

2ステージ法による簡易型MIMO-OTA評価のシミュレーション手法 とアンテナカップリング特性評価への応用

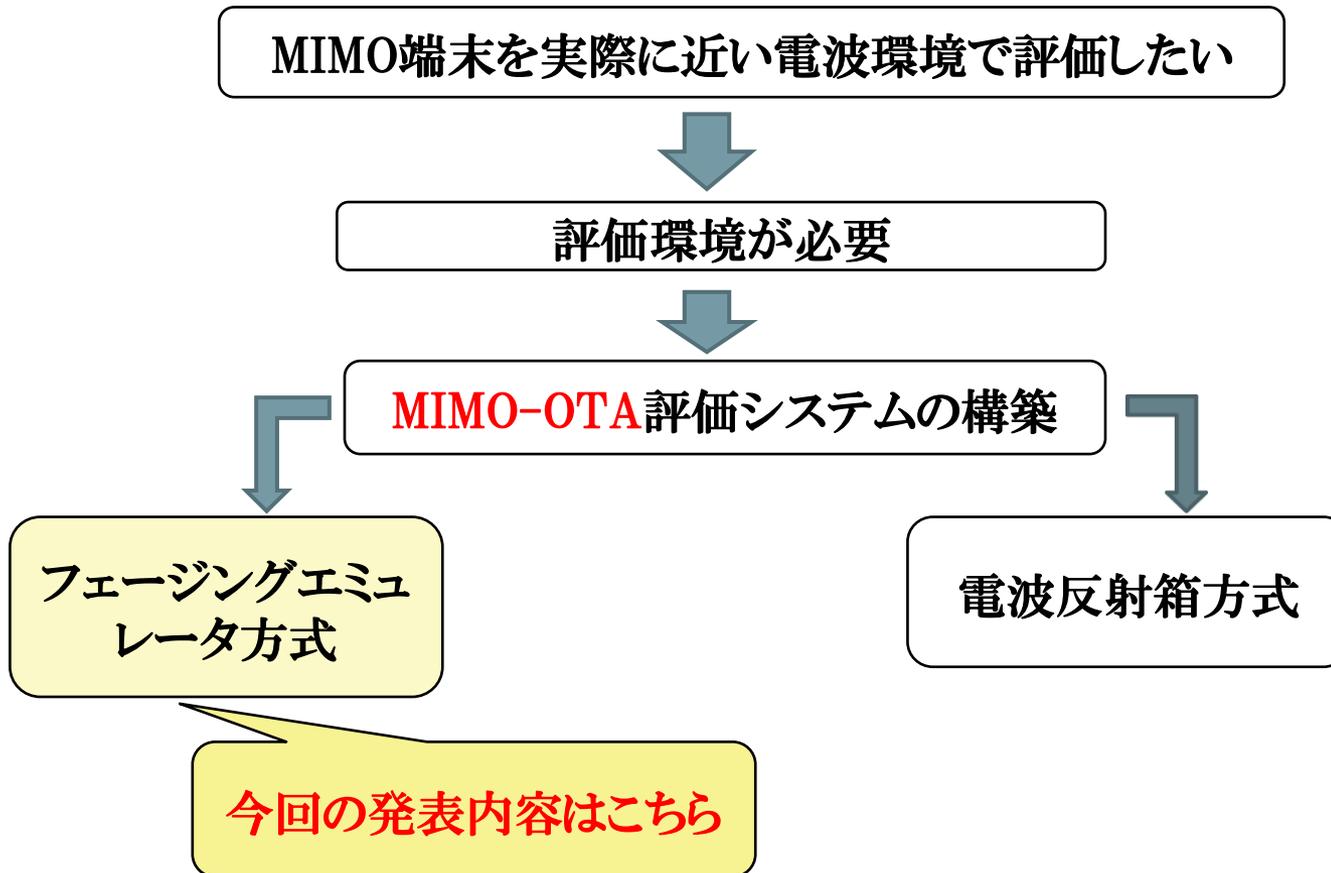
孫 桂江^{*} 中田 克弘^{*} 大島 一郎^{**} 唐沢 好男^{*}
(*電気通信大学 **電気興業株式会社)

発表内容

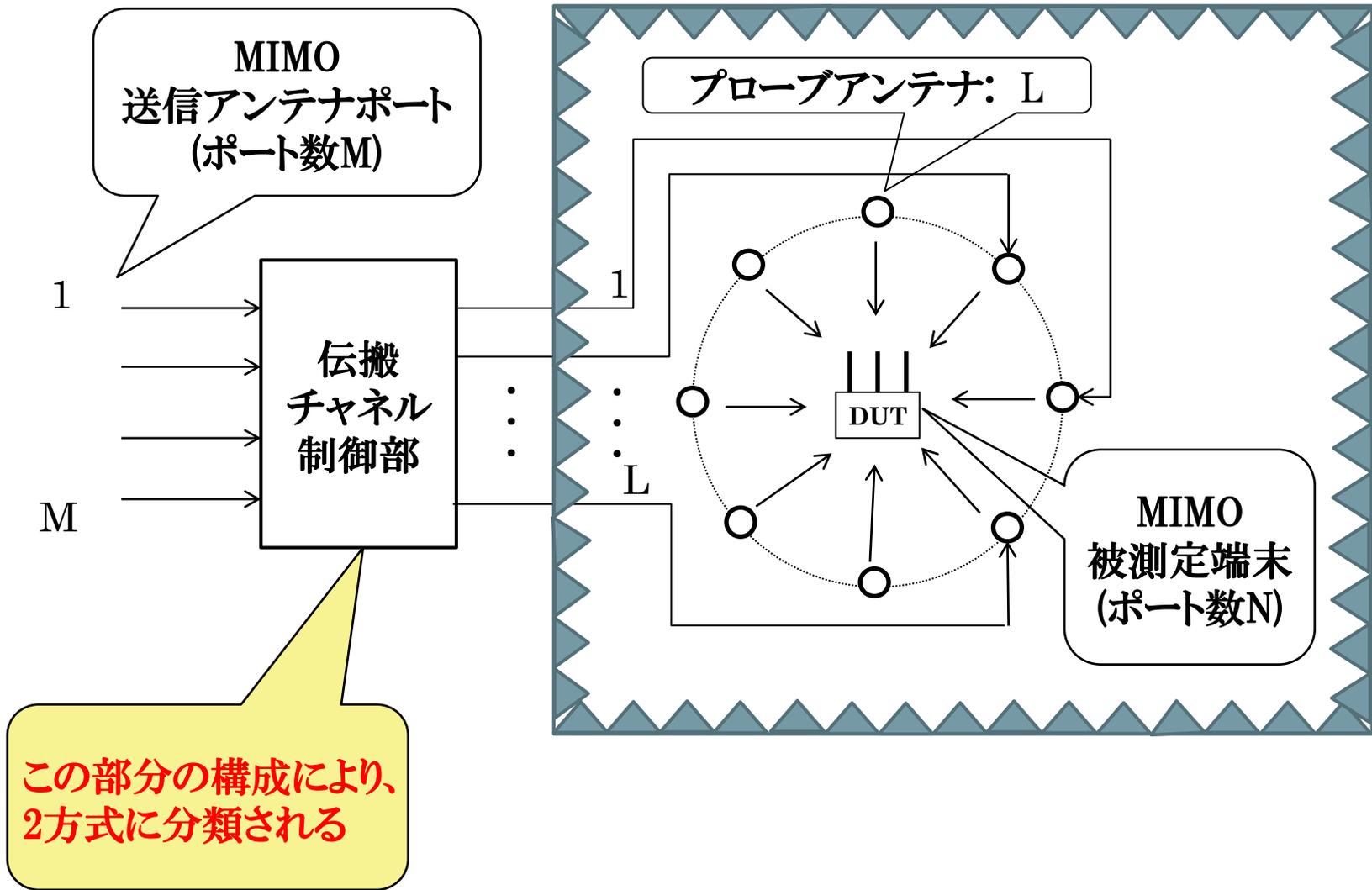
- ◆ MIMO-OTAとは
- ◆ フェージングエミュレータ型MIMO-OTAの構成と分類
- ◆ 2ステージ法による簡易型MIMO-OTAの構成
- ◆ 2ステージ法のシミュレーション手法
- ◆ アンテナカップリング特性評価への応用
- ◆ まとめ

研究背景

複数のアンテナをもちいて、高速伝送を実現する**MIMO技術**は、無線通信システムへ応用が進んでいる

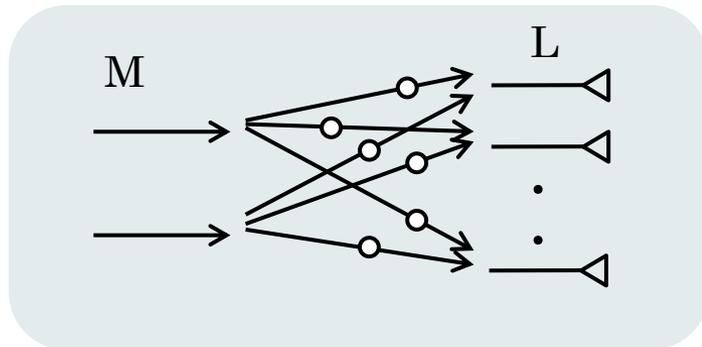


フェーシングエミュレータ型MIMO-OTA:全体構成



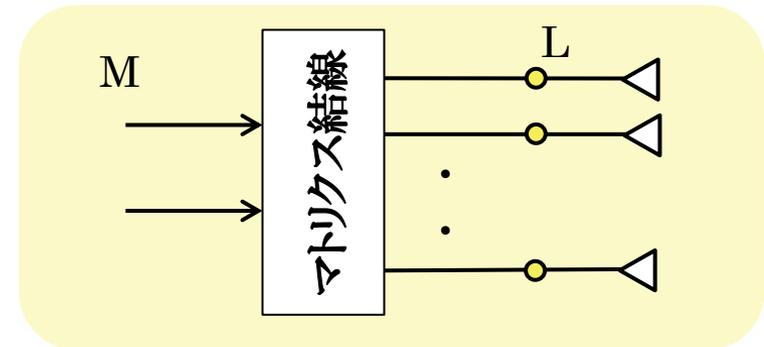
伝搬チャネル制御部の基本構成

パス制御型



- 伝搬チャネル特性を、パス単位で制御
- 高柔軟性、高性能、高価格

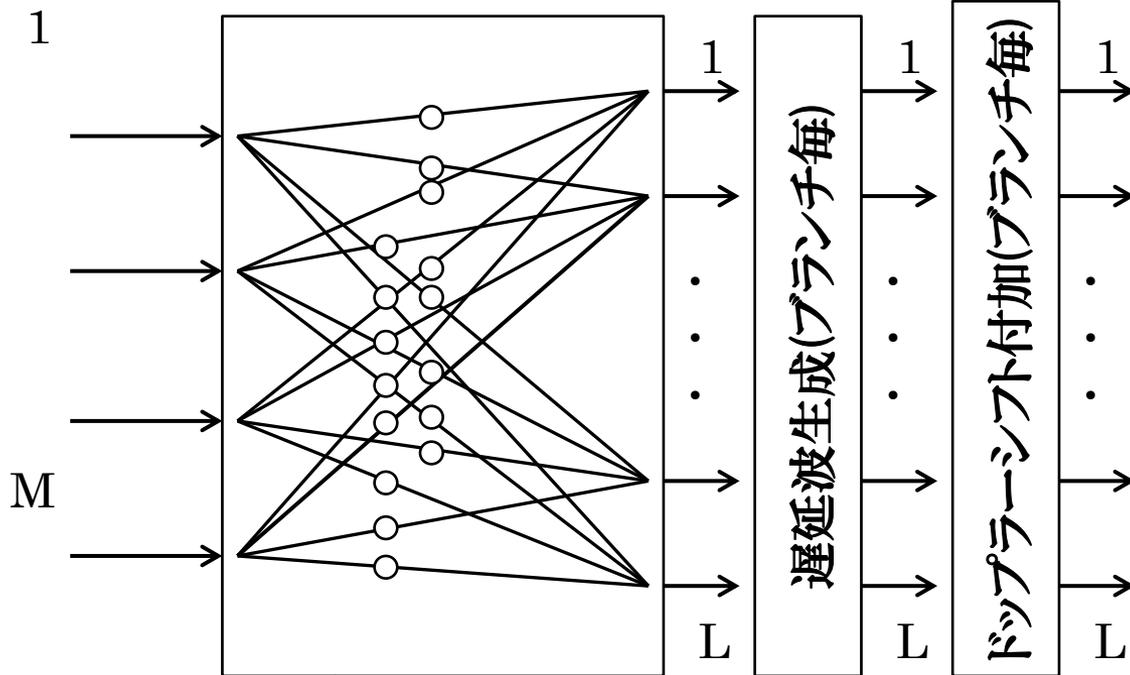
アンテナブランチ制御型(簡易型)



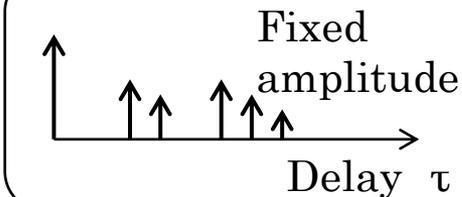
- 伝搬チャネル特性を、アンテナブランチ単位で、機能を分担して制御
- 機能と性能は従来方式と同等。構成簡易、低価格

本研究はこの方式に2ステージ法を組み入れる

アンテナブランチ制御型



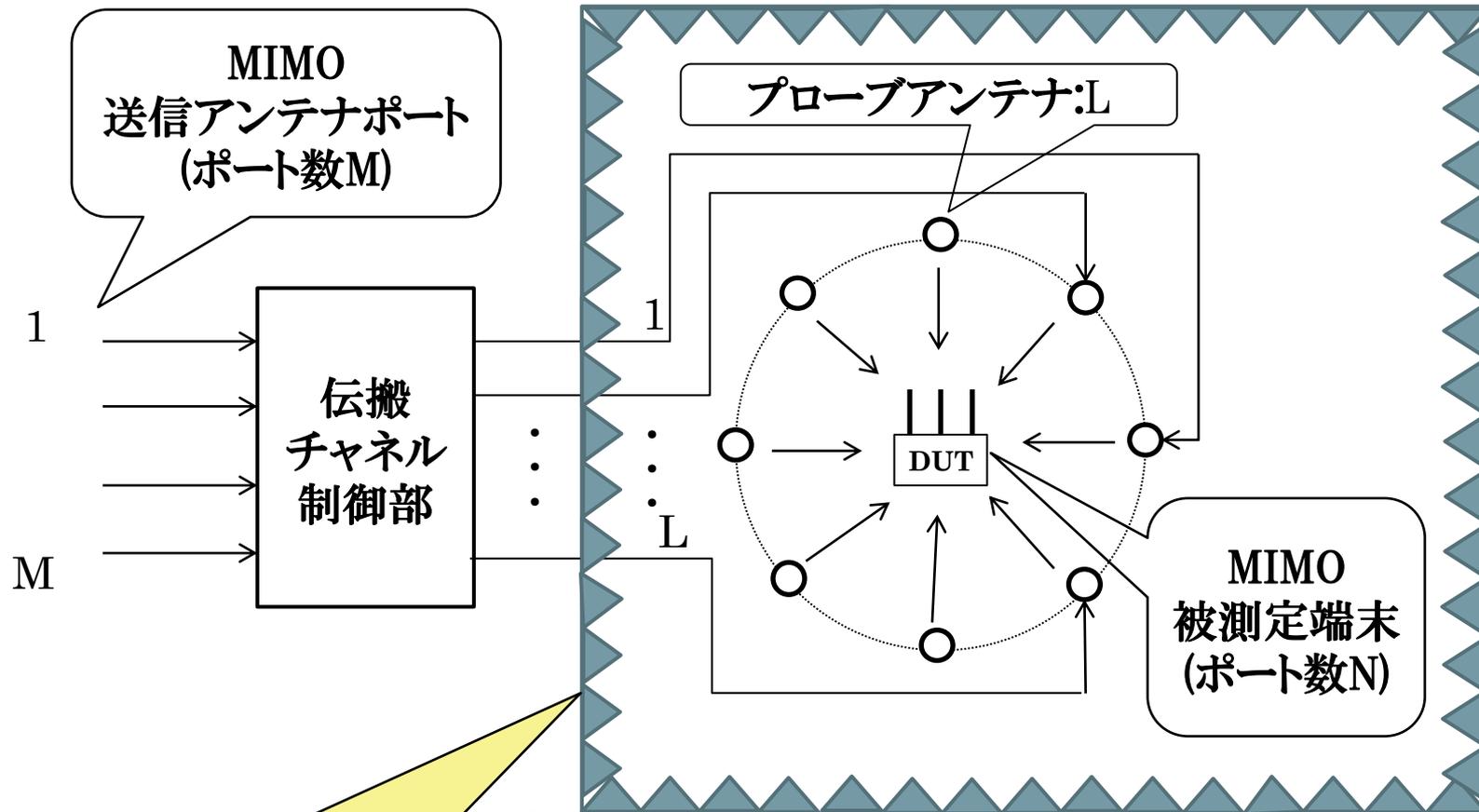
WH符号での固定結線
(送信側無相関変動)



$+ f_{DI}$

OTA部での空間合成
によりレイリー変動が生
み出される

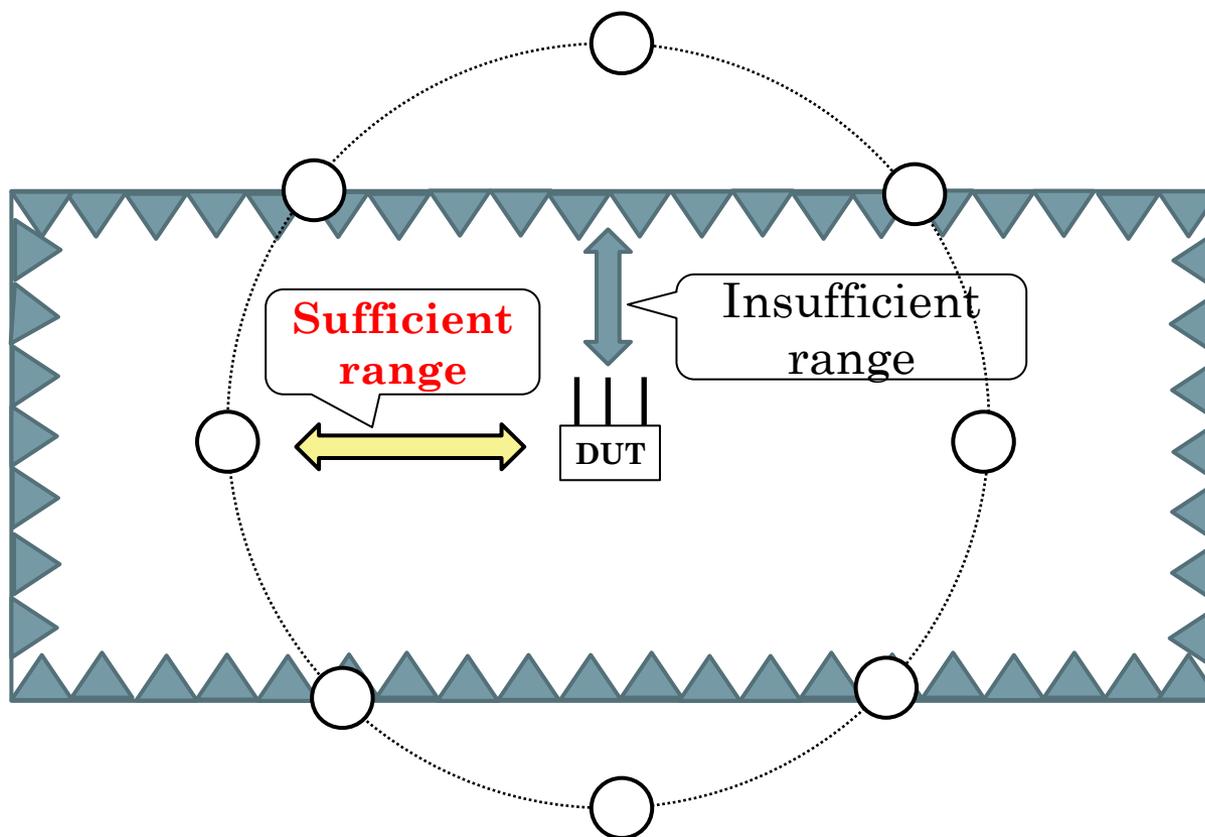
フェーシングエミュレータ型MIMO-OTA:全体構成



測定端末とプローブアンテナが配置できるサイズの電波暗室が必要である

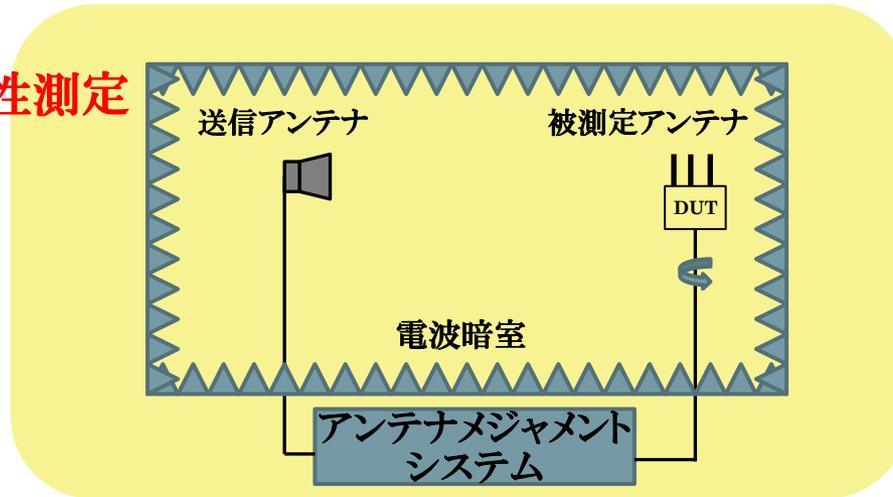
電波暗室のサイズがDUTに対して十分な大きさが取れない場合

DUTサイズが大きくて、電波暗室内に、プローブアンテナを配置できない場合でも1方向に十分な距離があれば、MIMO-OTA評価できる。
(例えば、自動車に取り付けられたアンテナ、自動車内の端末)

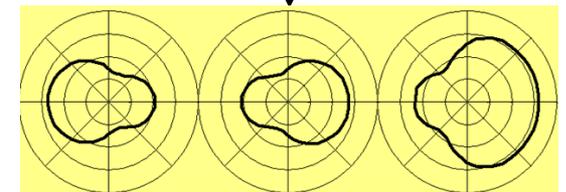
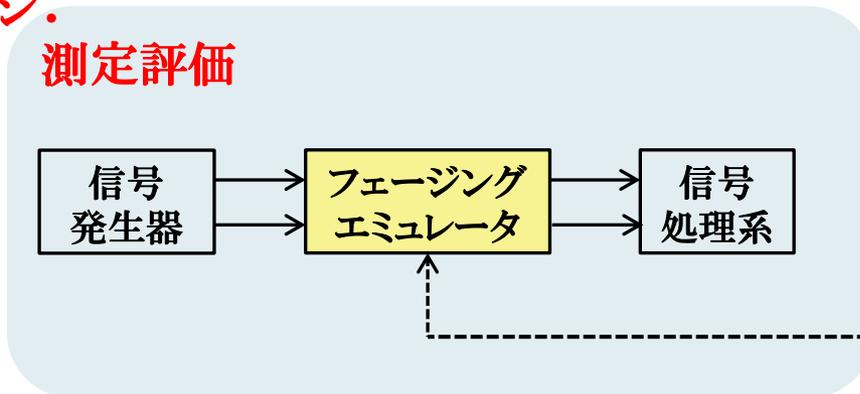


2ステージ法のイメージ

第1ステージ: アンテナ特性測定



第2ステージ: 測定評価



アンテナパターン

今回の発表の目的

2ステージ法による簡易型MIMO-OTA評価法を提案し、
そのシミュレーション手法を示し、
また、その応用例を示すことで、提案方式の有効性を検証
する。

MIMOチャネルモデル(アンテナブランチ制御型)

受信信号 $r(t) = H(t, \tau) \otimes s(t) + n(t)$

インパルス応答行列 $H(t, \tau) = A_{RX} A_{Doppler}(t) H_{delay}(\tau) A_{TX}$ コネクション行列
送信ポート信号変動を無相関に

$$A_{TX} = (w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_M)$$

$$w_m = (w_{m1} \quad w_{m2} \quad \dots \quad w_{mL})^T$$

遅延生成

$$H_{delay}(\tau) = \sum_{k=1}^K A_{delay}^{(k)} \delta(\tau - \tau_k)$$

$$A_{delay}^{(k)} = \text{diag}(\alpha_1^{(k)} c_k \quad \alpha_2^{(k)} c_k \quad \dots \quad \alpha_L^{(k)} c_k)$$

ドップラー
生成

$$A_{Doppler}(t) = \text{diag}(e^{j2\pi f_{D1}t} \quad e^{j2\pi f_{D2}t} \quad \dots \quad e^{j2\pi f_{DL}t}) \quad f_{Dl} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta_l$$

$$A_{RX} = (v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_L)$$

$$v_l = (v_{l1} \quad v_{l2} \quad \dots \quad v_{lN})^T$$

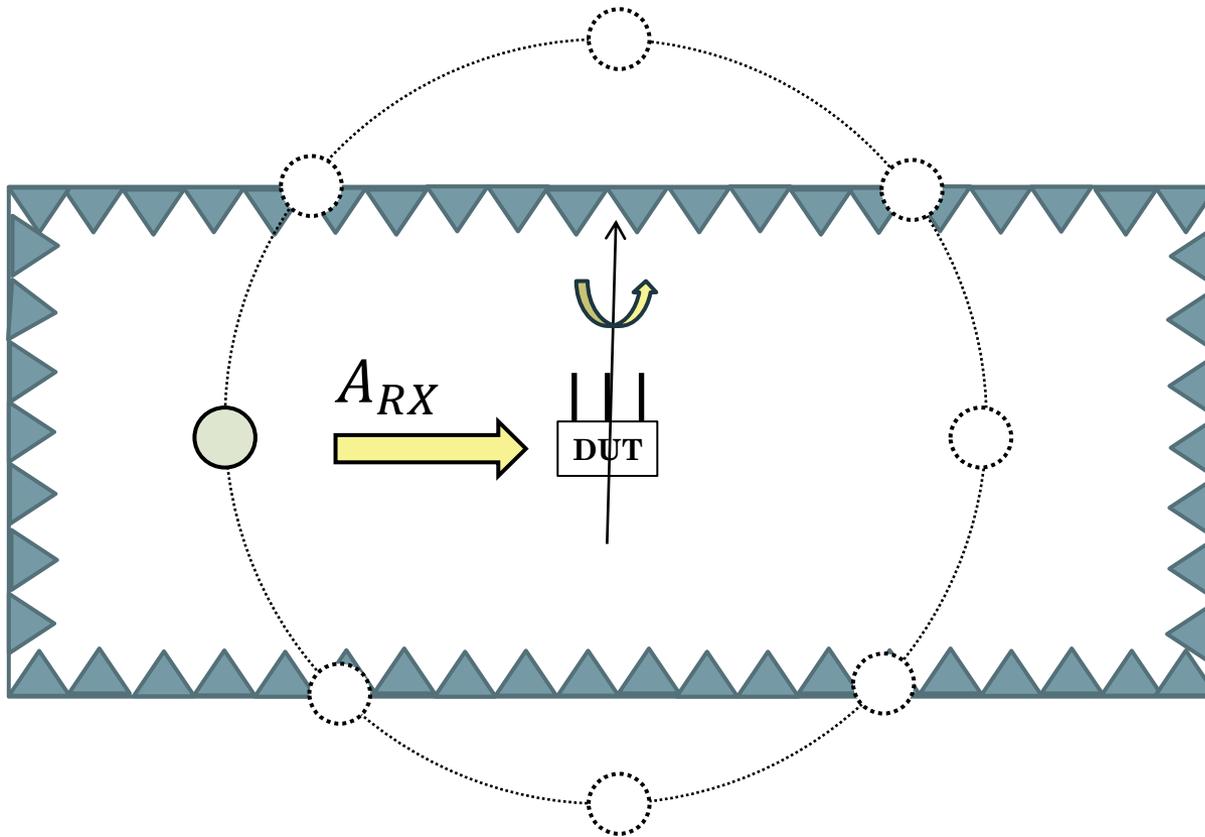
$$v_{ln} = e^{jkd_n \cos(\theta_l - \theta_0)}$$

受信アンテナ特性

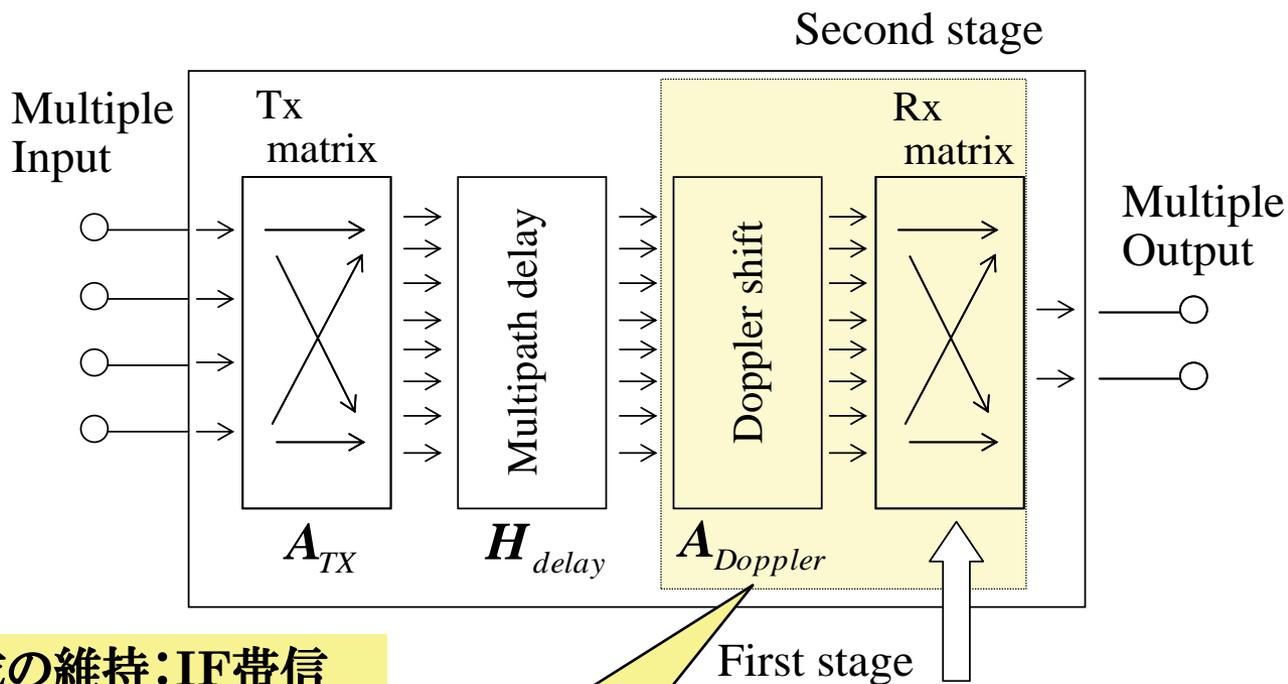
**2ステージ法ではこれを
事前に測定しておく**

2ステージ法：第1ステージでの測定

L=8であれば、8方向のみのアレー測定でok
行列 $A_{RX}\{N \times L\}$ のデータ取得

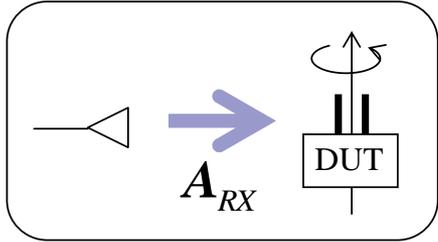


2ステージ法による簡易型MIMO-OTAの構成



簡易の構成の維持: IF帯信号をIF帯信号のままで処理し、IF帯の出力信号としたい

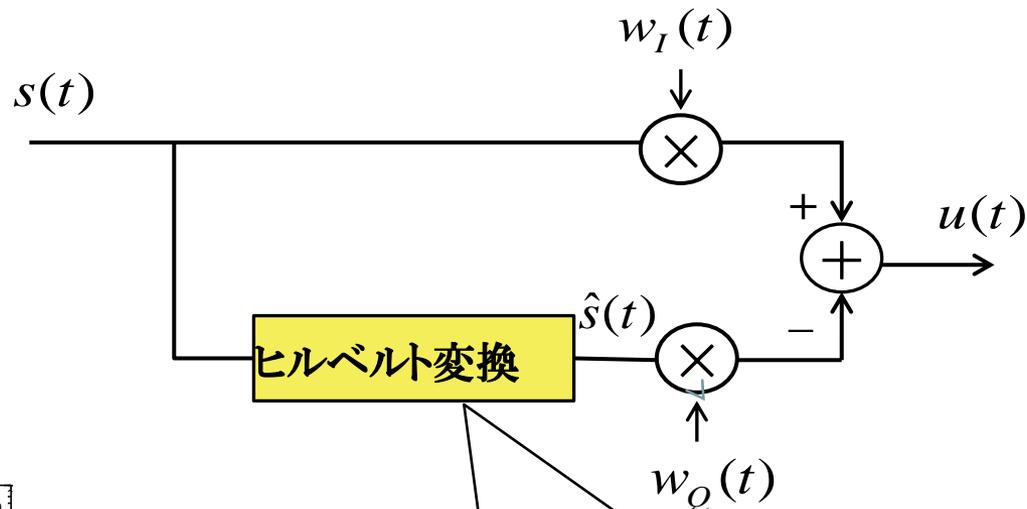
ドップラシフトやアンテナ特性は複素数の量なので、これをIF帯で実現するために、実数信号のヒルベルト変換が必要



実数信号の複素数ウェイト変換

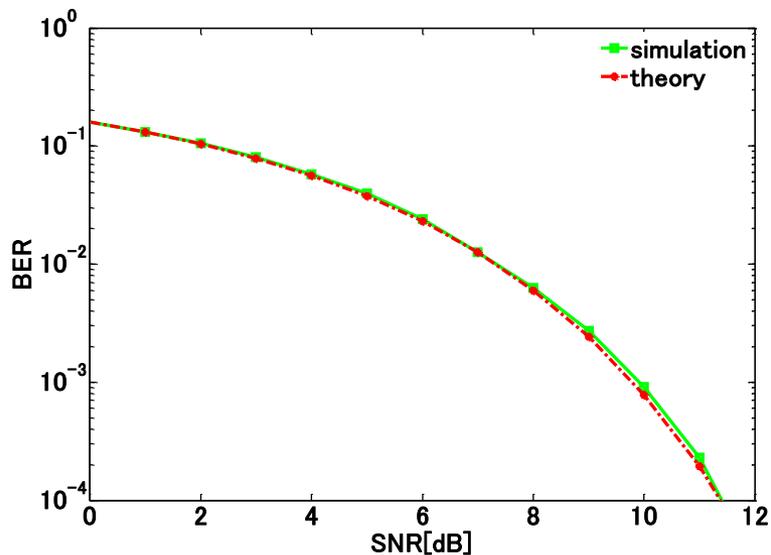
複素数ウェイト

$$w(t) = w_I(t) + jw_Q(t)$$

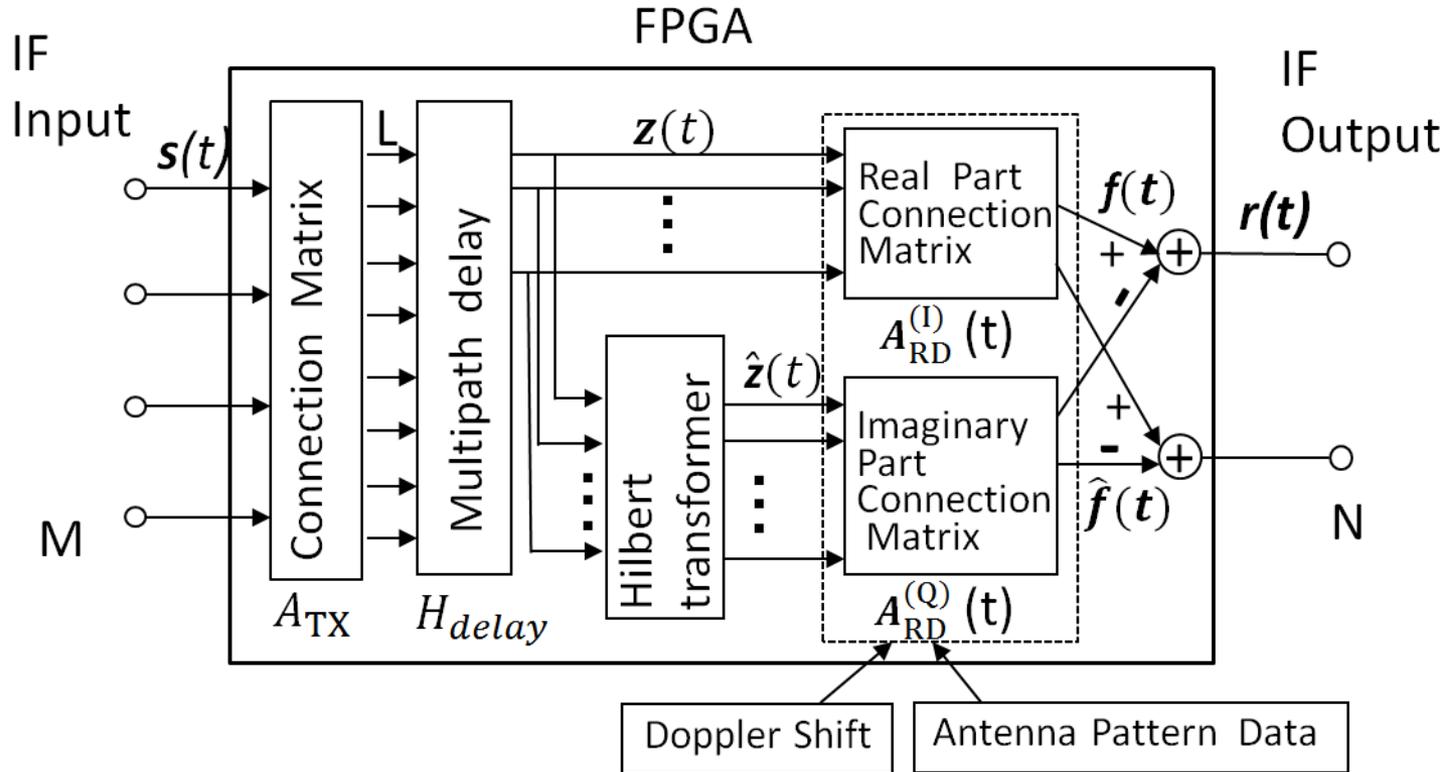


比帯域が大きい信号に対しても、
伝送特性が劣化しないことが重要

MATLABを用いて、10次のヒルベルト
変換フィルタを設計し、シミュレーション
で性能評価を行った



IF帯で第2ステージのシミュレーション



$$r(t) = f(t) - \hat{f}(t)$$

$$f(t) = A_{RD}^{(I)}(t)z(t)$$

$$\hat{f}(t) = A_{RD}^{(Q)}(t)\hat{z}(t)$$

$$z(t) = H_{delay} \otimes \{A_{TX} s(t)\}$$

$$\hat{z}(t) = \mathcal{H}\{z(t)\}$$

$$A_{RD}^{(I)}(t) = \text{Re}(A_{RX} A_{Doppler}(t))$$

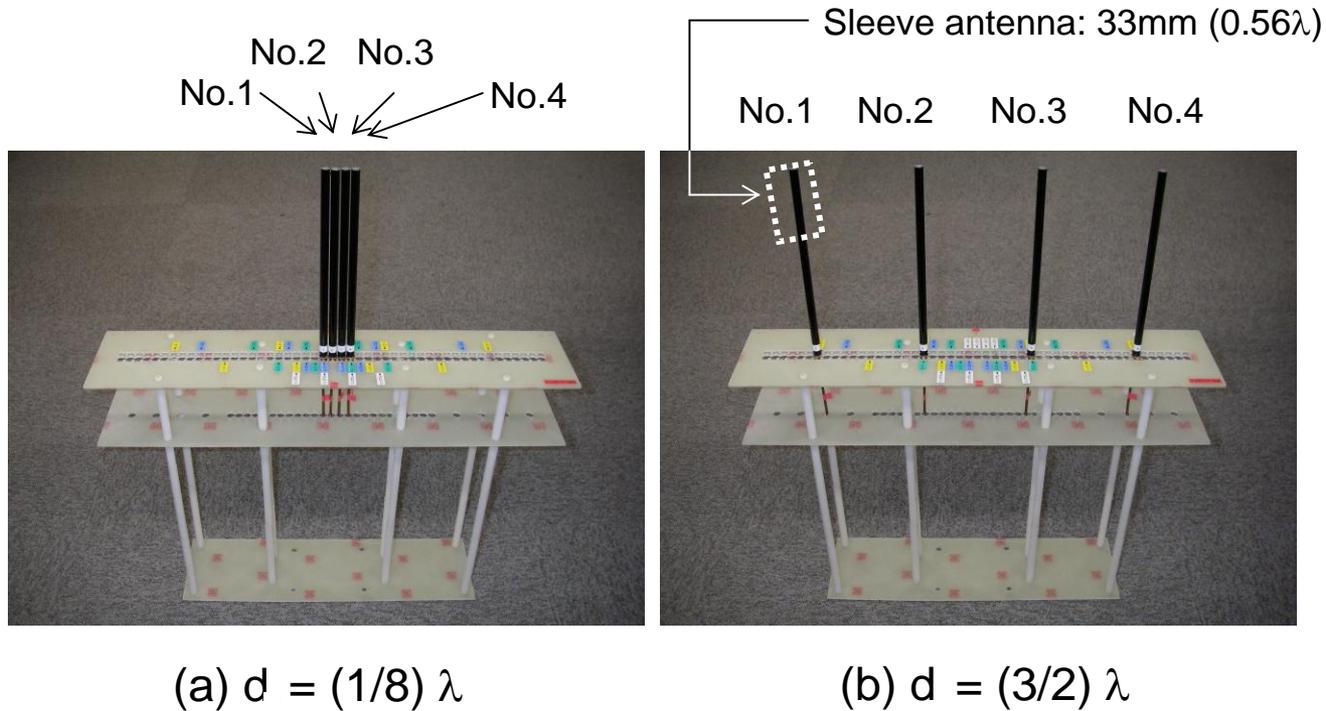
$$A_{RD}^{(Q)}(t) = \text{Im}(A_{RX} A_{Doppler}(t))$$

ヒルベルト変換が
一回で済むため

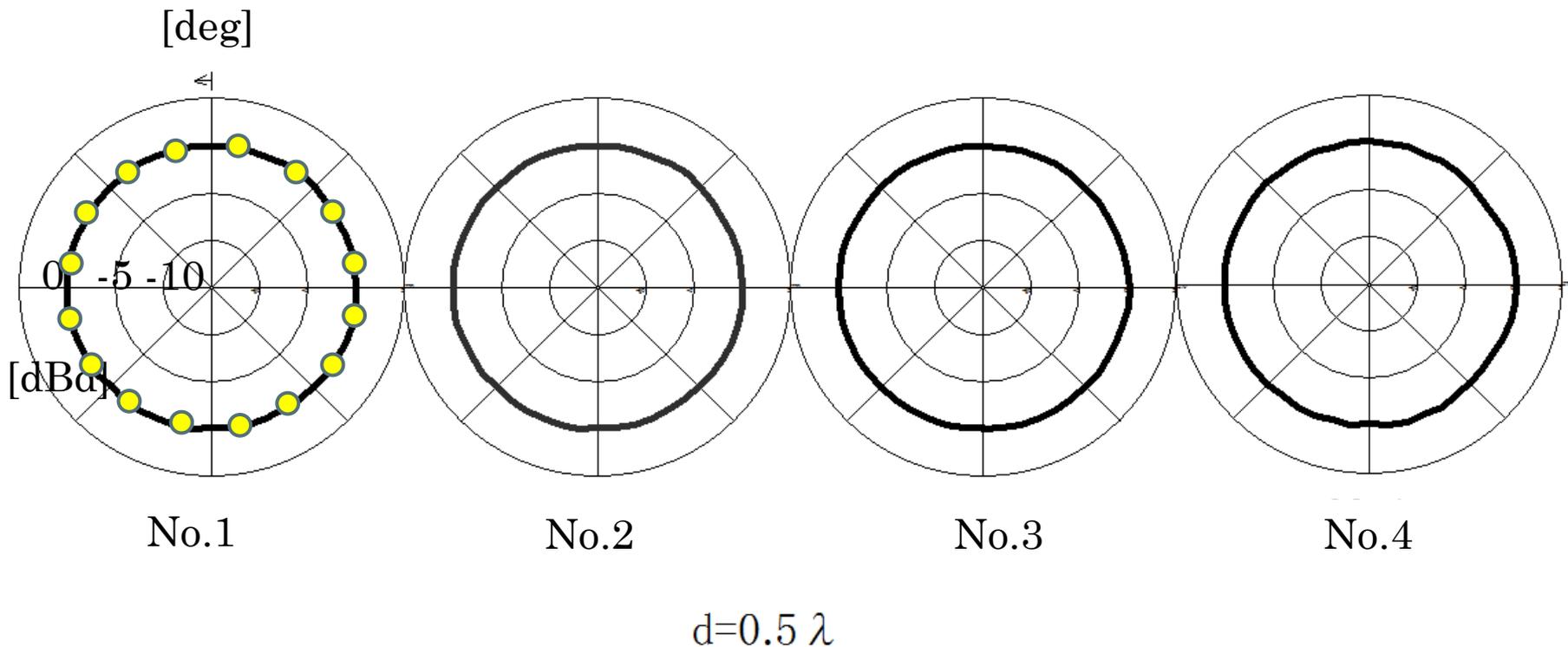
アンテナカップリング特性評価への応用

- ◆ 具体的な応用例を示す
- ◆ 2ステージ法の精度検証を行う
- ◆ カップリングによるチャネル特性変化を評価する
 - 2ステージ法によるシミュレーション
 - マルチパスリッチ環境を有する電波反射箱内での測定
 - 二者の結果を比較する

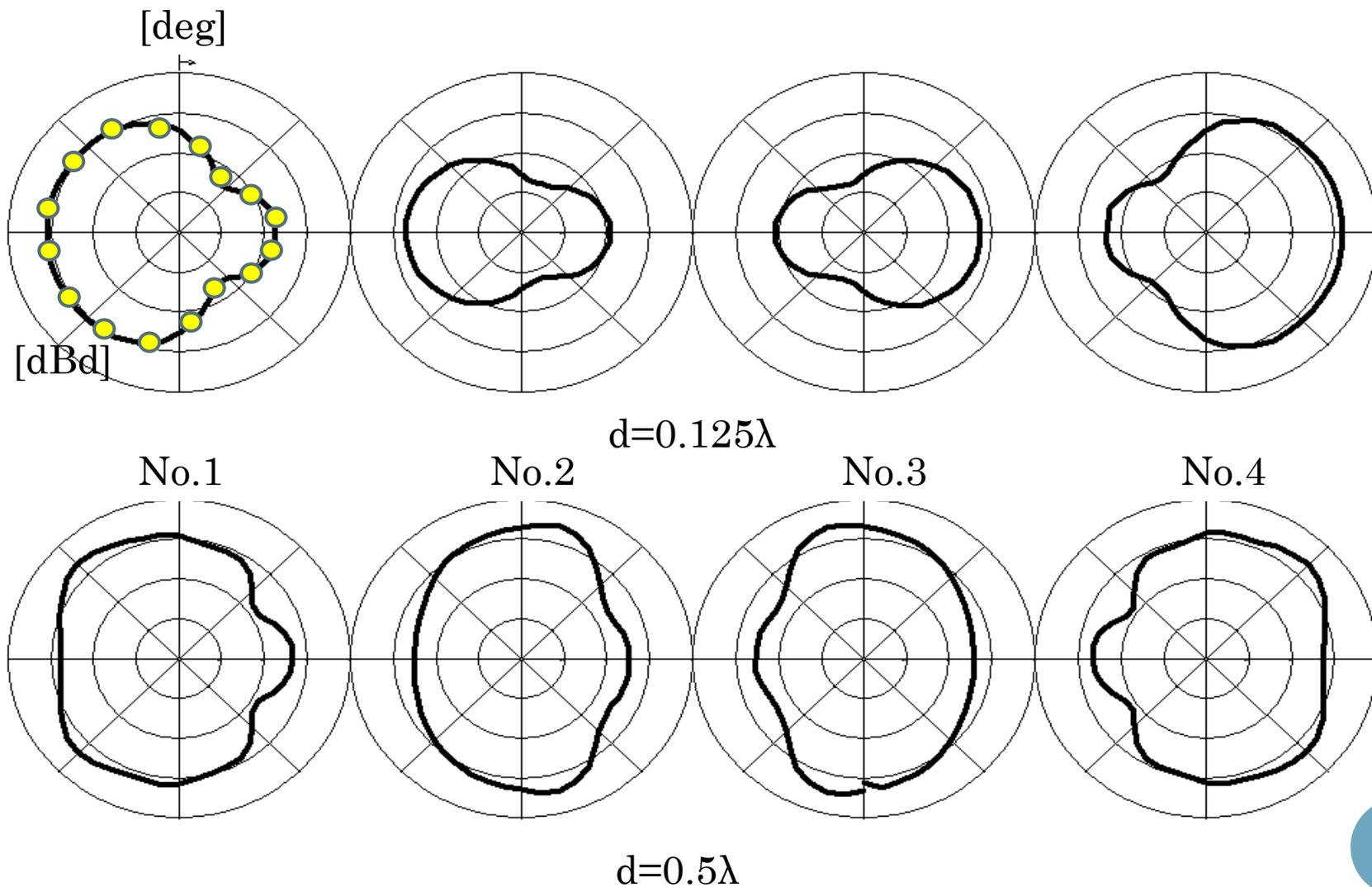
第1ステージでのアンテナパターン測定



アンテナ放射パターン(単体アンテナの場合)



アンテナ放射パターン(アレーの場合)



第2ステージでのシミュレーション評価

- ◆ 狭帯域信号を対象に
- ◆ 実現すべきチャネルモデル:i.i.dレイリーフェージングチャネル
- ◆ 固有値特性と通信路容量を評価する

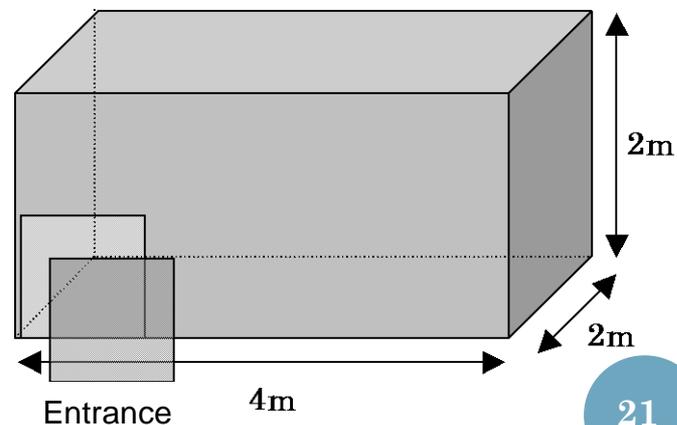
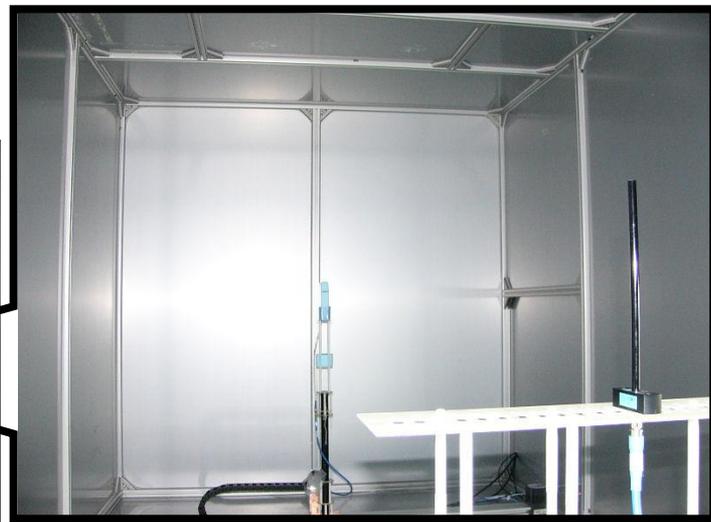
シミュレーションパラメータ

MIMOシステム	2×2	2×4, 4×2, 4×4
プローブアンテナ本数 L	8	16
搬送波周波数 f_c	40MHz	40MHz
シンボル周波数 $1/T_s$	40MHz	40MHz
正規化最大 ドップラー周波数 $f_D T_s$	0.01	0.01
チャンネル行列サンプル数	1000000	1000000
受信アンテナ間距離 d	0.125 λ , 0.25 λ , 0.5 λ , 1 λ	0.125 λ , 0.25 λ , 0.5 λ , 1 λ

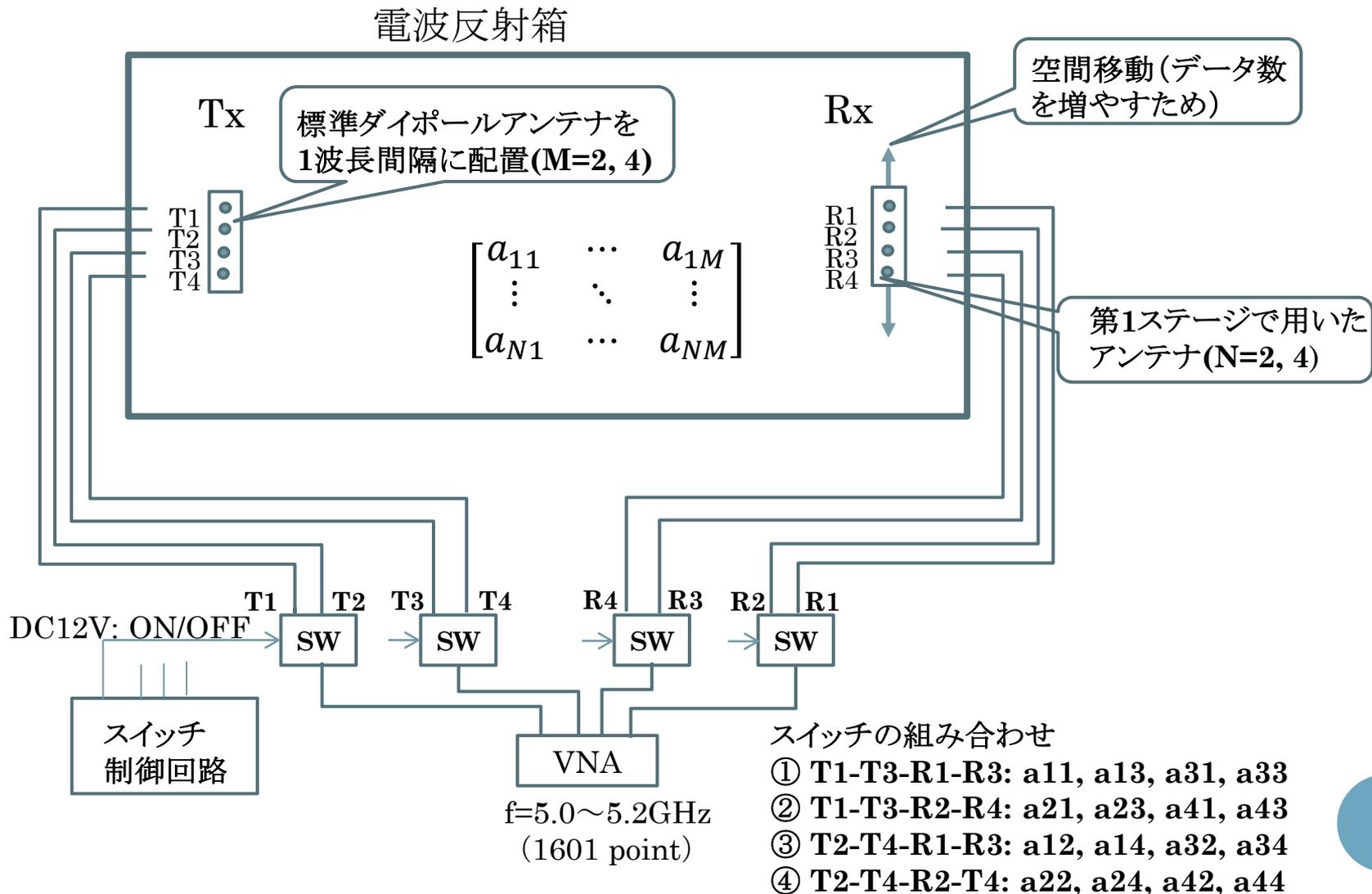
※ λ :波長

電波反射箱を用いた検証用データ取得

4(m)x2(m)x2(m)サイズの電波反射箱



電波反射箱を用いた検証用データ取得



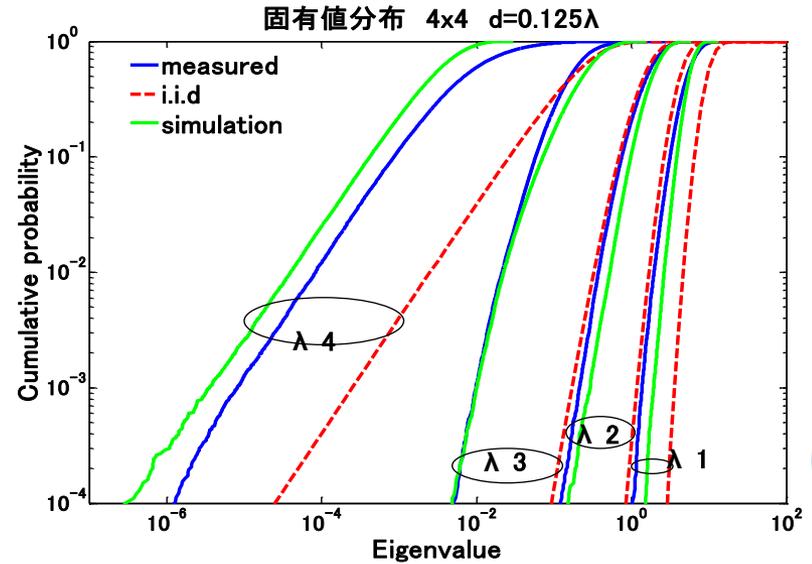
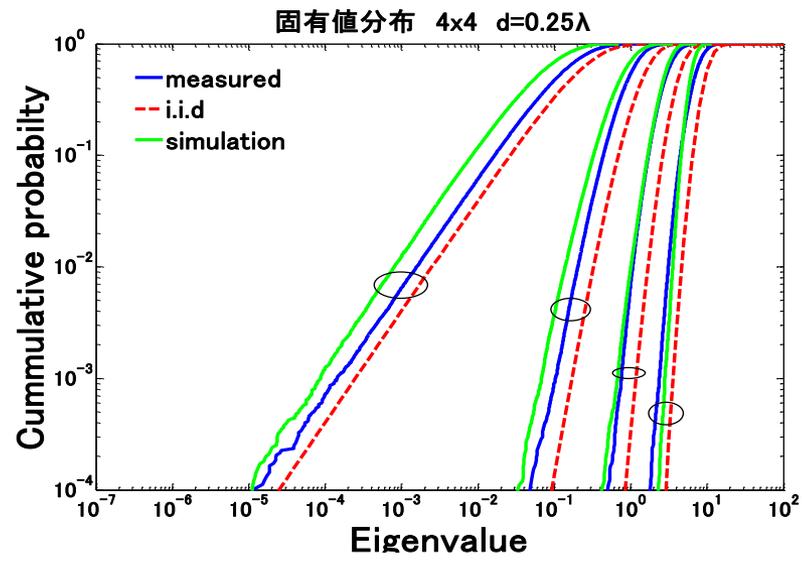
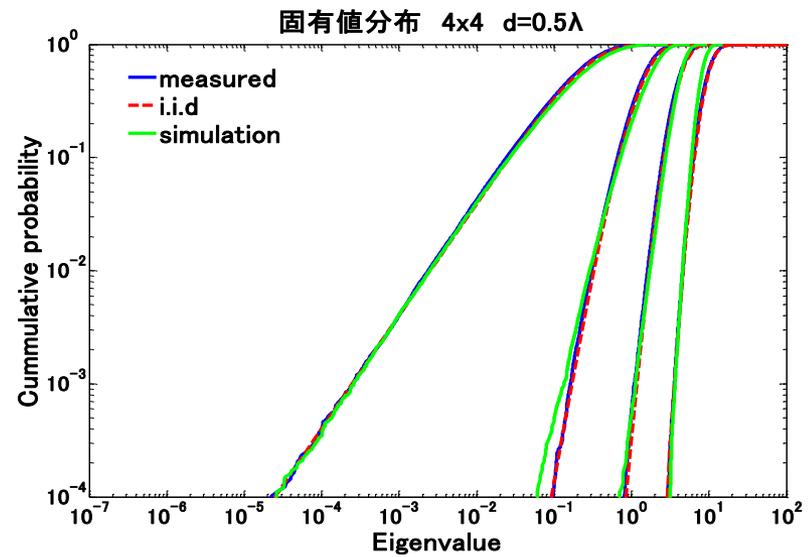
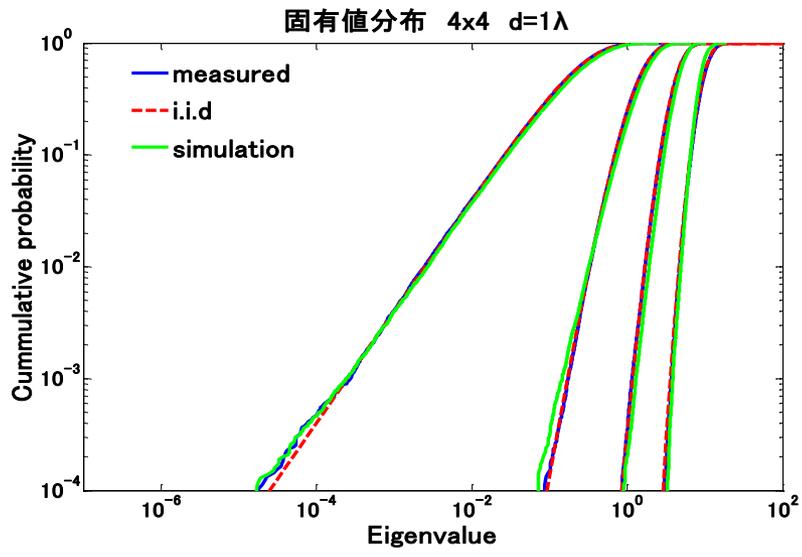
電波反射箱を用いた検証用データ取得

- 2×2 、 2×4 、 4×2 、 4×4 のシステム
- 受信アンテナ間隔が 0.125λ 、 0.25λ 、 0.5λ 、 1λ
- $5.0 \sim 5.2\text{GHz}$ の 200MHz 帯域幅で、 125KHz 間隔に、 1601 ポイント
- 空間方向 $\pm 1.5\lambda$ 、 0.05λ 間隔で移動
- 周波数軸と空間軸の両方で約 10 万点のデータ
- 固有値特性と通信路容量を求める

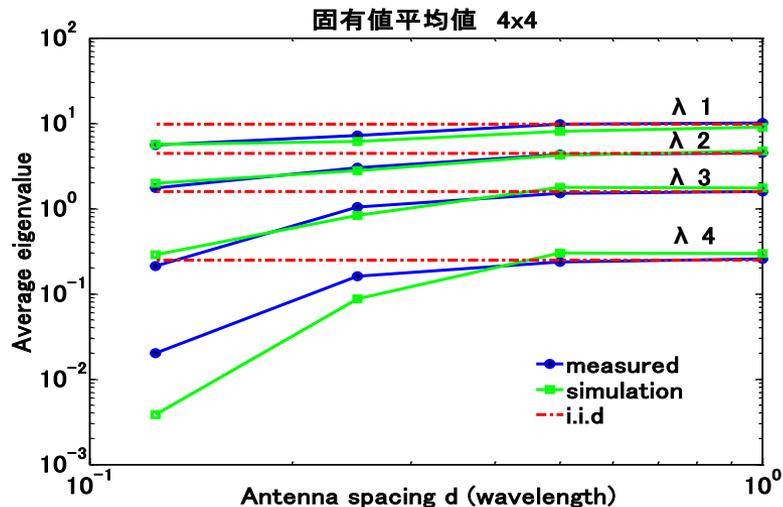
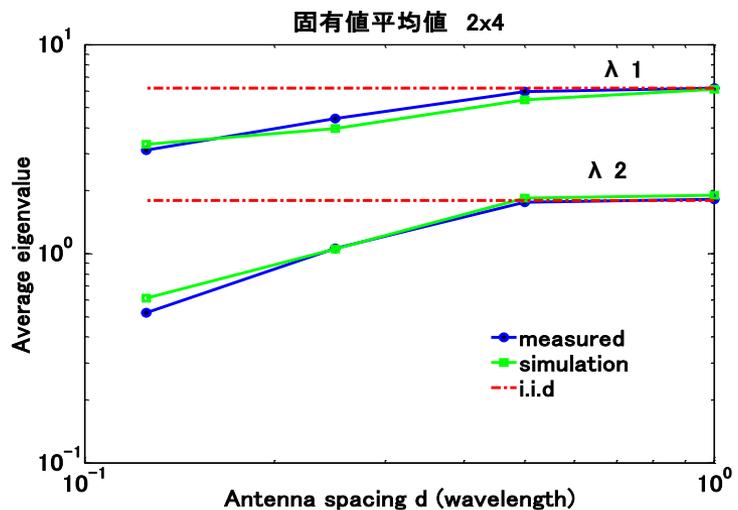
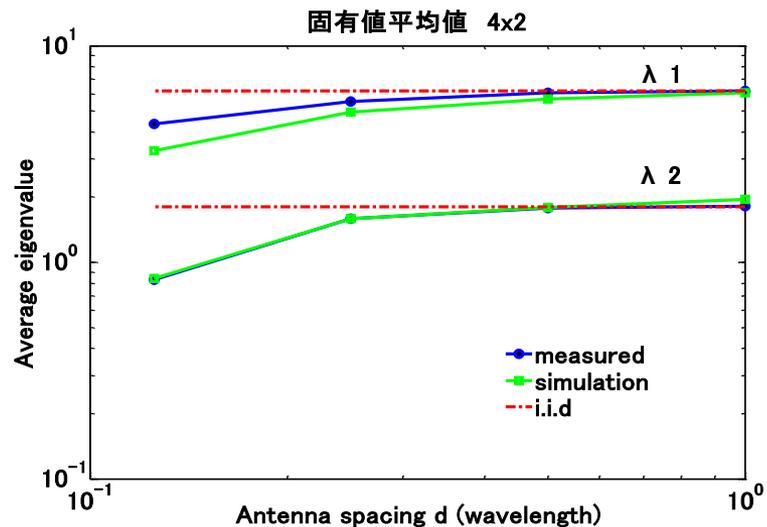
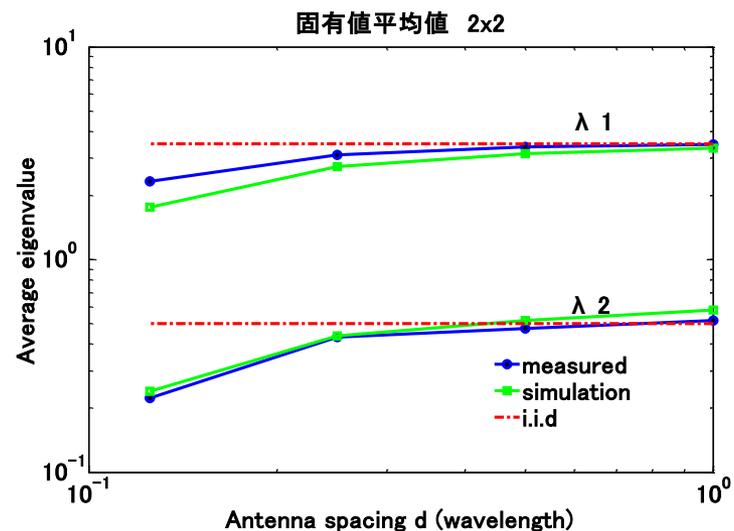
シミュレーション結果と実測結果との比較

- ◆ 固有値の累積確率分布、固有値の平均値、通信路容量の平均値について
- ◆ 2ステージ法シミュレーション値と電波反射箱での測定値とi.i.d理論値との比較

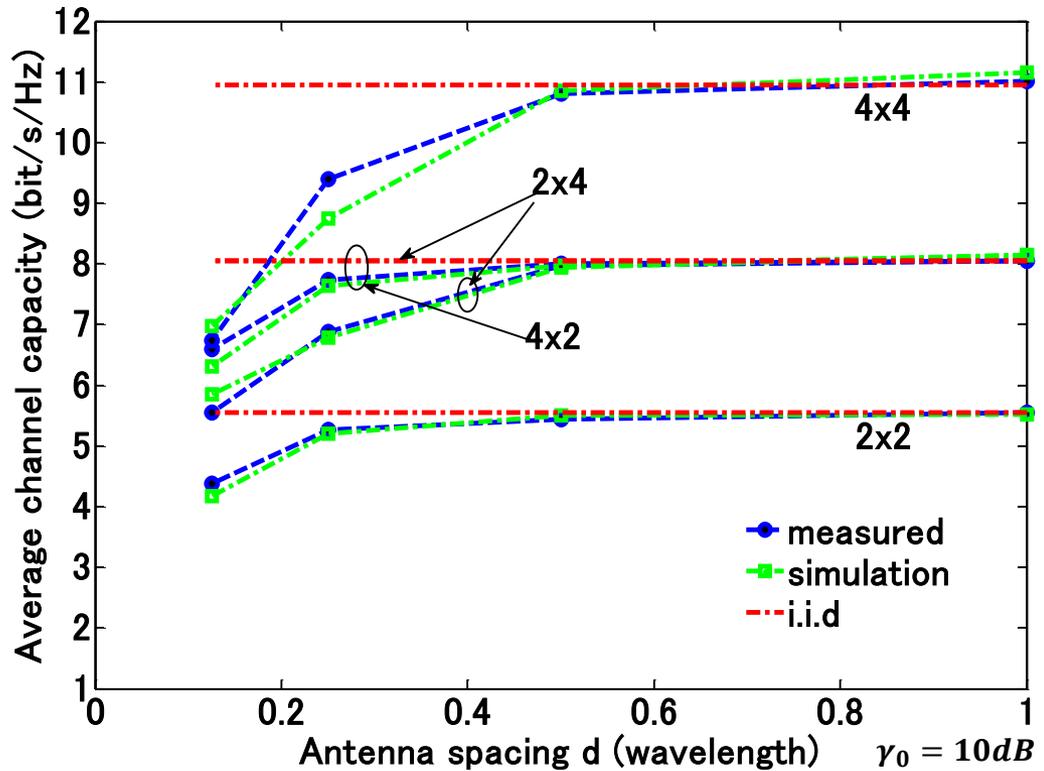
4×4MIMOの固有値の累積確率分布の比較



アンテナ間隔ごとの固有値平均値の比較



アンテナ間隔ごとの通信路容量の平均値の比較



比較の結果

- ◆ アンテナ間隔が小さくなるほど、カップリング影響が大きくなる原因で、固有値と通信路容量が低下する
- ◆ シミュレーション値は実測値と近い結果であった
- ◆ 2ステージ法はアンテナパターンが分ければ、特性を精度よく推定できる

まとめ

2ステージ法による簡易型MIMO-OTA評価システムの構成とシミュレーション手法を示した

- ◆ 提案手法の応用として、アンテナカップリング時の特性評価をシミュレーションで行った
- ◆ シミュレーション結果を検証するため、マルチパス環境を実現する電波反射箱での測定を行った
- ◆ 提案方式はアンテナパターンがわかれば、チャネル特性を精度よく推定できる
- ◆ 今回はFPGA実装前の動作確認であるが、2ステージ法の計算機シミュレーション自体でも、1つの評価手段として有効である。