



第 535回URSI-F会合
(H21.06.19)

MIMO端末特性評価のための 電波環境構築法に関する考察と提案

唐沢 好男
電気通信大学



発表の内容

- MIMO端末性能評価環境の必要性
- マルチパス環境生成法の分類
 - ー 計算機シミュレーション(ソフト)
 - ー フェージングシミュレータ(ハード)
 - ー 電波反射箱 (Reverberation Chamber)
 - ー フェージングエミュレータ
- フェージングエミュレータ構成に関する考察
- 電波反射箱型構成に関する考察
- ハイブリッド方式の提案



MIMOの研究動向

- 情報伝送方式
 - システム応用
 - 装置開発(基地局、端末)
- かなり、
研究開発が
進んできた
- **MIMO端末特性評価環境構築と測定法**

ニーズが高まってきている
まだ、研究が薄い
標準測定法の必要性



目的: MIMO端末の実環境を模擬した特性評価法の確立
(特性評価のためのマルチパス環境生成法)

対象: LTE, WiMAX, WLAN等のMIMO端末

測定したい項目: マルチパスリッチ環境でのMIMO伝送特性

- 基本伝送特性(固有値分布、チャネル容量、BER)
- アンテナカップリングの影響(空間相関を含む)
- 交差偏波特性(XPD)、偏波ダイバーシチ
- 広帯域伝送(OFDMのGIを超える遅延広がり)
- fast fading環境での動的特性



マルチパス環境の生成

→ 計算機シミュレーション
(ソフトウェア)

→ フェージングシミュレータ
(ハードウェア)

→ 電波反射箱
(Reverberation Chamber)

→ フェージングエミュレータ

長所(○)と短所(●)

- 容易・安価
- 実測特性を取り入れれば
かなりなことができる
- 実機評価ができない
- 測定が容易
- 伝送方式の評価に適している
- アンテナカップリング、筐体の影響
など、端末性能の総合評価が難しい
- 安価に構築、簡易に測定
- 周波数選択性フェージング環境生成
- パラメータ値の制御が難しい
- 動的な変動の生成が困難
- 動的フェージング環境の生成
- 角度特性の制御が容易
- 遅延波の生成の自由度が不足
- 環境構築が高価

決定版と言える安価なMIMO評価環境はまだ世の中にない！！



移動通信の電波伝搬の特徴

- ・3つの量のスプレッド
- ・3つの量の選択性
- ・3つの量の相関特性

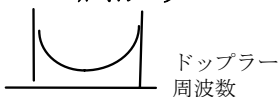
自己相関

対策

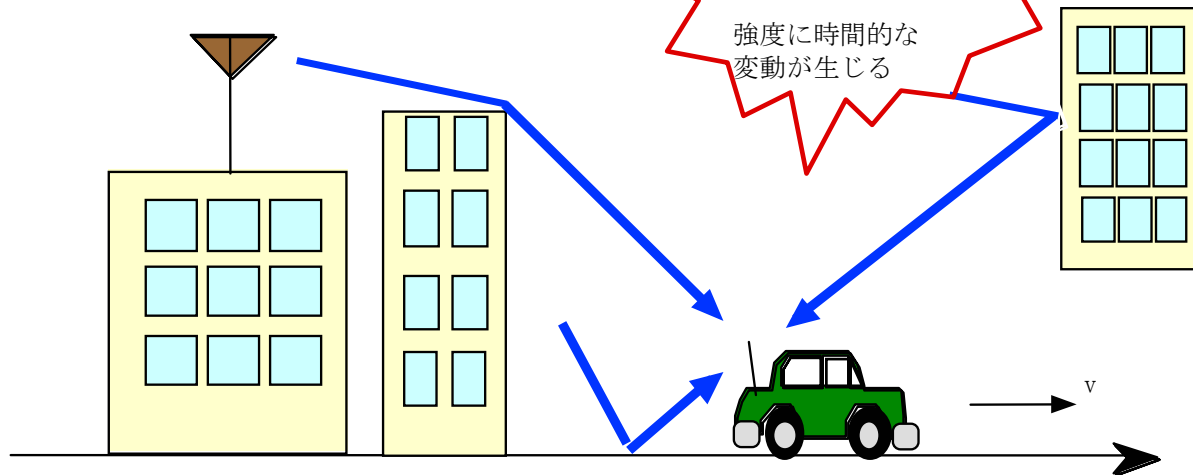
時間インターリーブ
時間ダイバーシチ

時間の
選択性

ドップラーの
広がり



強度に時間的な
変動が生じる



空間相関

対策

スペースダイバーシチ
アダプティブアレー

場所の
選択性

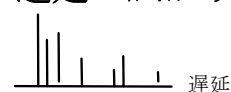
到来角度の広がり



空間に強弱のパ
ターンができる

周波数の
選択性

遅延の広がり



波形の歪みが
生じる

周波数相関

対策

波形等化
アダプティブアレー
通信方式
(CDMA, OFDM, ...)

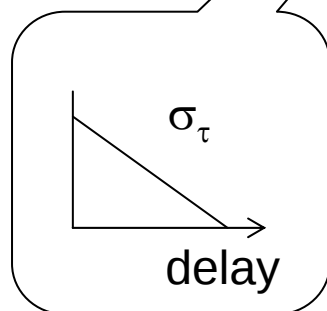
端末側に実現したい電波環境 (レイリーフェージング環境)

SISO, SIMO評価の場合

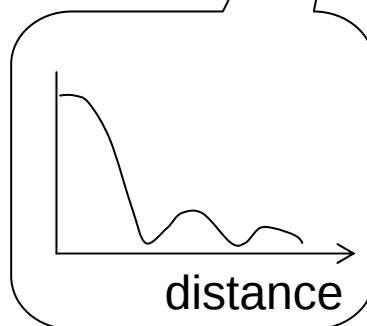
携帯端末

- ・一定のエリア内に環境を実現できる
- ・伝搬特性が制御できる

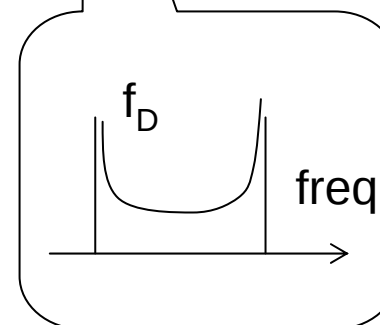
遅延特性



空間相関特性

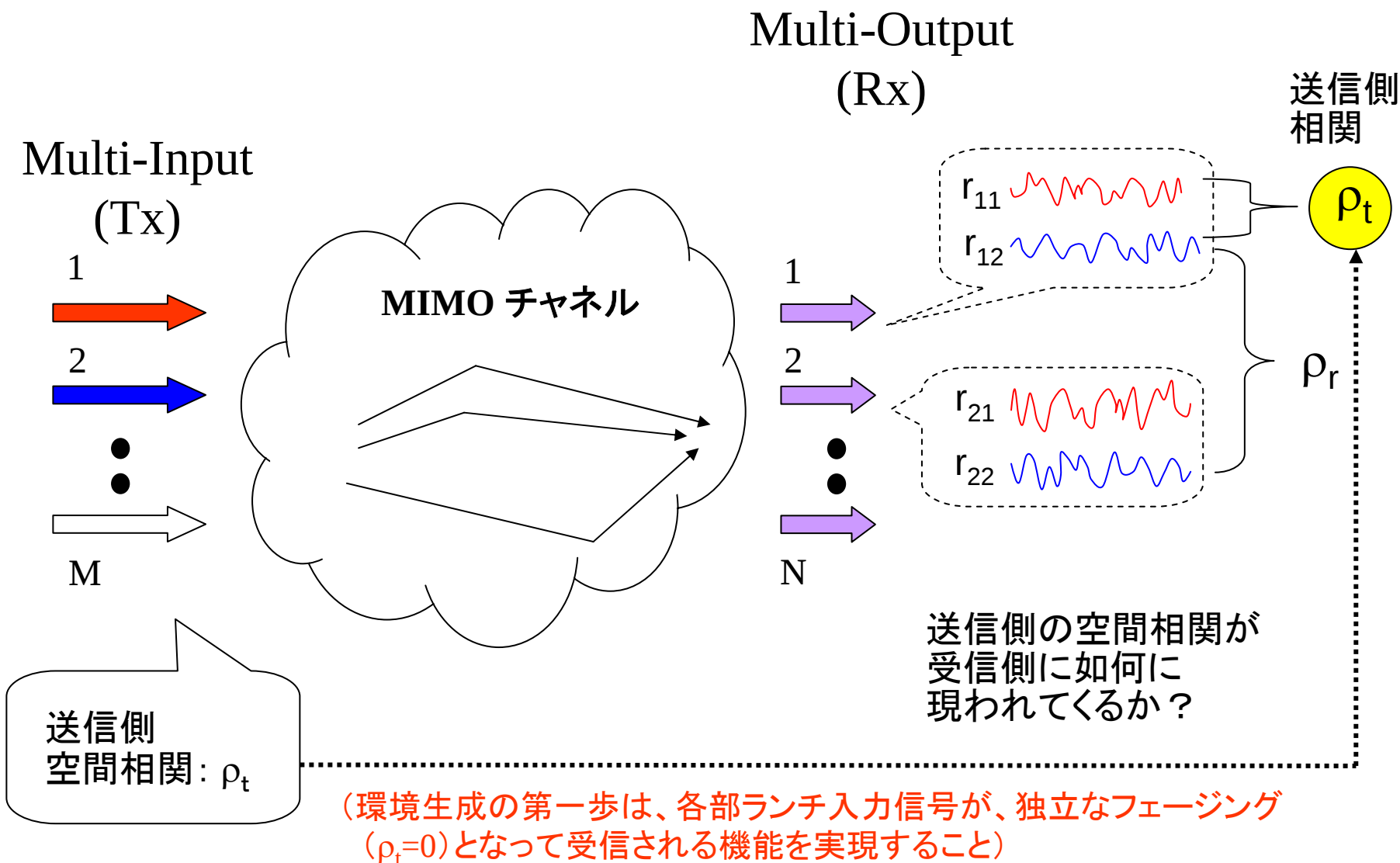


時間変動特性





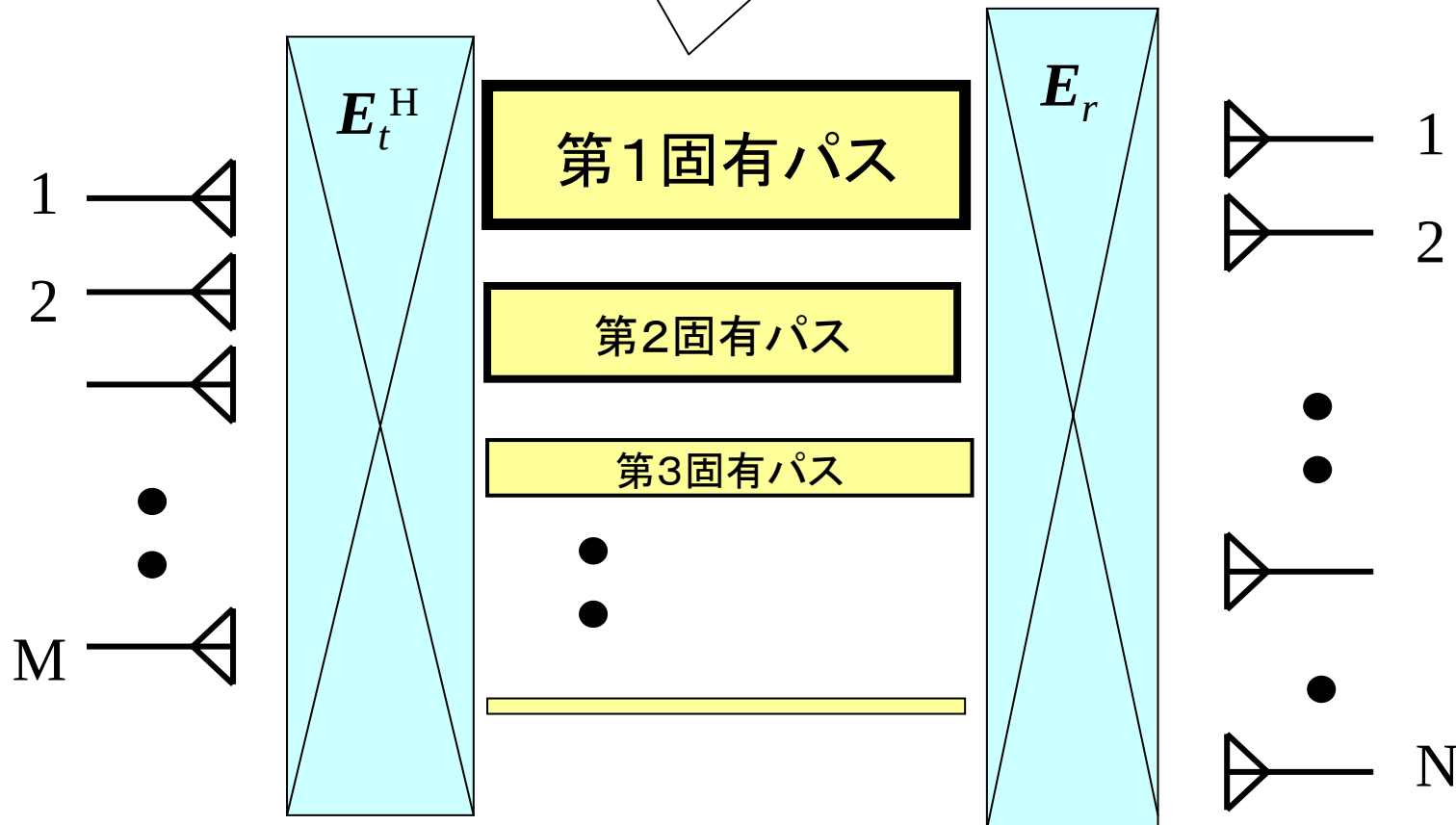
SISO/SIMO評価からMIMO評価へ





MIMOの端末評価環境として求められることとは？

各固有パスの統計的性質が、
目的どおりに実現できている
環境であるかどうか？





マルチパス環境の生成

→ 計算機シミュレーション
(ソフトウェア)

→ フェージングシミュレータ
(ハードウェア)

→ 電波反射箱
(Reverberation Chamber)

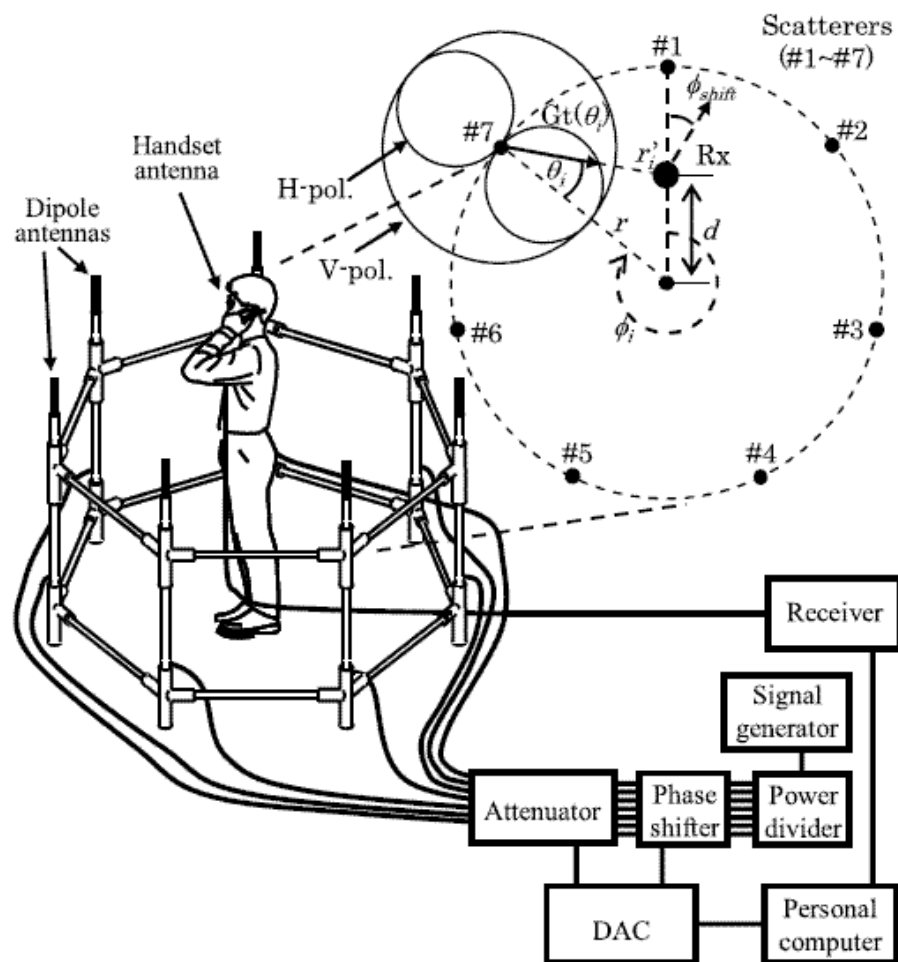
→ フェージングエミュレータ

長所(○)と短所(●)

- 容易・安価
- 実測特性を取り入れれば
かなりなことができる
- 実機評価ができない
- 測定が容易
- 伝送方式の評価に適している
- アンテナカップリング、筐体の影響
など、端末性能の総合評価が難しい
- 安価に構築、簡易に測定
- 周波数選択性フェージング環境生成
- パラメータ値の制御が難しい
- 動的な変動の生成が困難
- 動的フェージング環境の生成
- 角度特性の制御が容易
- 遅延波の生成の自由度が不足
- 環境構築が高価

実放射素子で測定点を囲みフェージング環境を構築(フェージングエミュレータ)

構築: パナソニック/東工大
(岩井他、信学論B, 2008.09)

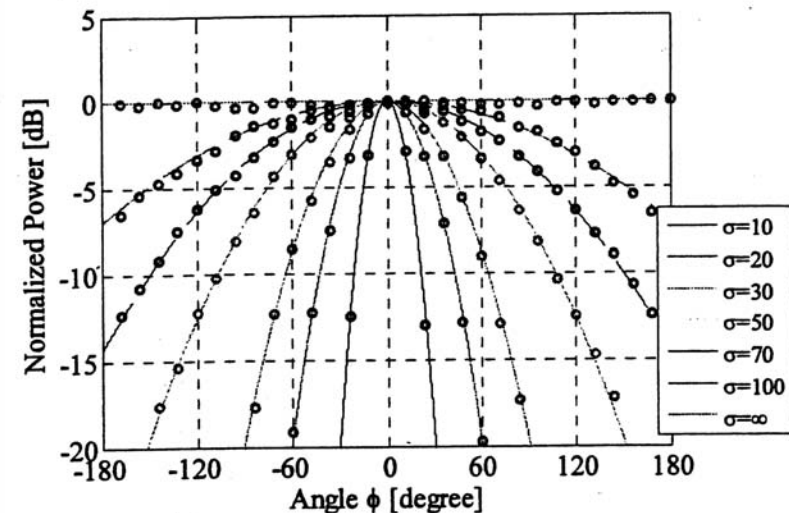
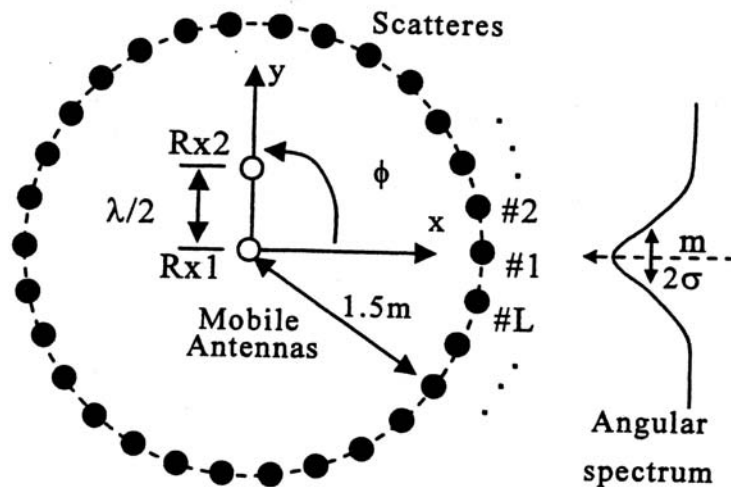


レイリーフェージングの環境生成
無変調波(狭帯域)
端末測定(MIMOではない)

図 1 空間フェージングエミュレータの構成
Fig.1 Configuration of the spatial fading emulator.

実放射素子で測定点を囲みフェージング環境を構築(フェージングエミュレータ)

構築例2: パナソニック (坂田他、AP研2008年4月)



基本構成は、構成例1に同じ

アンテナ数を増やし角度スペクトルを可変できるようにした(散乱体数: 30本)

周囲の散乱体をMIMOの送信源として見立て、 $M \times 2$ のMIMOチャネルのモデルとして固有値やチャネル容量を求めているが、MIMOの伝搬物理現象とは異なる扱い(情報を乗せた解析を行いたい場合にはどうするのが見えない)



散乱体用アンテナの配置問題(無指向性アンテナで受信の場合) (到来角度設定問題)

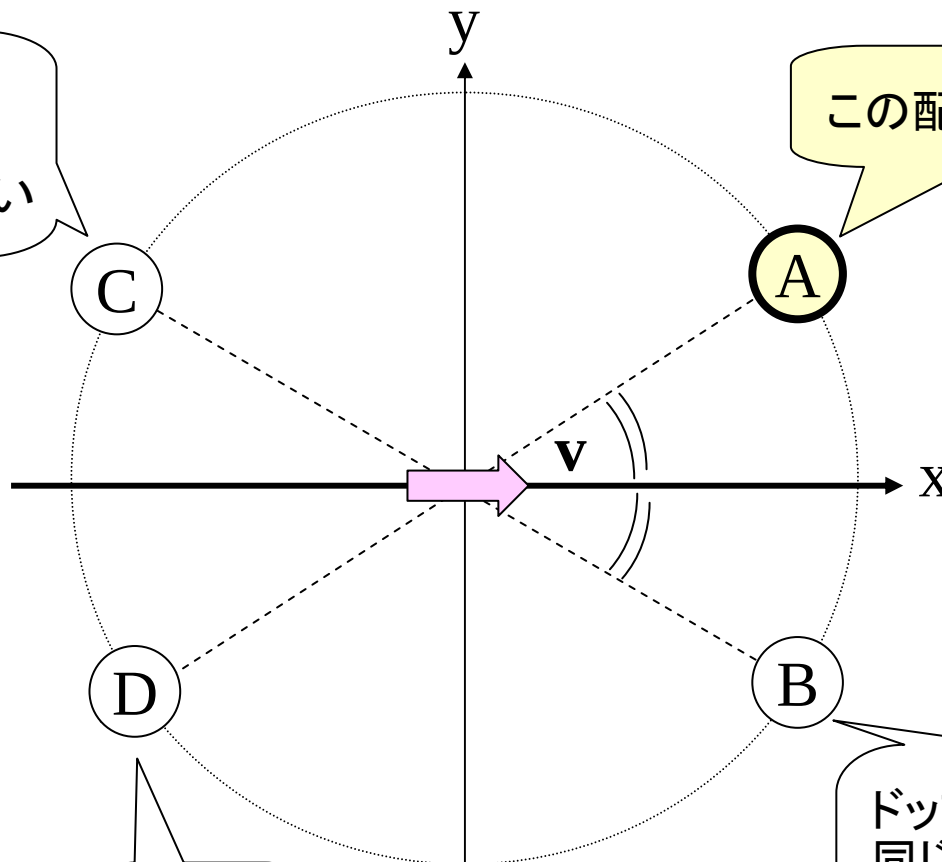
虚数部がAとCで
キャンセルされ
位相回転が生じない

この配置に対して

x軸の左右対称に置かない
(偶数本、奇数本配置とも)

y軸の左右対称に置かない
(偶数本配置)

よくない配置
(本数が少ないとき):
偶数本の等間隔配置

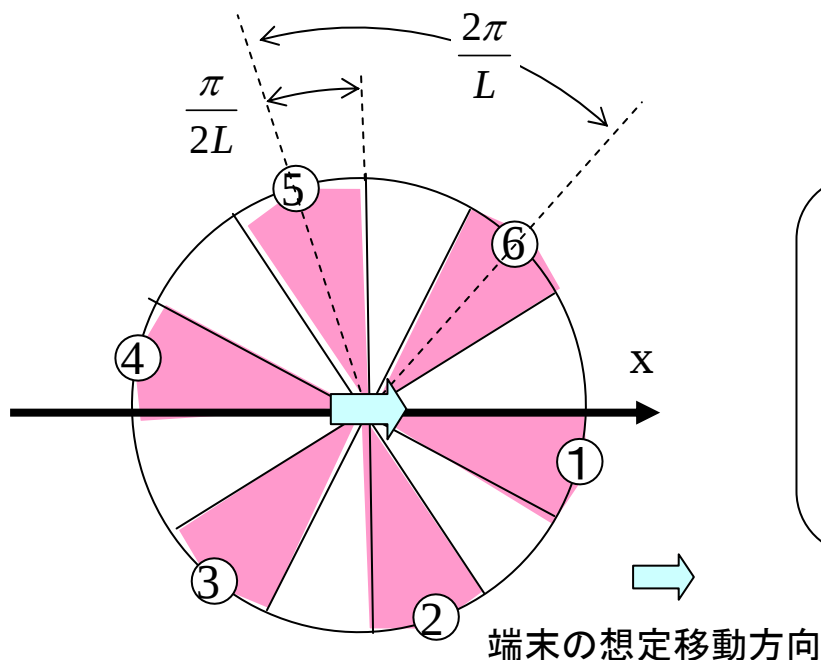


Cに同じ

ドップラーシフトが
同じなので
Aと同じ場所に
置いたことになる



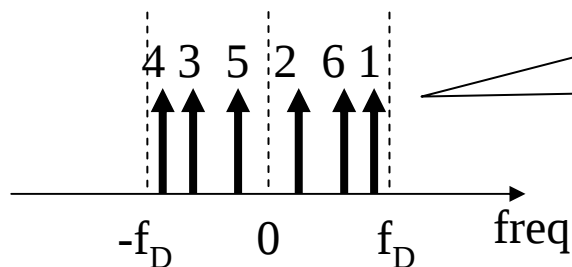
最適と思われる構成イメージ



散乱体アンテナ実配置(○)と
仮想位置(ピンクのエリア)

- 1) x軸に対して角度オフセットを与える
($\pi/2L$)
- 2) ピンクのエリア内で乱数により
配置(*)を決定する

*) 実際の位置ではなく、ドップラー周波数設定

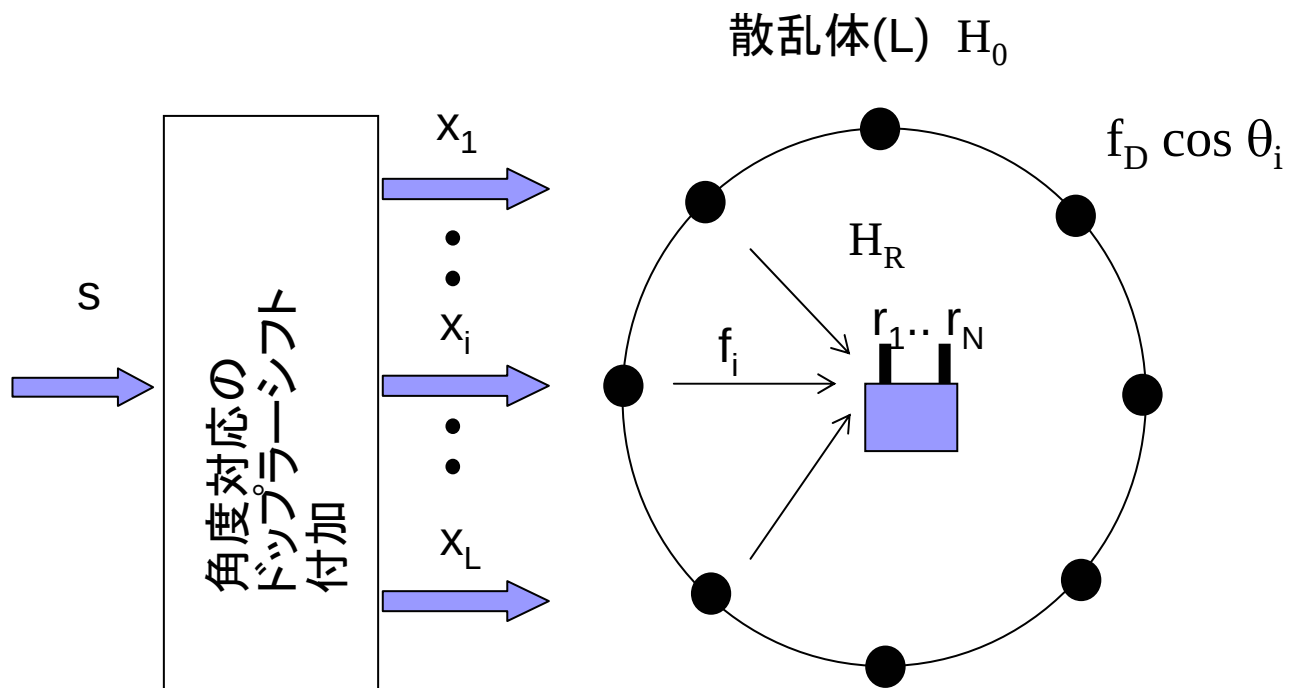


生成されるドップラー
周波数の中心位置
($L=6$ の場合)



SISO/SIMO評価からMIMO評価へ

SISO/SIMO評価では

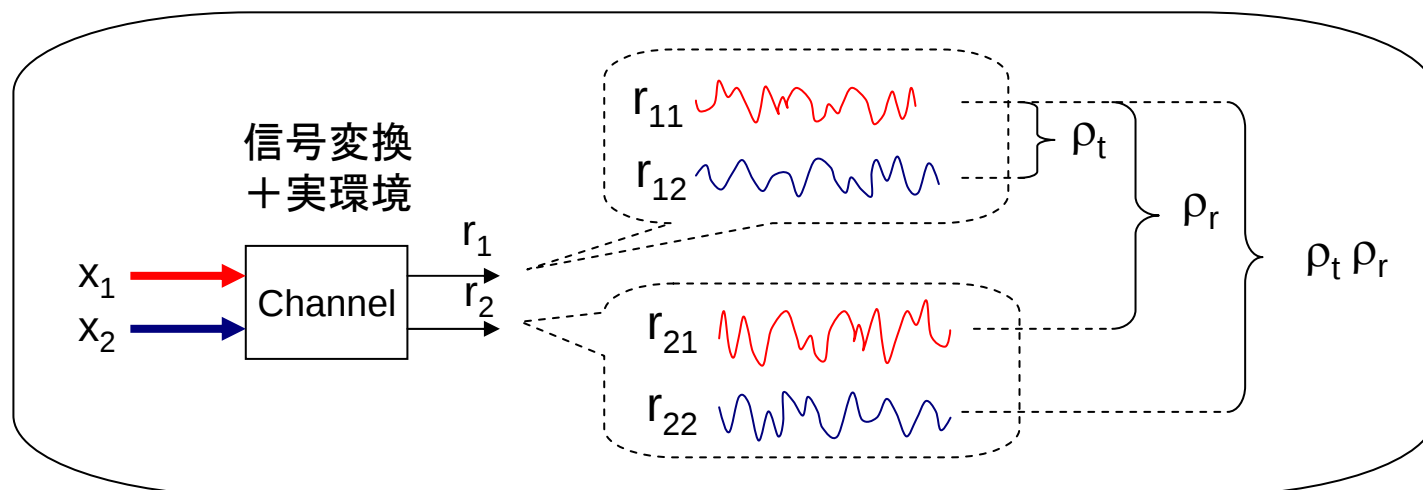




SISO/SIMO評価からMIMO評価へ

送信側の空間相関が
受信側に如何に現われてくるか？

MIMO
評価では



TXアンテナ出力
(IQ信号)

s_1

s_2

変換
Matrix

H_T

?

x_1

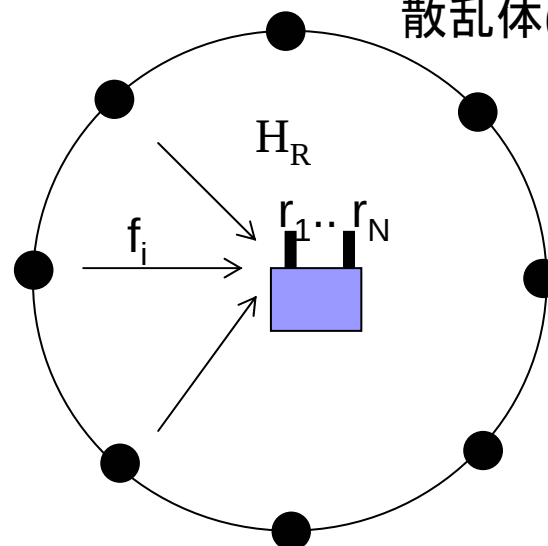
$\vdots$

x_i

$\vdots$

x_L

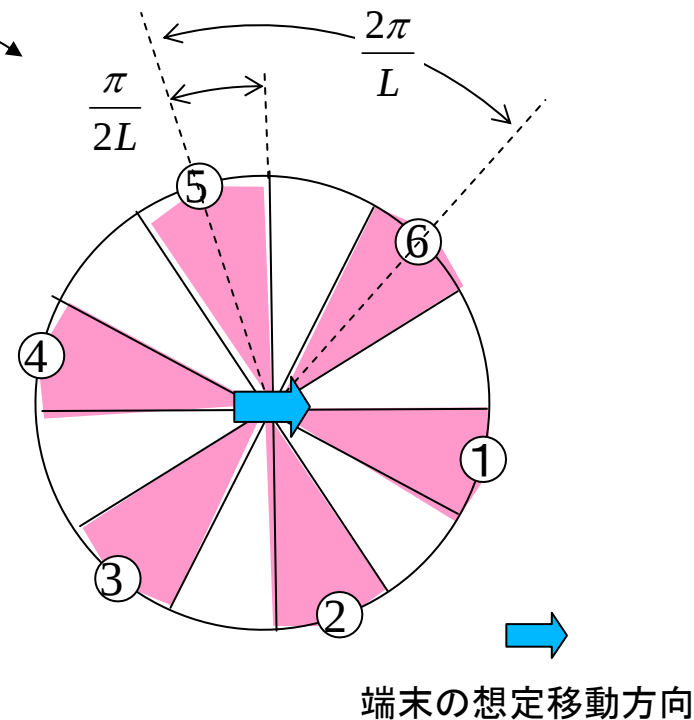
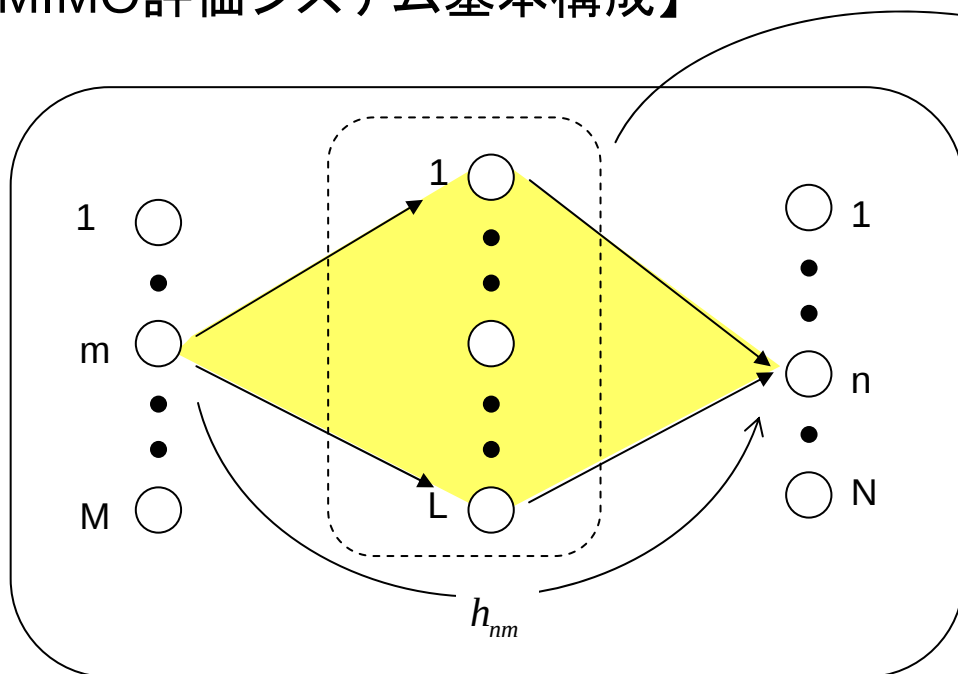
散乱体(L) H_0





検討課題

【MIMO評価システム基本構成】



検討事項

- 1) L の数は M, N に対していくつであれば十分か？ (固有値分布、チャネル容量など)
- 2) 遅延広がりのある環境をどのように作ってゆくか



マルチパス環境の生成

→ 計算機シミュレーション
(ソフトウェア)

→ フェージングシミュレータ
(ハードウェア)

→ 電波反射箱
(Reverberation Chamber)

→ フェージングエミュレータ

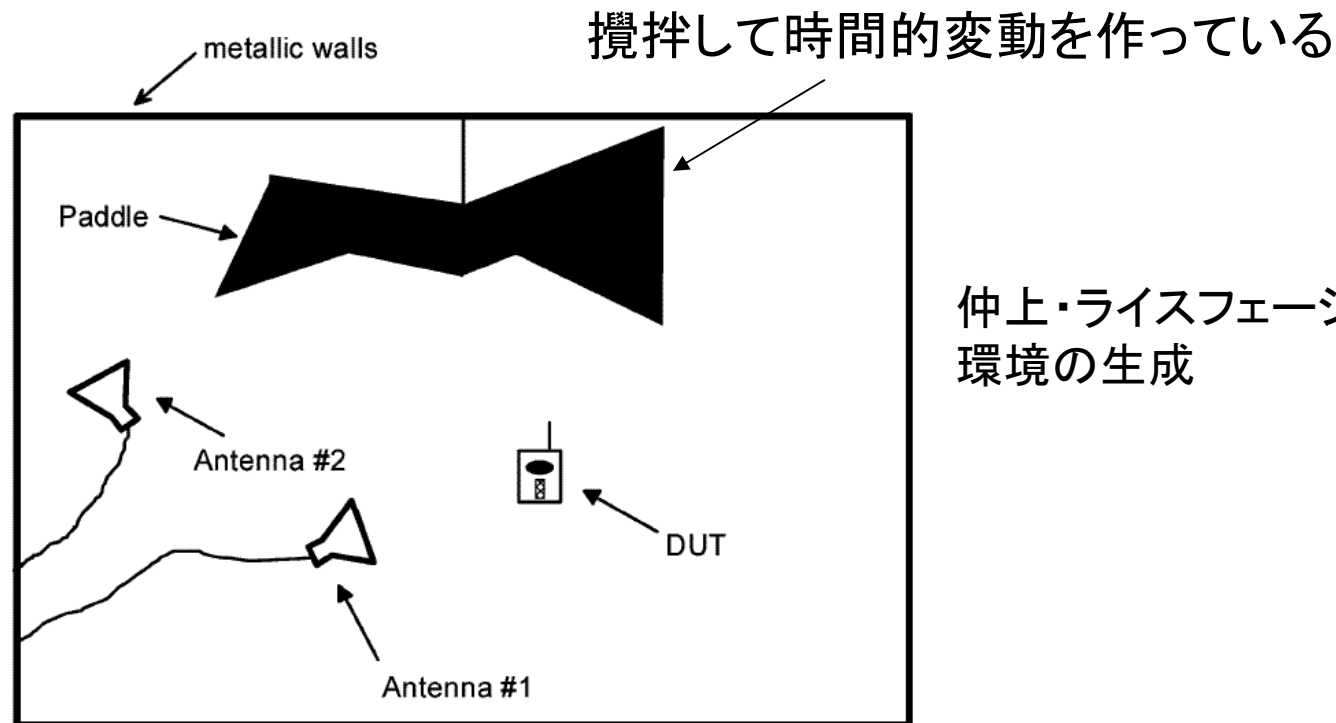
長所(○)と短所(●)

- 容易・安価
 - 実測特性を取り入れれば
かなりなことができる
 - 実機評価ができない
-
- 測定が容易
 - 伝送方式の評価に適している
 - アンテナカップリング、筐体の影響
など、端末性能の総合評価が難しい
-
- 安価に構築、簡易に測定
 - 周波数選択性フェージング環境生成
 - パラメータ値の制御が難しい
 - 動的な変動の生成が困難
-
- 動的フェージング環境の生成
 - 角度特性の制御が容易
 - 遅延波の生成の自由度が不足
 - 環境構築が高価

電波反射箱 (Reverberation Chamber: RC) の例

時間的に変化するマルチパス環境 (端末測定目的)

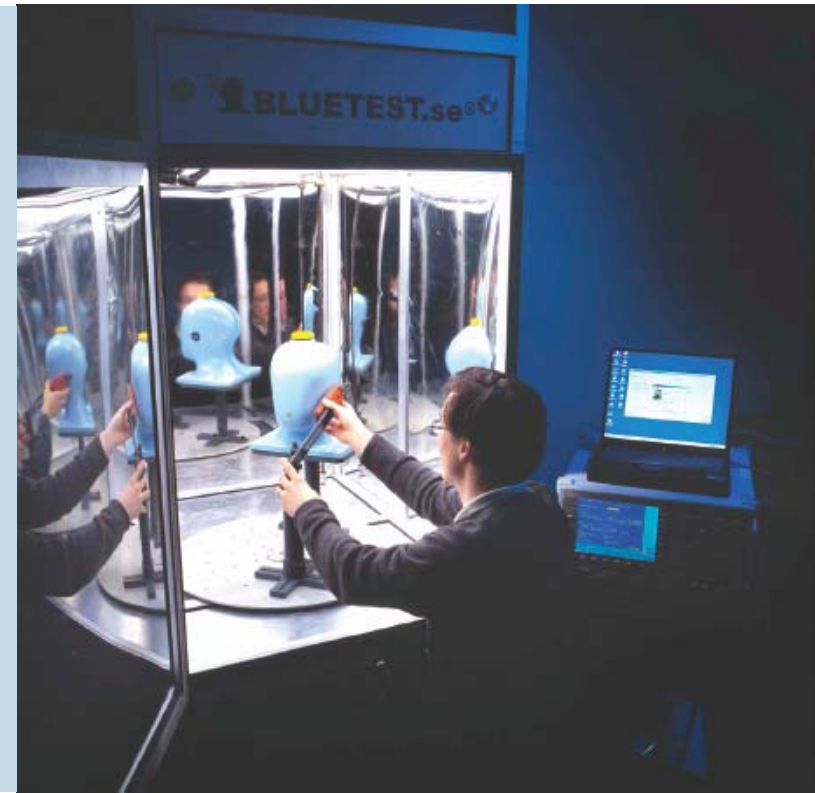
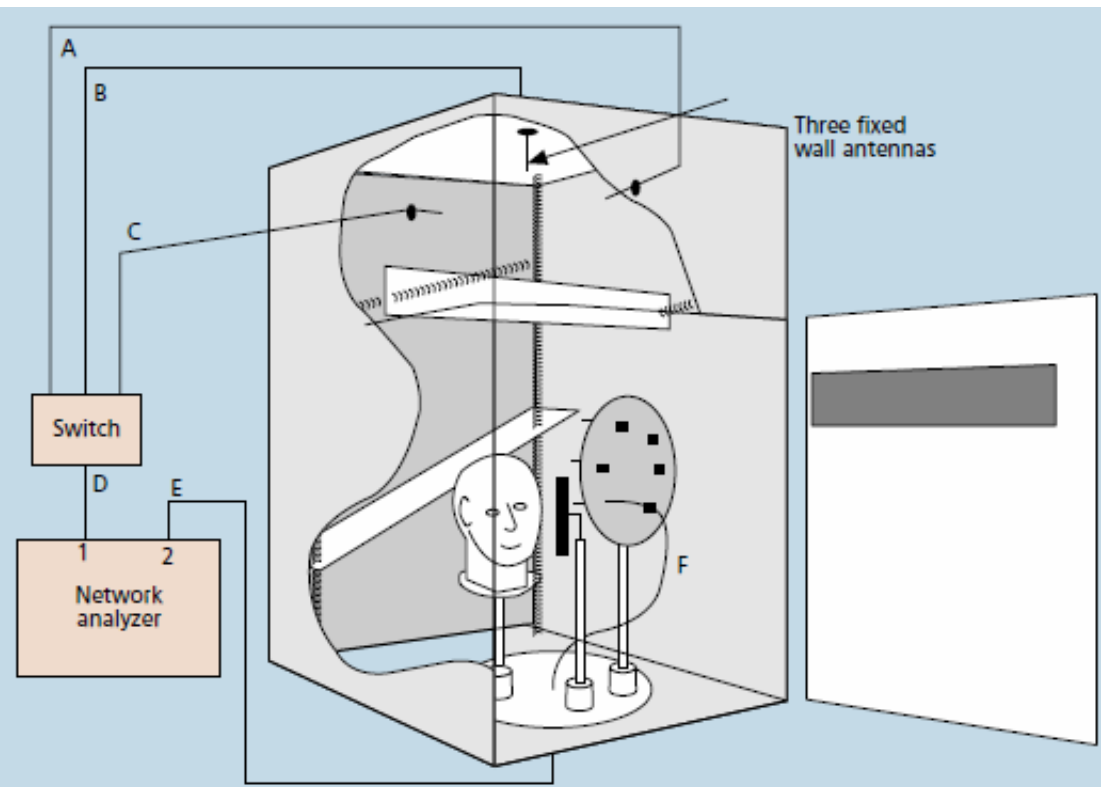
典型的な例:



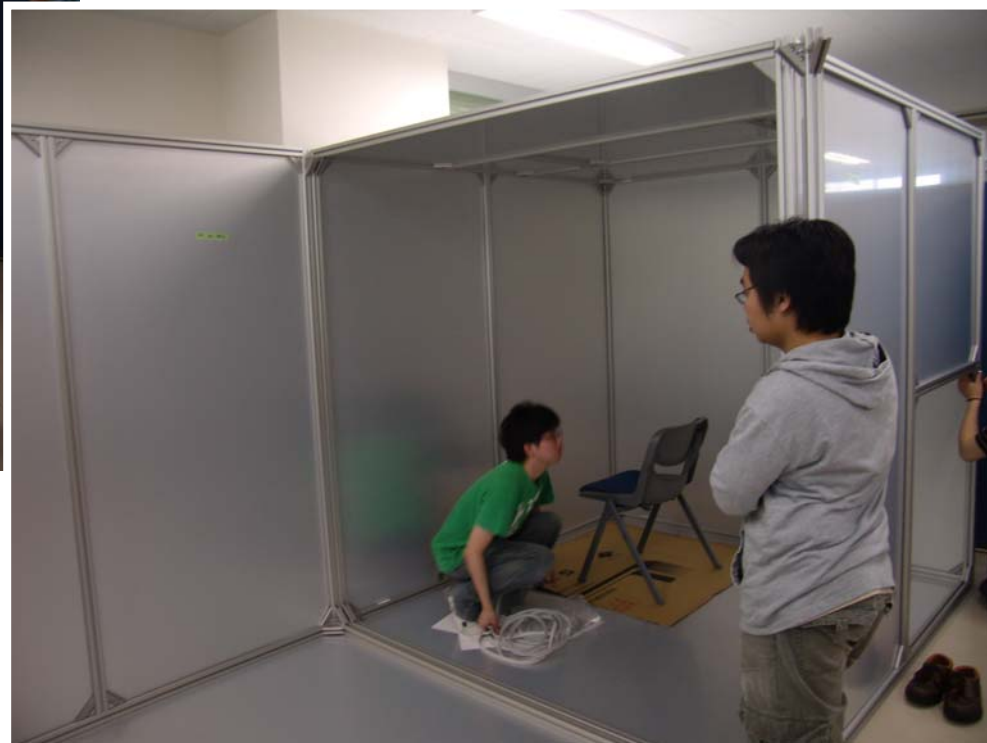
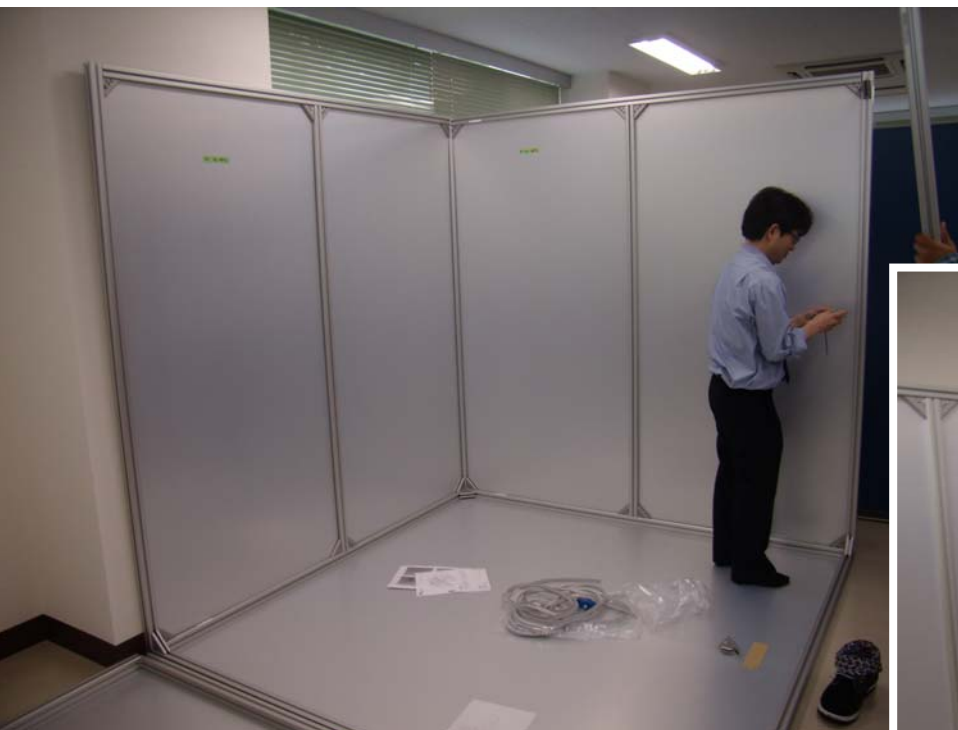
C. L. Holloway et al., IEEE Trans. AP, vol. 54, no. 11, 2006. (上の図)

P. Hallbjörner, Microwave & Optical Letters, vol. 35, no. 5, 2002. (上記と類似の構成)

Reverberation Chamber



電波反射箱(4m×2m×2m)を作ってみると？



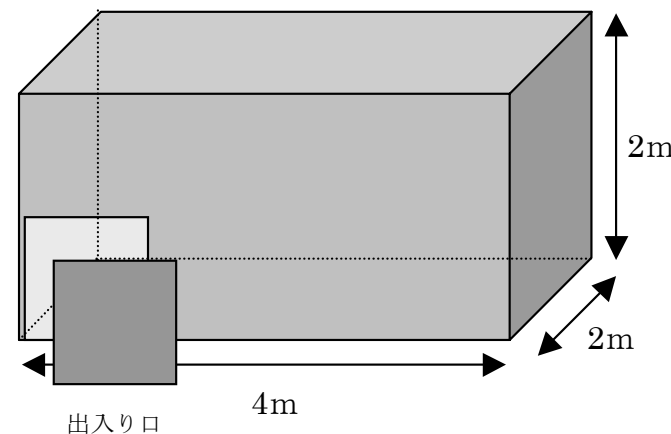
電波反射箱完成

全面鏡張りの部屋: 光の反射箱
全面金属壁の部屋: 電波の反射箱

アルミニウム製フレームと
アルミシート付樹脂板で構成

○簡易な構造

○安価で構築可能



電波反射箱内部の構成



反射箱内部に送信・受信アンテナを設置して使用。

(他の構造物は無し)

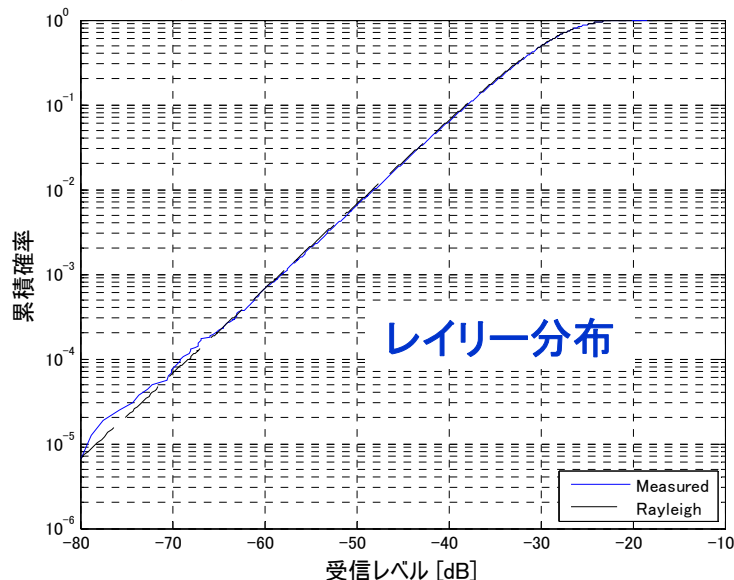
反射箱内部の伝搬環境特性は、大きさ・材質・構造(密閉度等)が大きく影響する。

→ 伝搬特性は反射箱固有の値になってしまう。

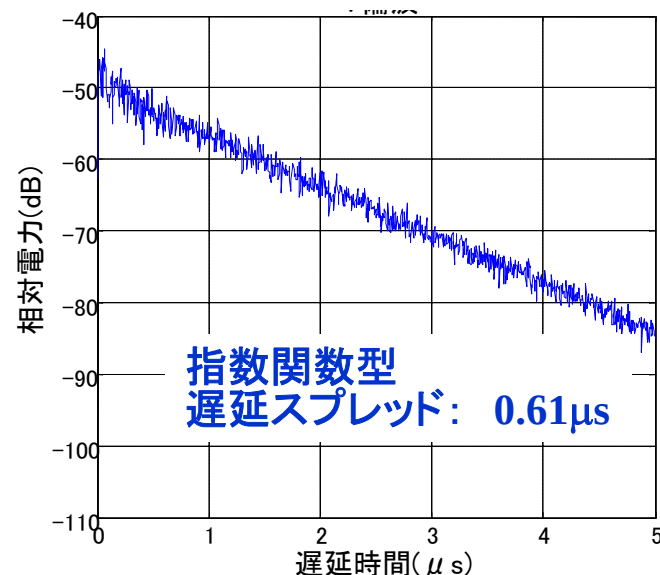


電波反射箱内の特性

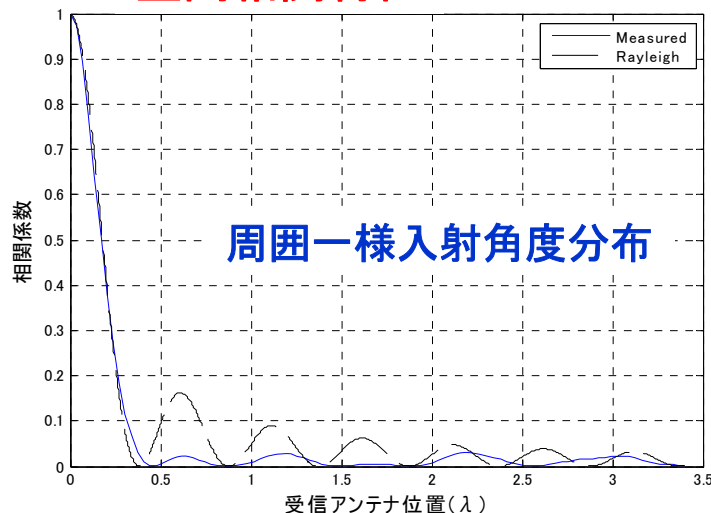
振幅の確率分布



遅延プロファイル



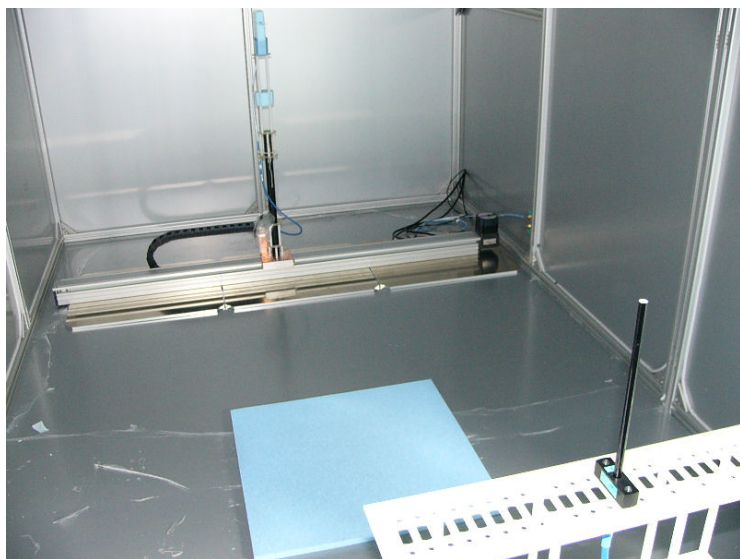
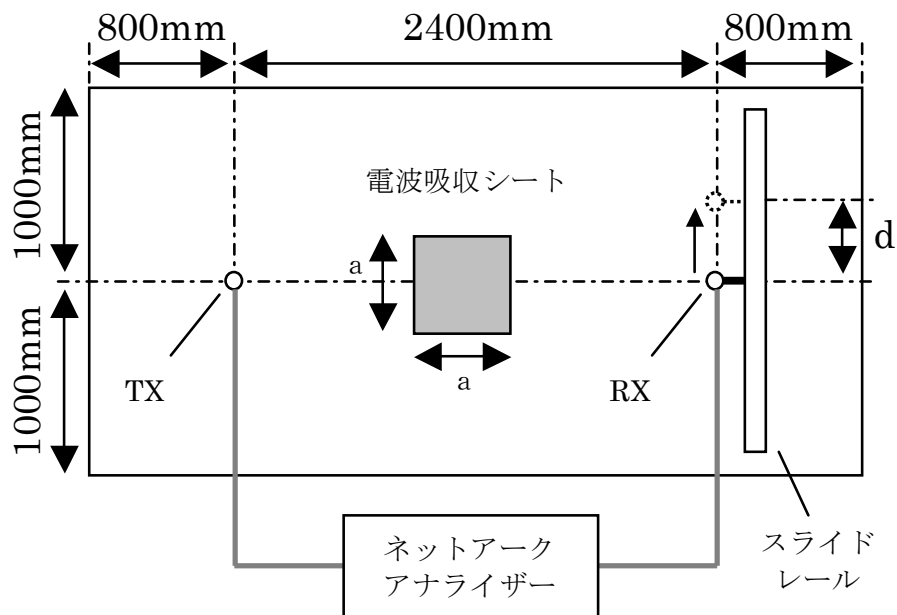
空間相関特性



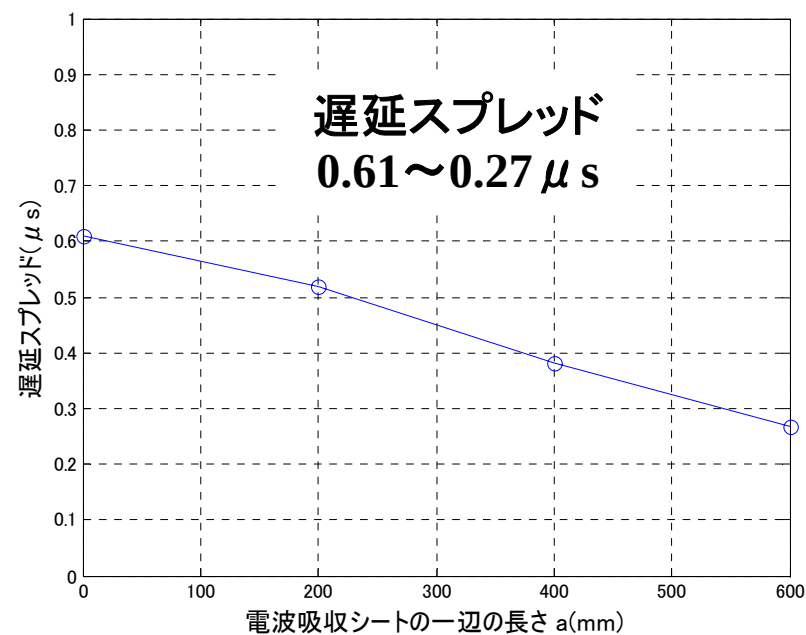
交差偏波特性: XPD=1.5dB

見通し(LOS)なのに、きれいな
レイリーフェージング環境が実現!!

→ 目的によっては十分機能を発揮



**電波吸収シートの設置による
伝搬遅延の制御**
(急所に一枚の電波吸収シートを置く)



遅延スプレッドを簡易に制御できる!!



- ・周囲からの、角度一様での到来
- ・遅延広がりのある環境

電波反射箱
(Reverberation Chamber)

フェージングエミュレータ

- ・動的変動環境

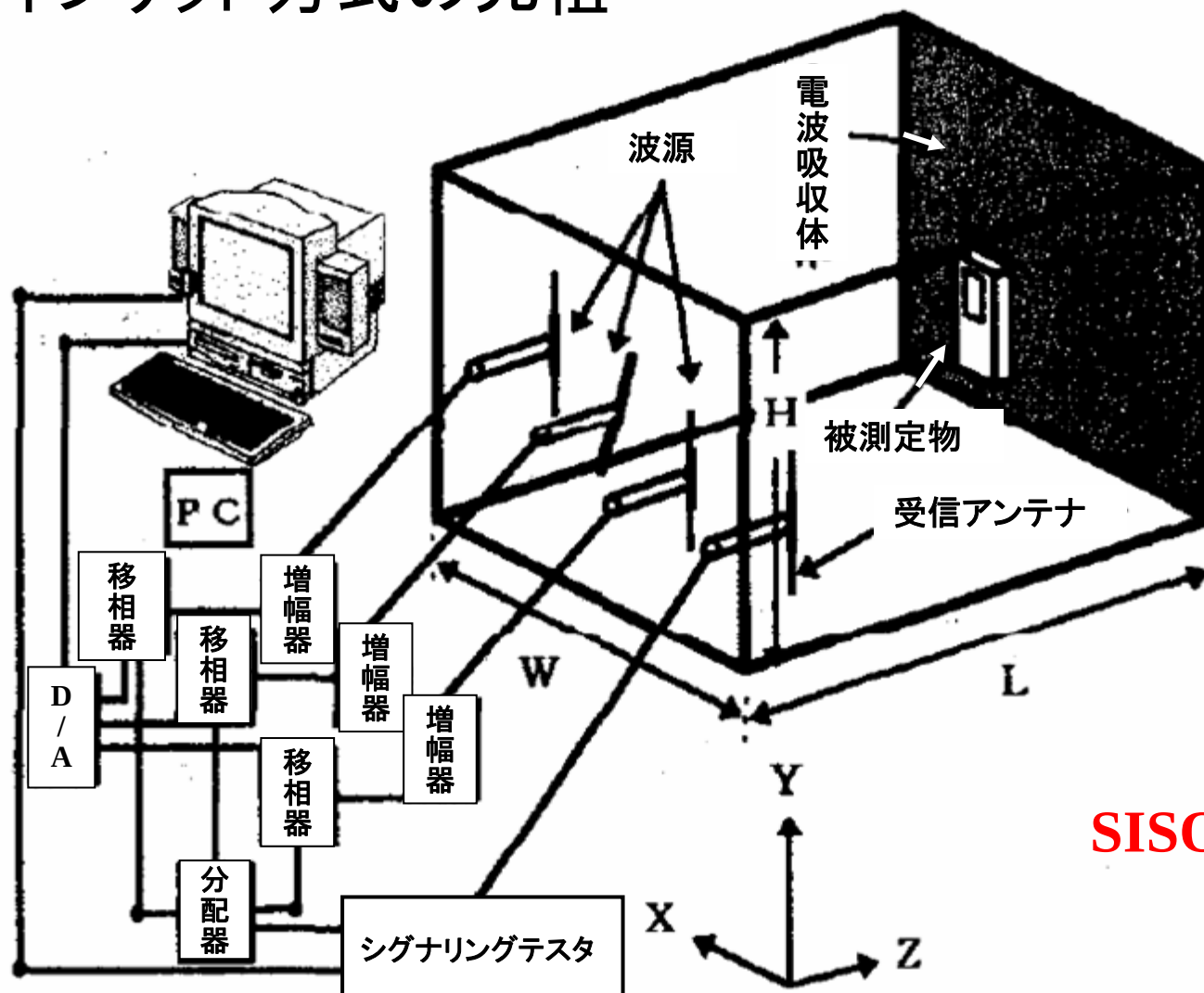
今回提案する測定環境

+

ハイブリッド型



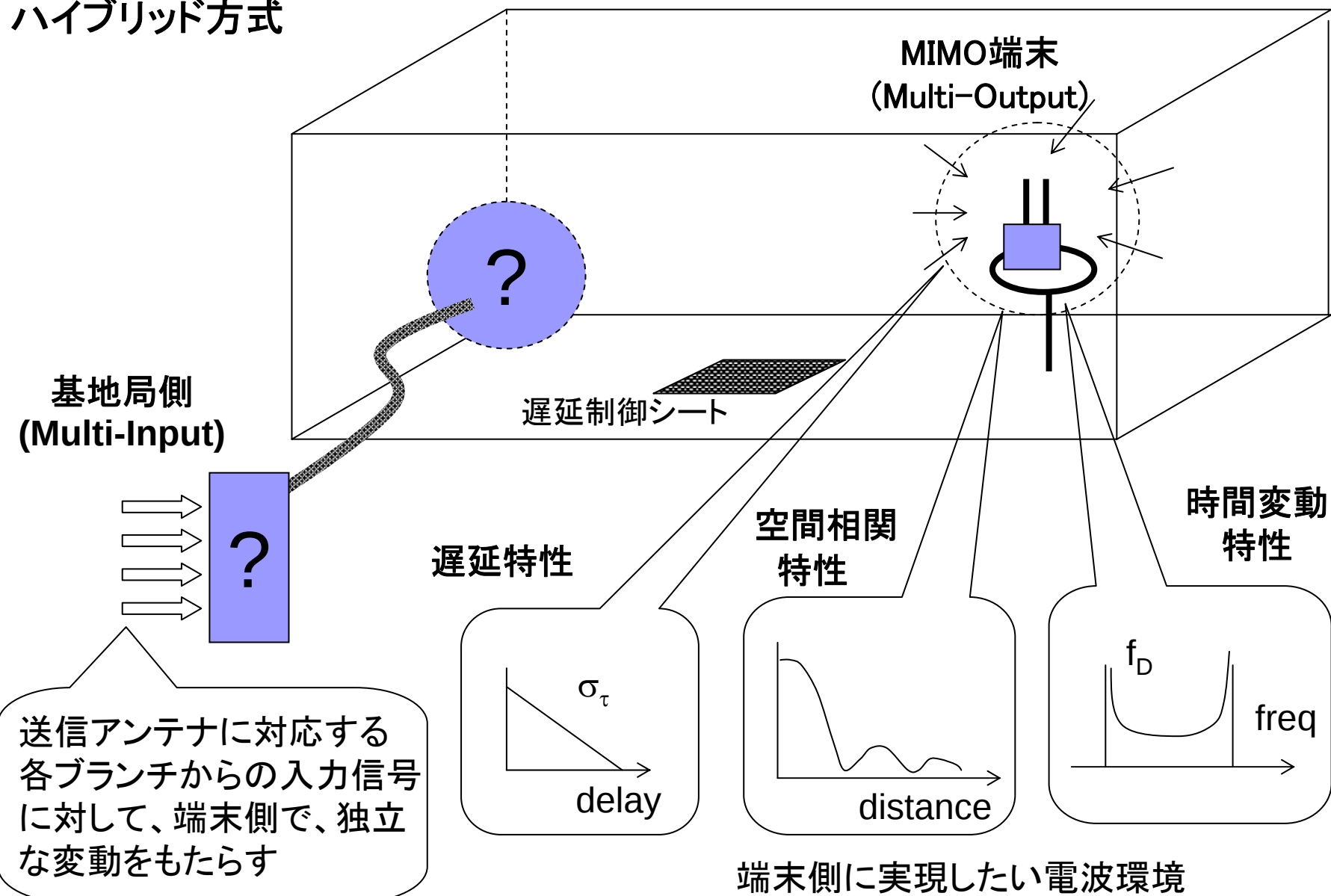
ハイブリッド方式の元祖



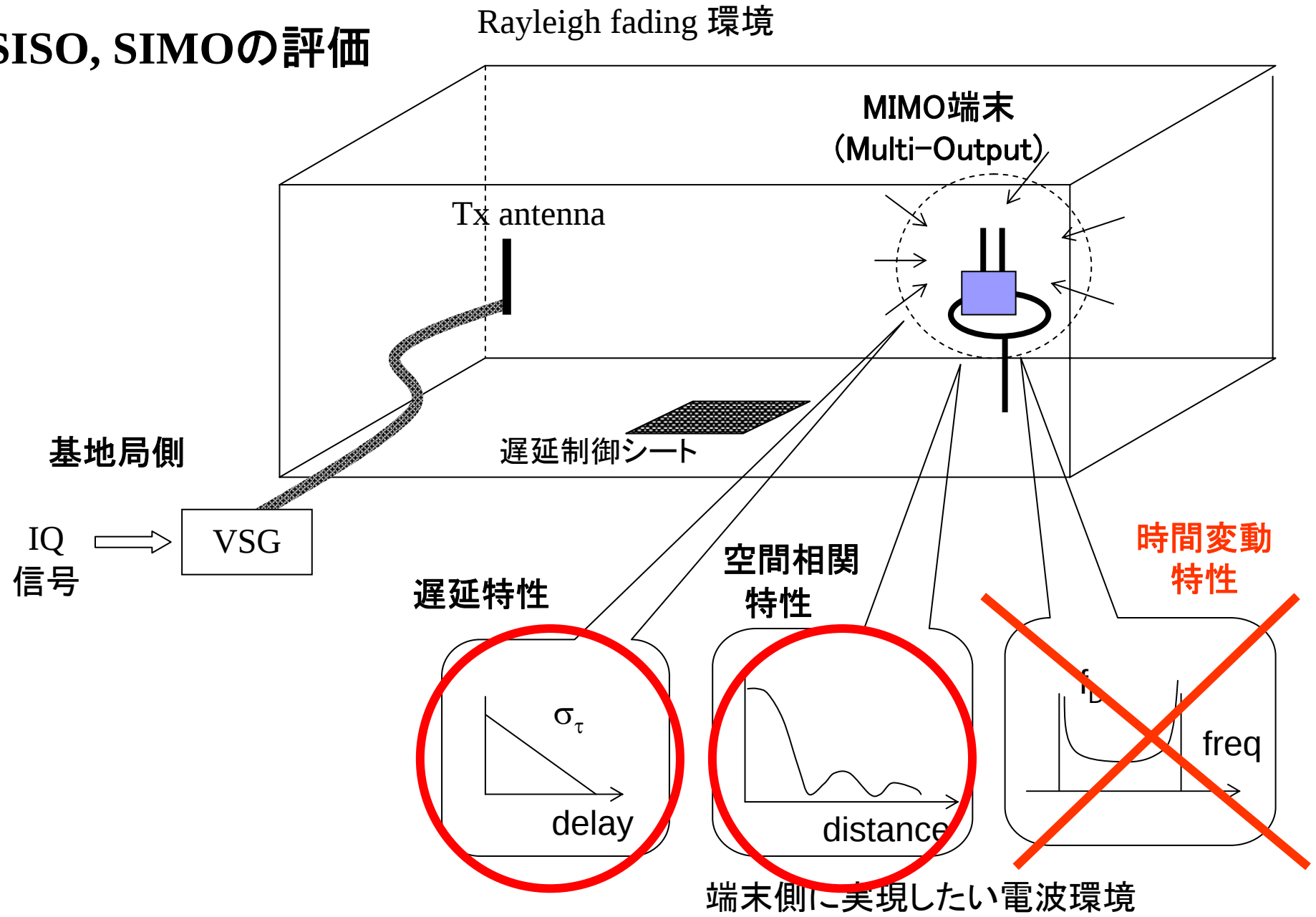
SISO, SIMO応用



ハイブリッド方式



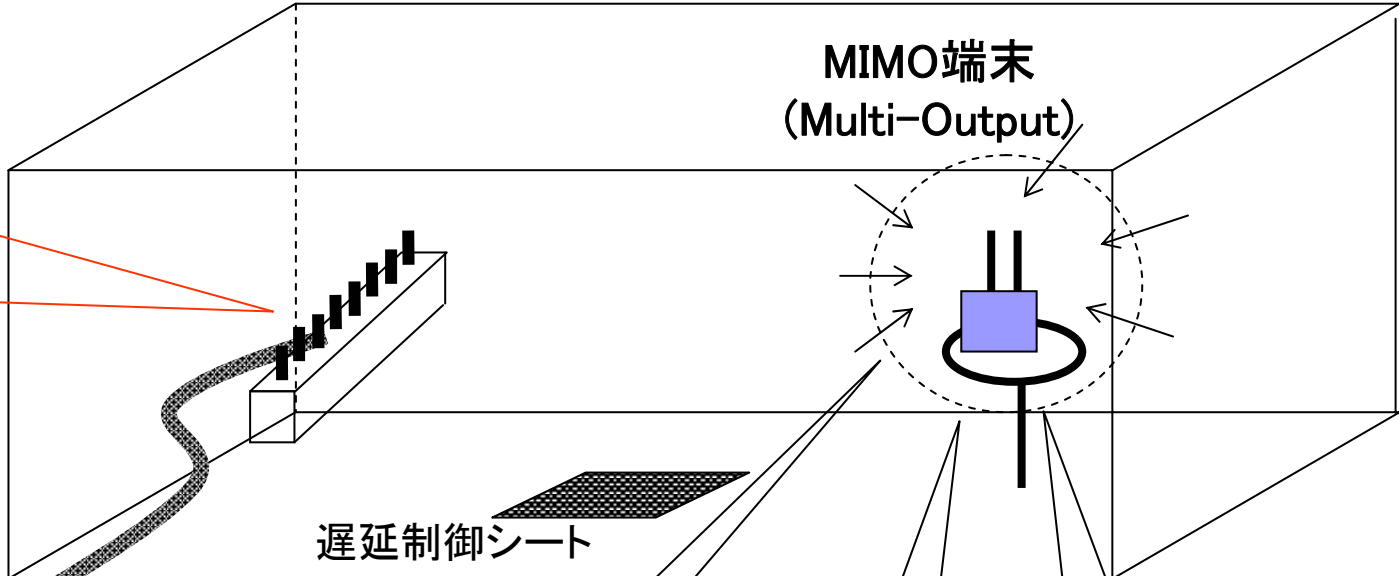
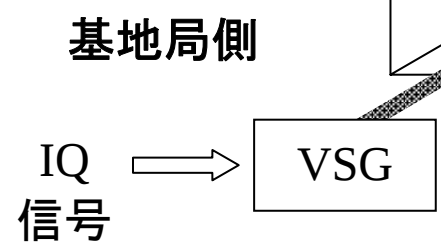
SISO, SIMOの評価



SISO, SIMOの評価

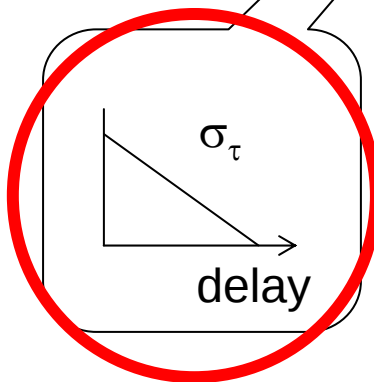
Rayleigh fading 環境

各素子に異なる
ドップラシフトを
与えてアレーで
送信



これではまだMIMOの
評価の機能がない

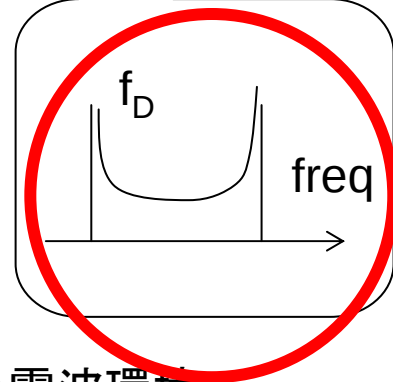
遅延特性



空間相関
特性



時間変動
特性



端末側に実現したい電波環境

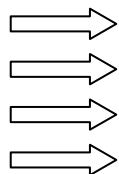


MIMOの評価

Rayleigh fading 環境

各素子に異なる
ドップラシフトを
与えてアレーで
送信

基地局側
(Multi-Input)



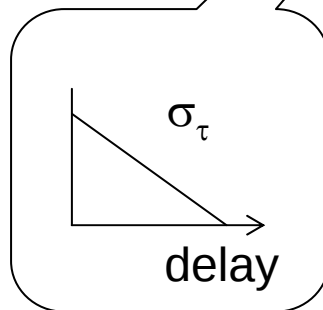
?

この構成は？

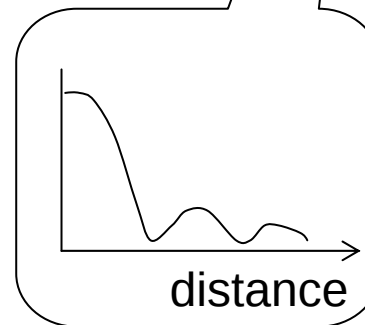
遅延制御シート

MIMO端末
(Multi-Output)

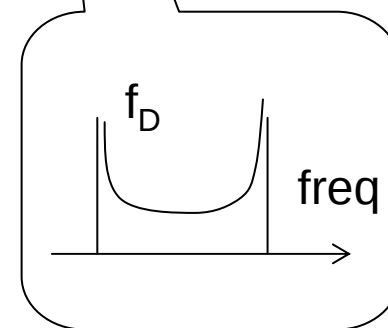
遅延特性



空間相関
特性



時間変動
特性



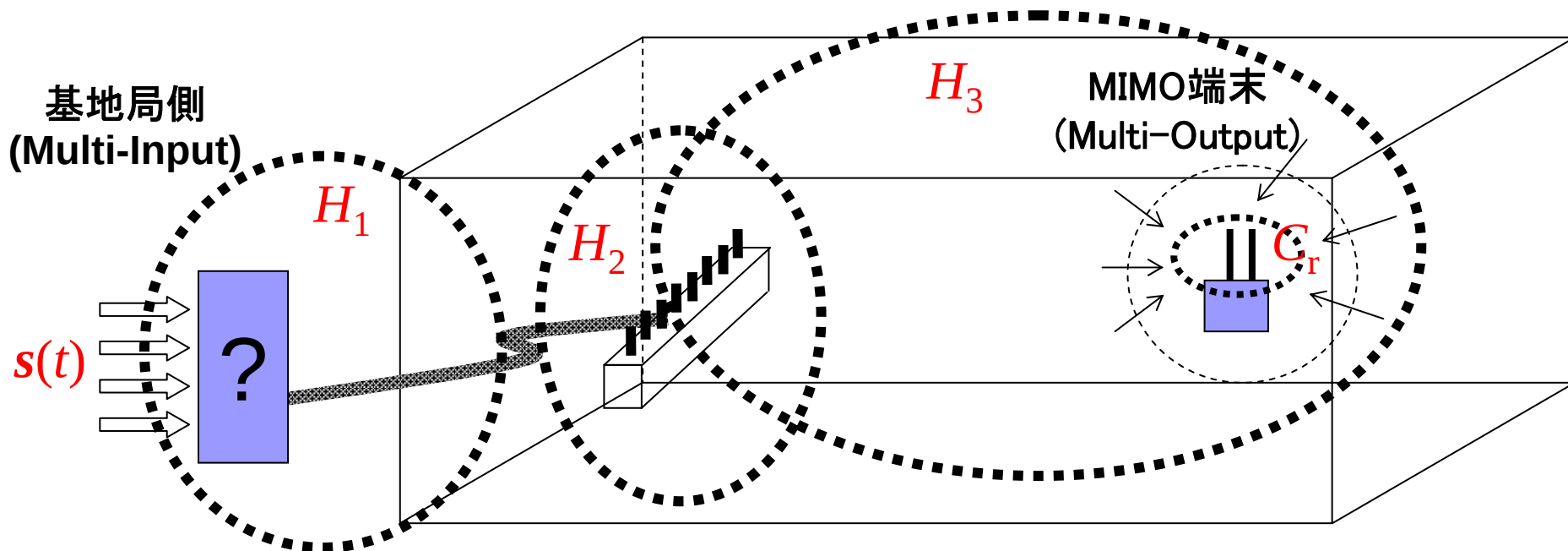
端末側に実現したい電波環境

受信信号とチャネルの表現

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{C}_r \mathbf{H}_e(t, \tau) \otimes \mathbf{s}(\tau) + \mathbf{n}(t)$$

$$\mathbf{H}_e(t, \tau) = \mathbf{H}_3(\tau) \mathbf{H}_2(t) \mathbf{H}_1$$

($\mathbf{C}_r$ は受信アレーの
カップリング特性など)





電波反射箱環境のチャネル要素の表現

入力側無相関の場合は
WHコードが使える
M=4, L=8 の例

無相関変動生成のための
接続マトリックス

$$H_1 = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1M} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L1} & w_{L2} & \cdots & w_{LM} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

ドップラーシフトの付加

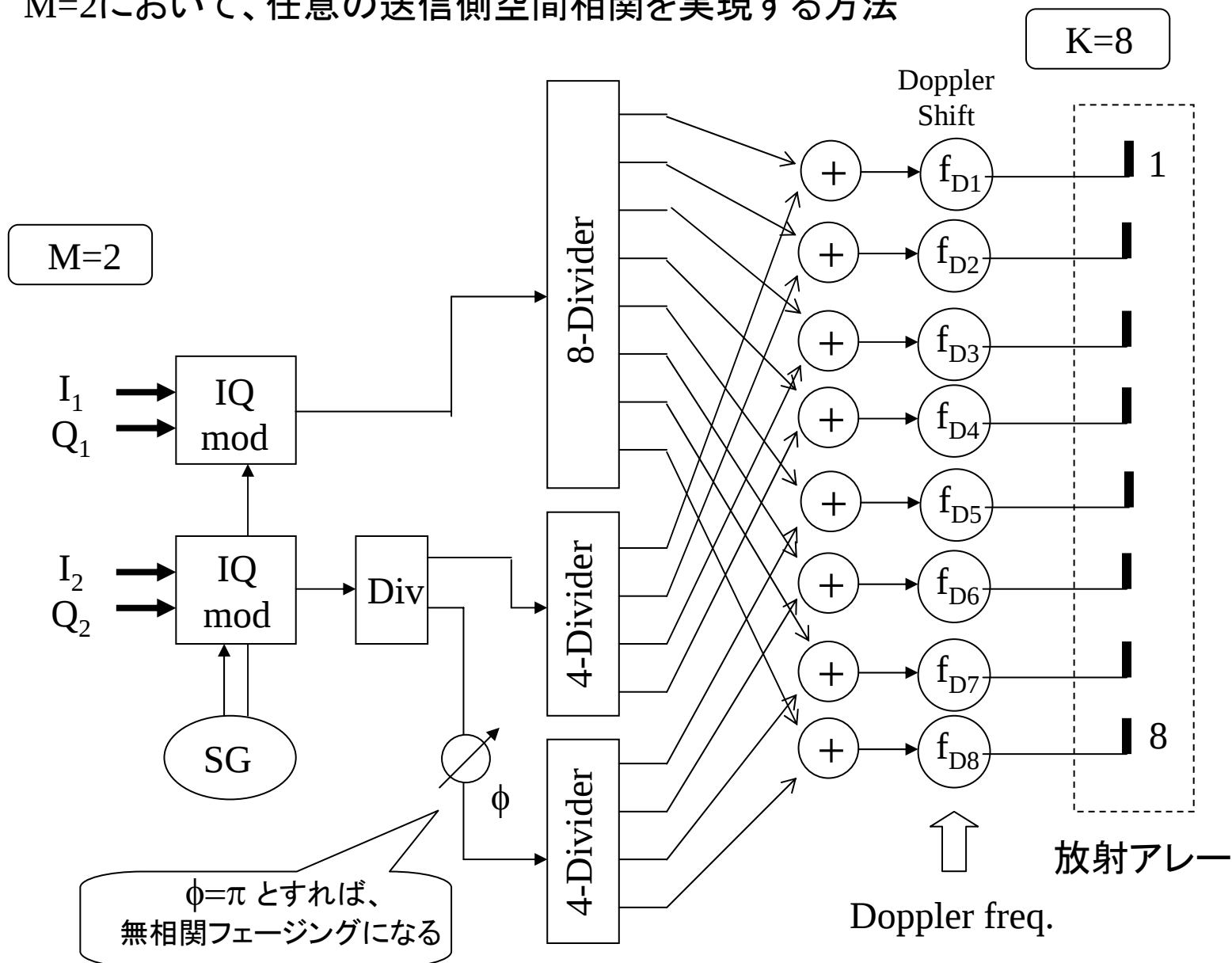
$$H_2(t) = \begin{pmatrix} e^{j2\pi f_{d1}t} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e^{j2\pi f_{d2}t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e^{j2\pi f_{dL}t} \end{pmatrix}$$

マルチパス遅延の生成

$$H_3(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \begin{pmatrix} a_{11}^{(k)} & a_{12}^{(k)} & \cdots & a_{1L}^{(k)} \\ a_{21}^{(k)} & a_{22}^{(k)} & \cdots & a_{2L}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^{(k)} & a_{N2}^{(k)} & \cdots & a_{NL}^{(k)} \end{pmatrix} \delta(\tau - \Delta\tau_k)$$

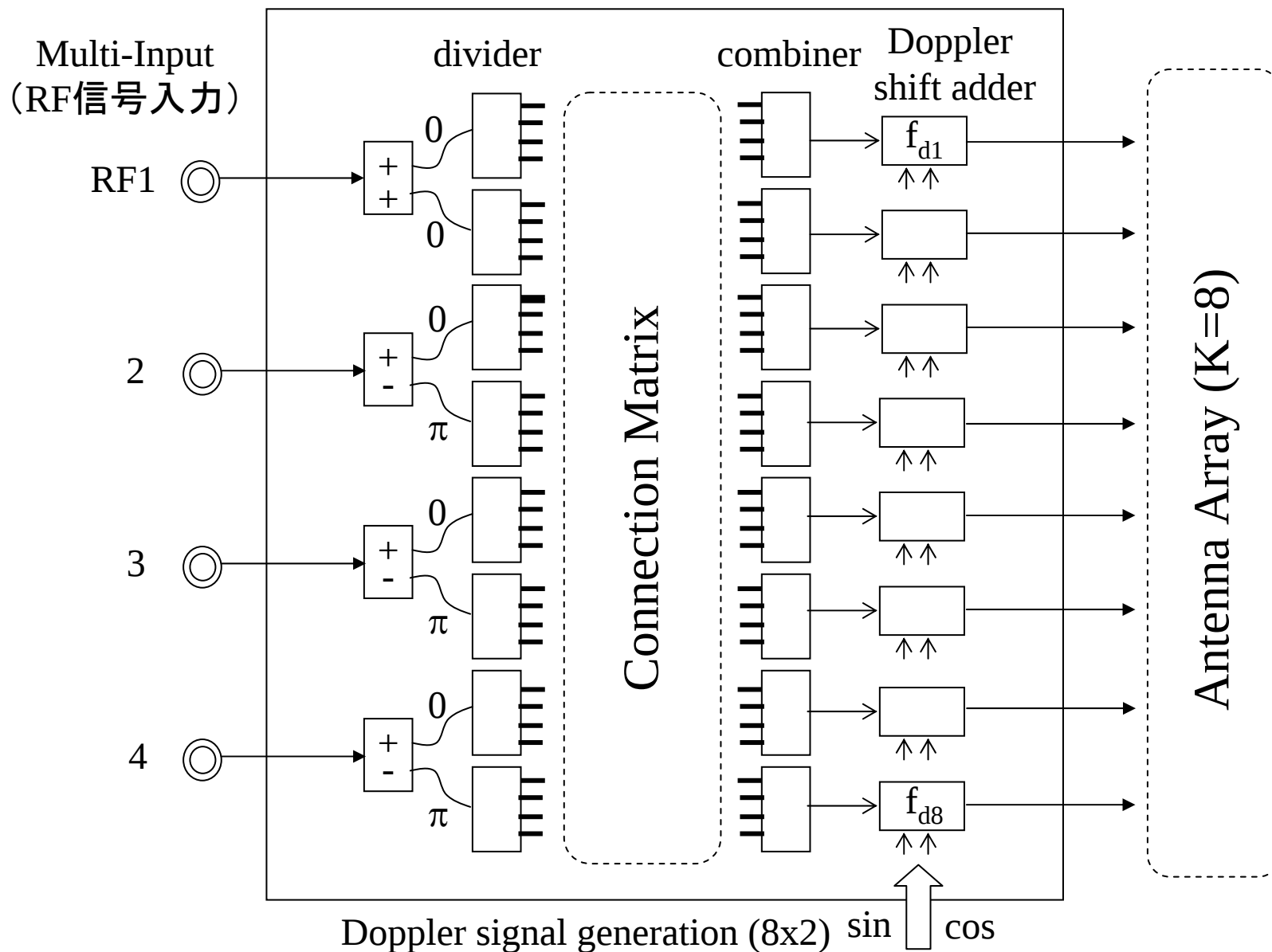


M=2において、任意の送信側空間相関を実現する方法





M=4 (送信側空間相関が無相関)の場合





検討課題

- 実環境の構築
- 実環境での基本機能実測確認
- MIMO送受信アレー数(M, N)に対して
散乱体信号源の数(L)は、いくつあれば十分か？
- M, N, L に対するチャネル固有値分布、通信路容量は？
- 評価において「できること」と「できないこと」の明確化

本内容の詳細は、8月の信学会RCS研で発表予定

MIMO 端末評価環境の標準システムを!!