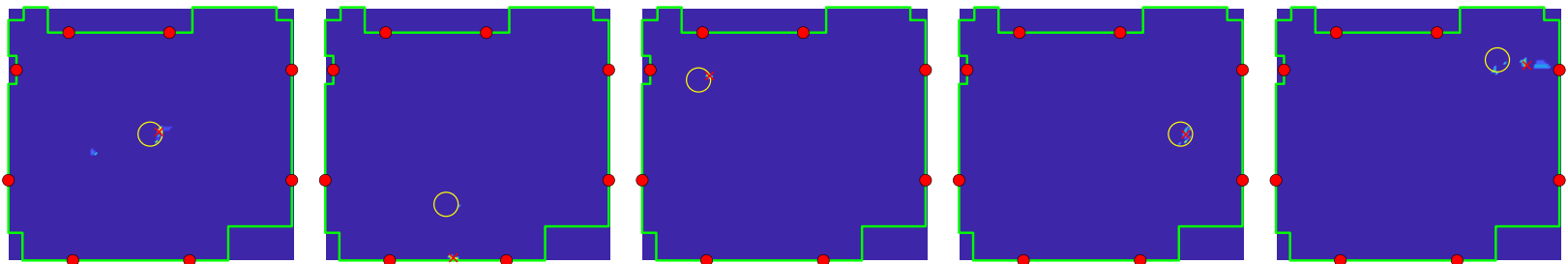
③

④

⑤



シミュレーション結果



実験結果

- 概ね実際の実際のターゲット位置の半径内で推定
- 推定精度はターゲット位置によって異なる

# まとめ

- 多目的マルチリンクMIMOチャネルサウンディングセンサネットワークの開発
  - 分散型超多素子アンテナ技術の設計・評価に必須
    - 分散型超多素子MIMO (Distributed massive MIMO)
    - セルフリー超多素子MIMO (Cell-free massive MIMO)
    - 測位とセンシング (Localization and Sensing)
  - モジュール化, アンテナ・スイッチング方式
  - 高速化, 低コスト化
  
- 評価実験: 有効性の確認
  - マルチリンクMIMO
  - 多重波RTIを用いた屋内測位

# Thank you for your attention !



[mskim@eng.niigata-u.ac.jp](mailto:mskim@eng.niigata-u.ac.jp)



<http://radio.eng.niigata-u.ac.jp>

# System Model

- RSS model

$$y_l = \sum_{m=1}^M w_{lm} x_m + n_l$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & \cdots & w_{LM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_L \end{bmatrix}$$

RSS vector (Lx1)      Weighting matrix (LxM)      Voxel vector (Mx1)      Noise vector (Lx1)

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

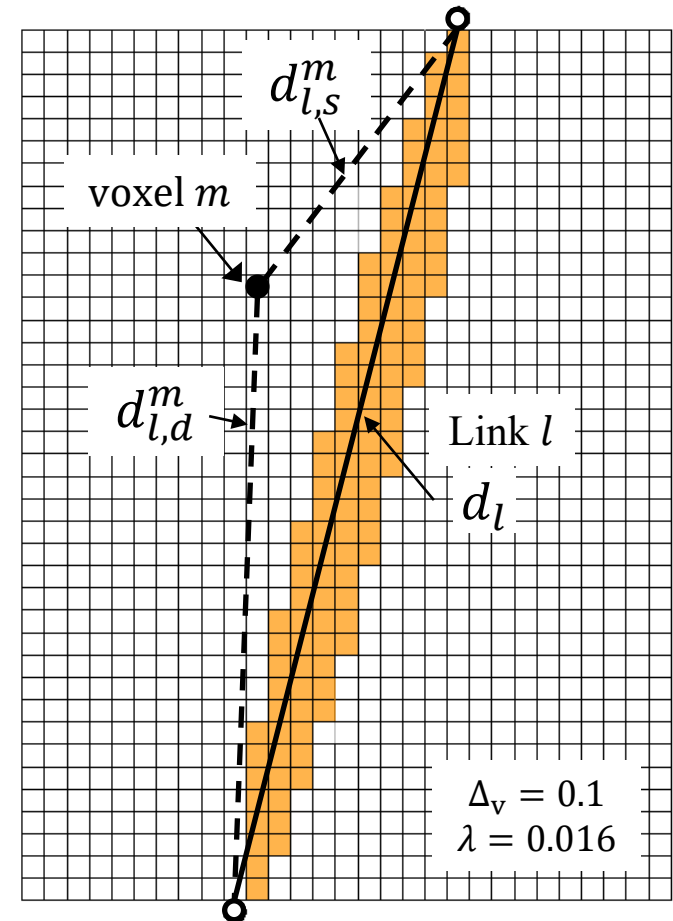
- Weighting matrix,  $\mathbf{W}$

$$w_{lm} = \begin{cases} 1/\sqrt{d_l}, & d_{l,d}^m + d_{l,s}^m < d_l + \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

- Visualize  $\widehat{\Delta x}$

$$\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}(t_0) = \Delta \mathbf{y} = \mathbf{W}\Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{n} \rightarrow \widehat{\Delta \mathbf{x}}$$

fewer equations than unknowns:  
underdetermined  
 $\Rightarrow$  ill-posed inverse problem



■ : weighted voxels

$d_l$  : distance btw the anchors

$d_{l,s}^m, d_{l,d}^m$  :  $x_l$