



日本アマチュア無線連盟 マイクロ波委員会
マイクロ波入門講座

H25.09.23

最近の電波伝搬

— 電波環境を測る・電波環境を作る —

唐沢 好男

電気通信大学

先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター (AWCC)



発表内容

1. 電波環境を測る

- 1) 電波環境のトータルレコーディング(電波の缶詰)
- 2) 200MHz帯以下の全スペクトル測定実験(仙台)
- 3) トータルレコーディングの応用

2. 電波環境を作る(MIMO測定環境)

- 1) MIMOとは
- 2) MIMO-OTA
- 3) 電波反射箱(Reverberation Chamber)
- 4) MIMOフェージングエミュレータ



1. 電波環境を測る

- 1) 電波環境のトータルレコーディング(電波の缶詰)
- 2) 200MHz帯以下の全スペクトル測定実験(仙台)
- 3) トータルレコーディングの応用

2. 電波環境を作る(MIMO測定環境)

- 1) MIMOとは
- 2) MIMO-OTA
- 3) 電波反射箱(Reverberation Chamber)
- 4) MIMOフェージングエミュレータ



未来*)に残したいもの

*) 50年～100年後

- ・消えゆく文化
- ・失われつつある自然
- ・時代と共にある文明の利器

- ・時代と共に変化する電波環境
(テレビ、ラジオ、〇〇無線)
(コンテンツには、その時々
の文化が缶詰になっている)

残す形(方法、メディア)

- ・保護(保存、継承)
- ・映像(ビデオ)
- ・写真(カメラ)
- ・音(録音機)
- ・文章(紀行、随筆、小説)

- ・電波環境記録
(トータルレコーディング)

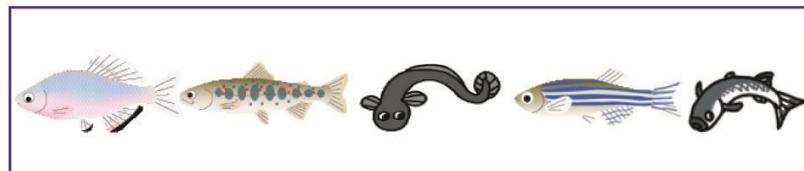
電波環境のトータルレコーディング(電波の缶詰)

トータルレコーディングのイメージ

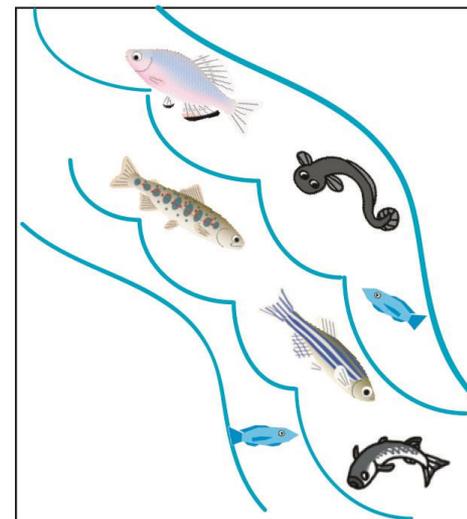
環境を丸ごと記録する

魚釣りの
場合

コンテンツレコーディング

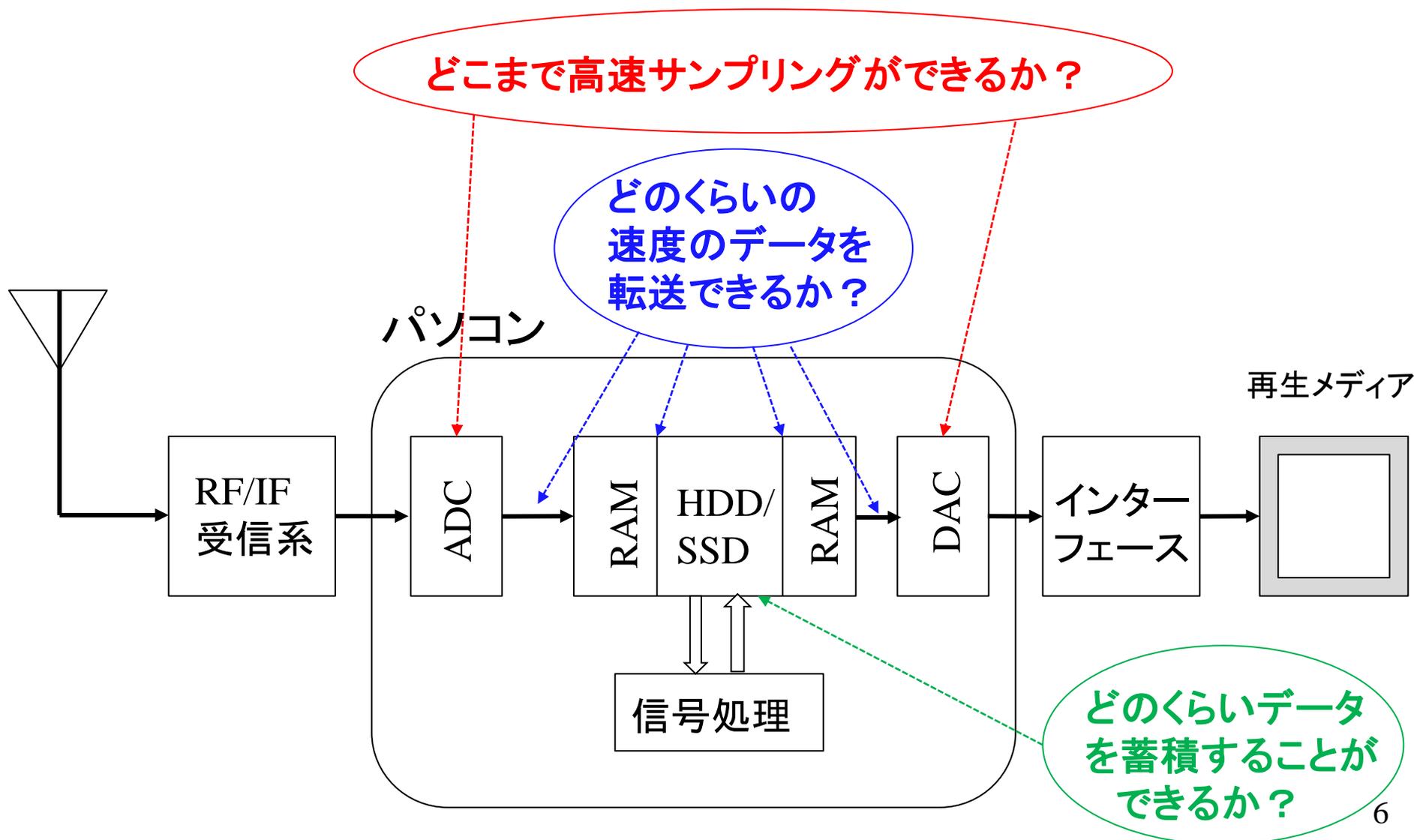


トータルレコーディング





パソコン利用トータルレコーディングシステムの基本構成

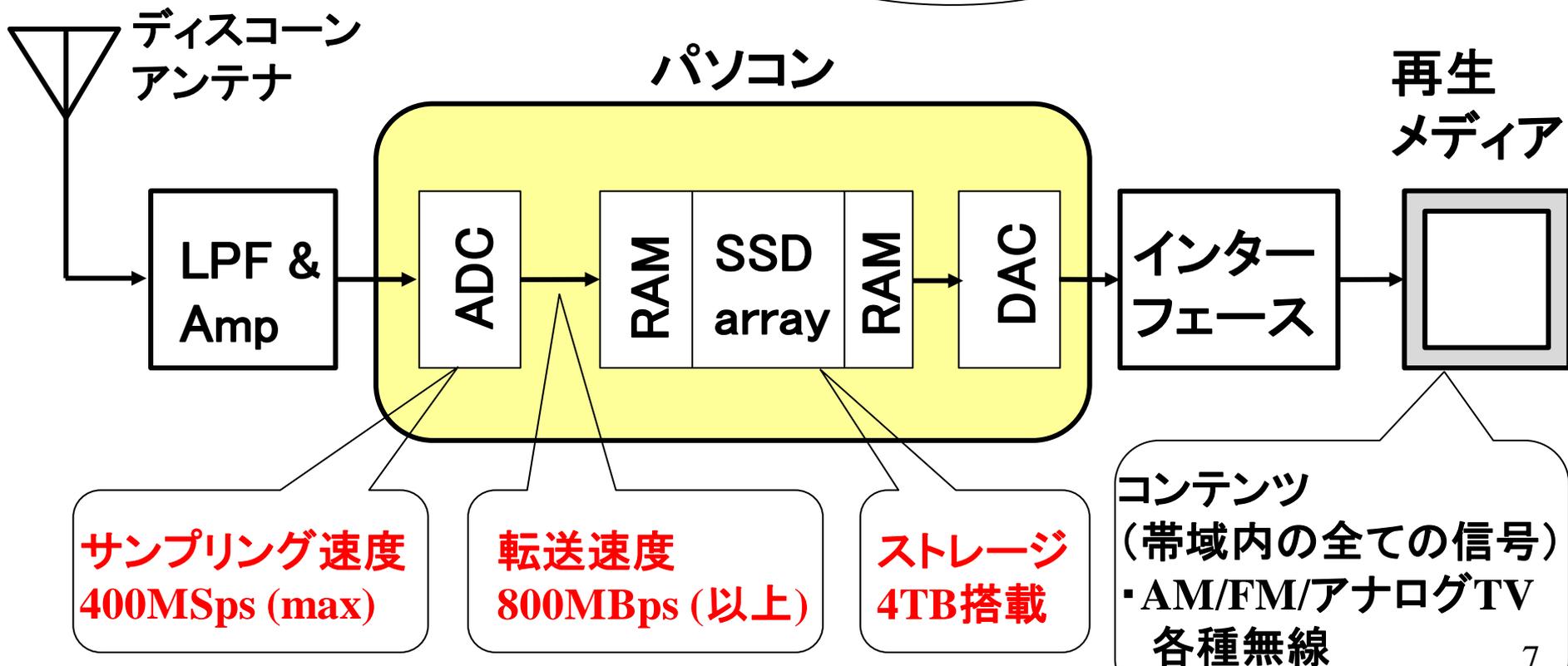




パソコン利用トータルレコーディングシステム 基本構成と実現性能(試作システム)

受信信号帯域
100kHz-200MHz

AMラジオ 業務用無線 アナログTV
FMラジオ アマチュア無線



測定実験

収録日 平成24年3月5日(月)

場所 仙台市(東北大学青葉山キャンパス)(*)

収録周波数帯域: 100kHz~222MHz (**)

*) 収録地点(仙台)では、この周波数帯に、
まだ、アナログTV放送が含まれている
(東北3県はH24.03.31にアナログTV放送終了・停波)

**) サンプルング周波数392MHzのため
帯域の上限付近はアンダーサンプリング

測定実験風景

平成24年3月5日

(仙台:大雪の日)



前日、東京出発





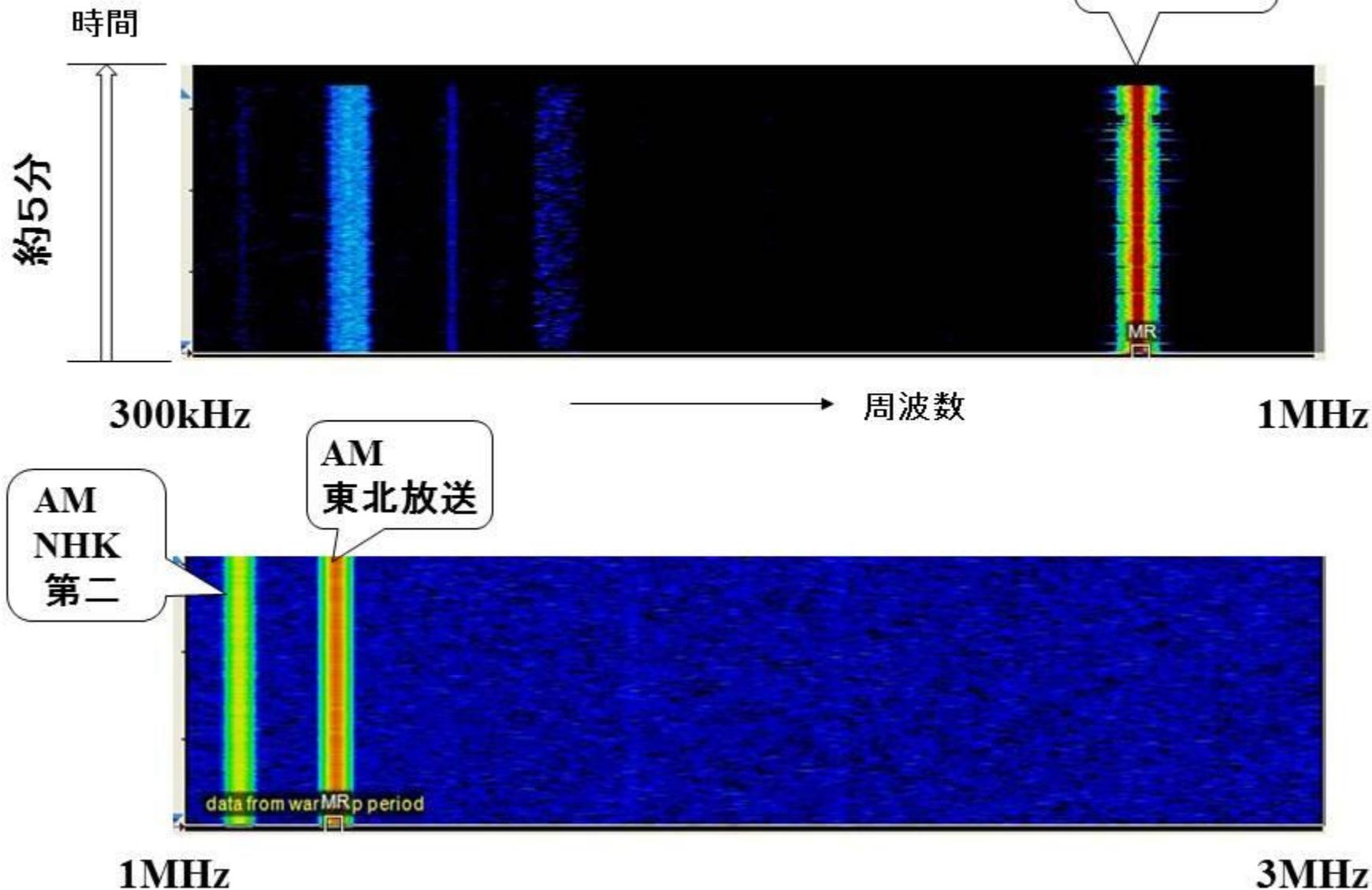
←アンテナ

受信系・記録装置



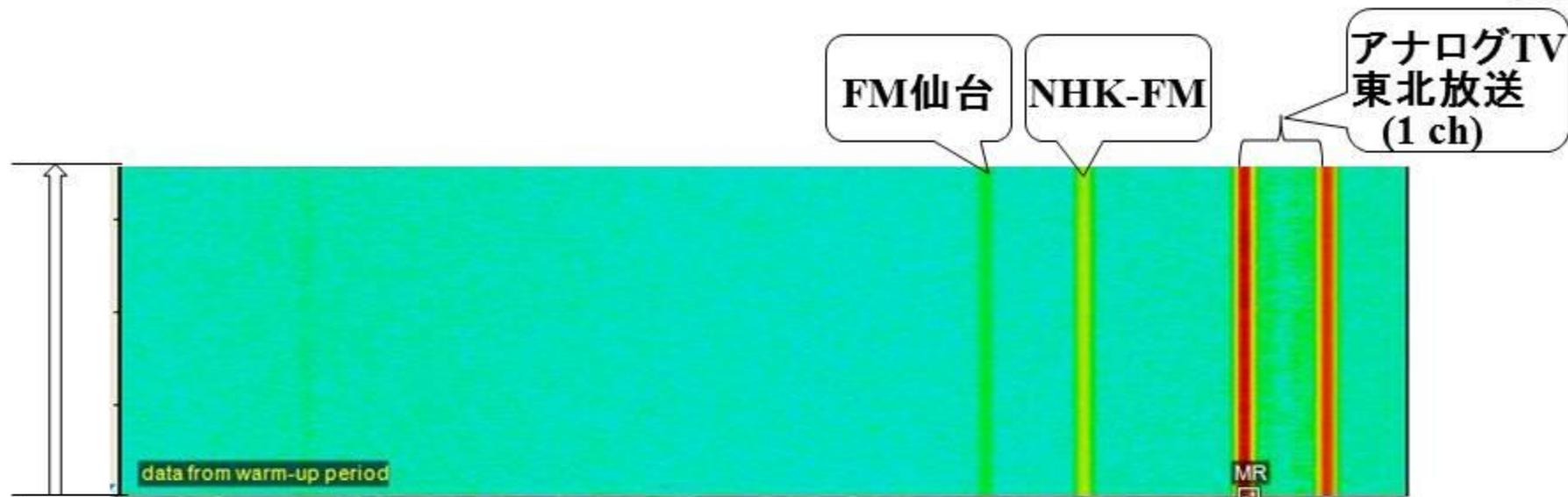


測定例(仙台地区)





約5分



30MHz

100MHz

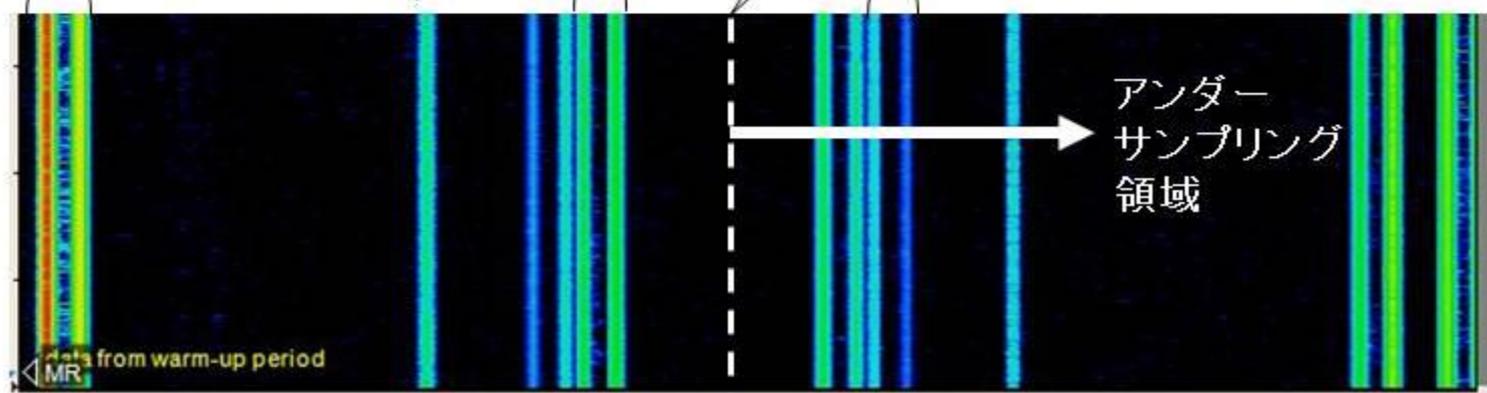
アナログTV
NHK総合
(3 ch)

業務用
無線

アナログTV
NHK教育
(5 ch)

$f_s/2$
(196MHz)

アナログTV
仙台放送
(12 ch)

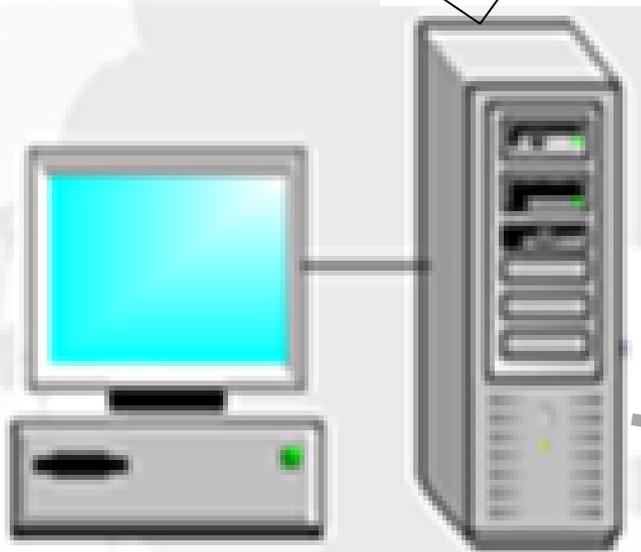


100MHz

300 MHz

受信信号の再生デモ

仙台の電波がパソコン
に缶詰めになっている
(100kHz-200MHz)



トータルレコーダ

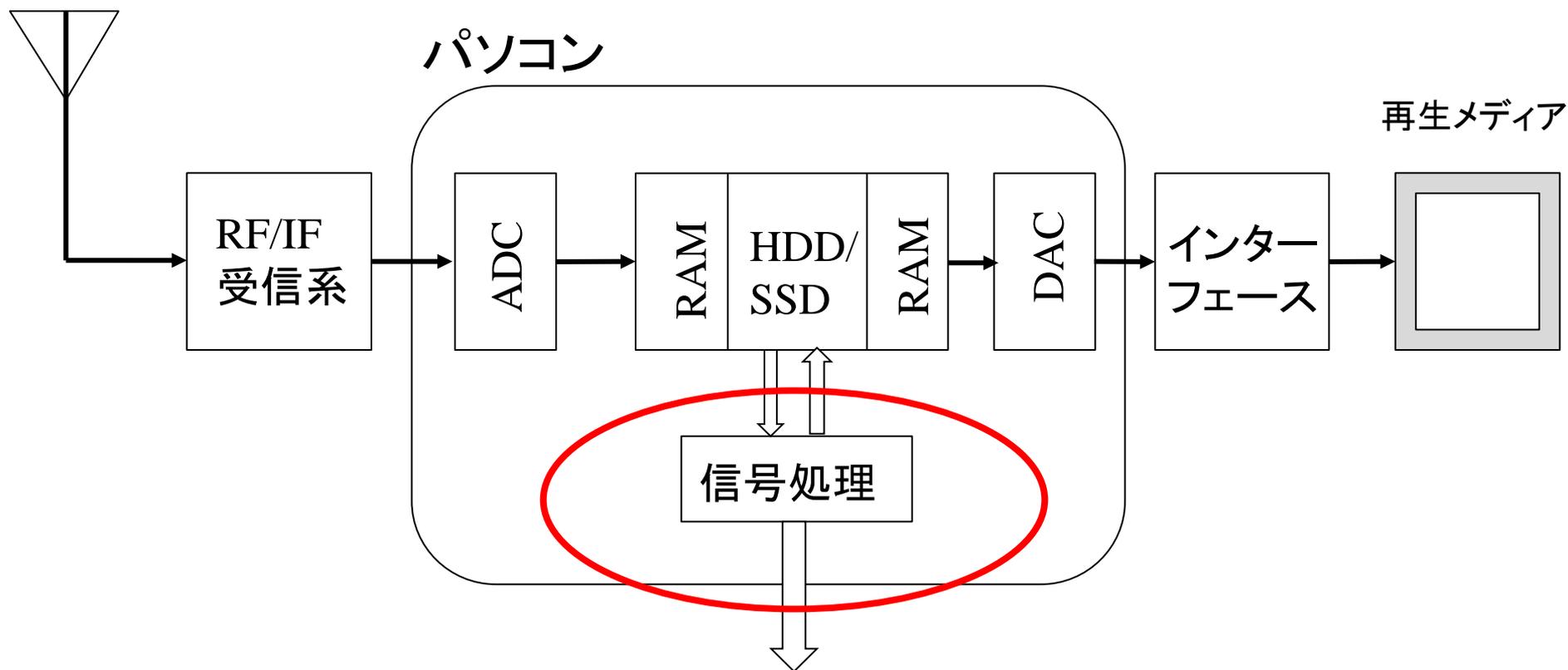
万能ラジオ



アナログテレビ



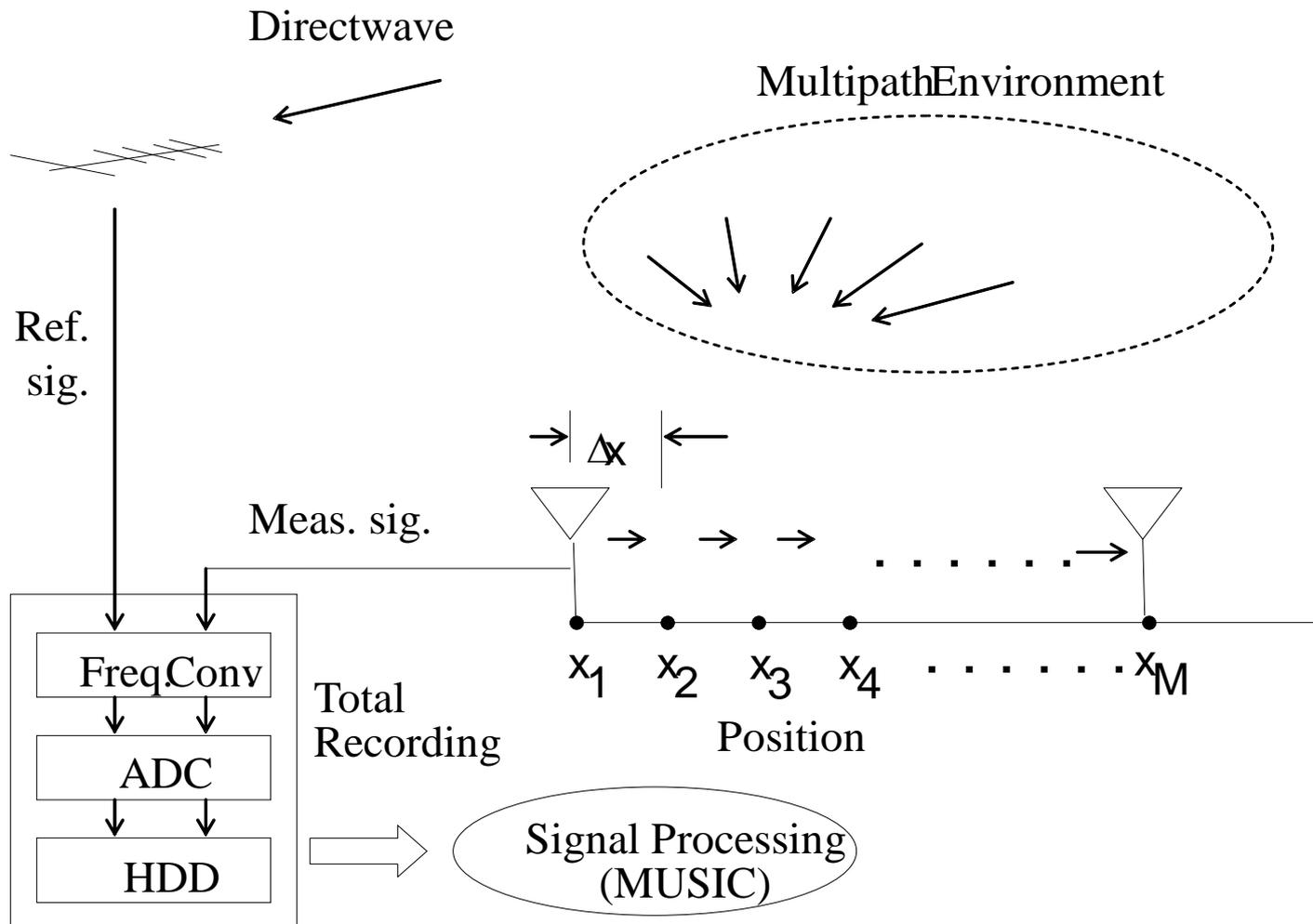
トータルレコーディングシステムの応用



電波環境解析

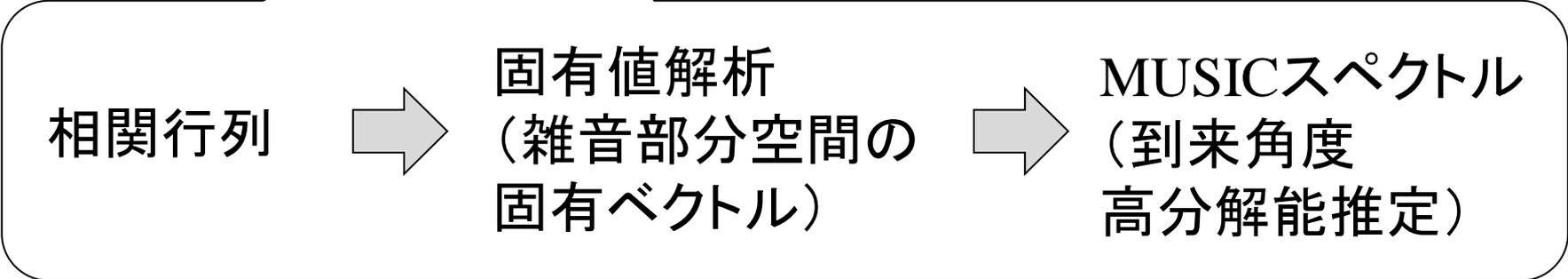
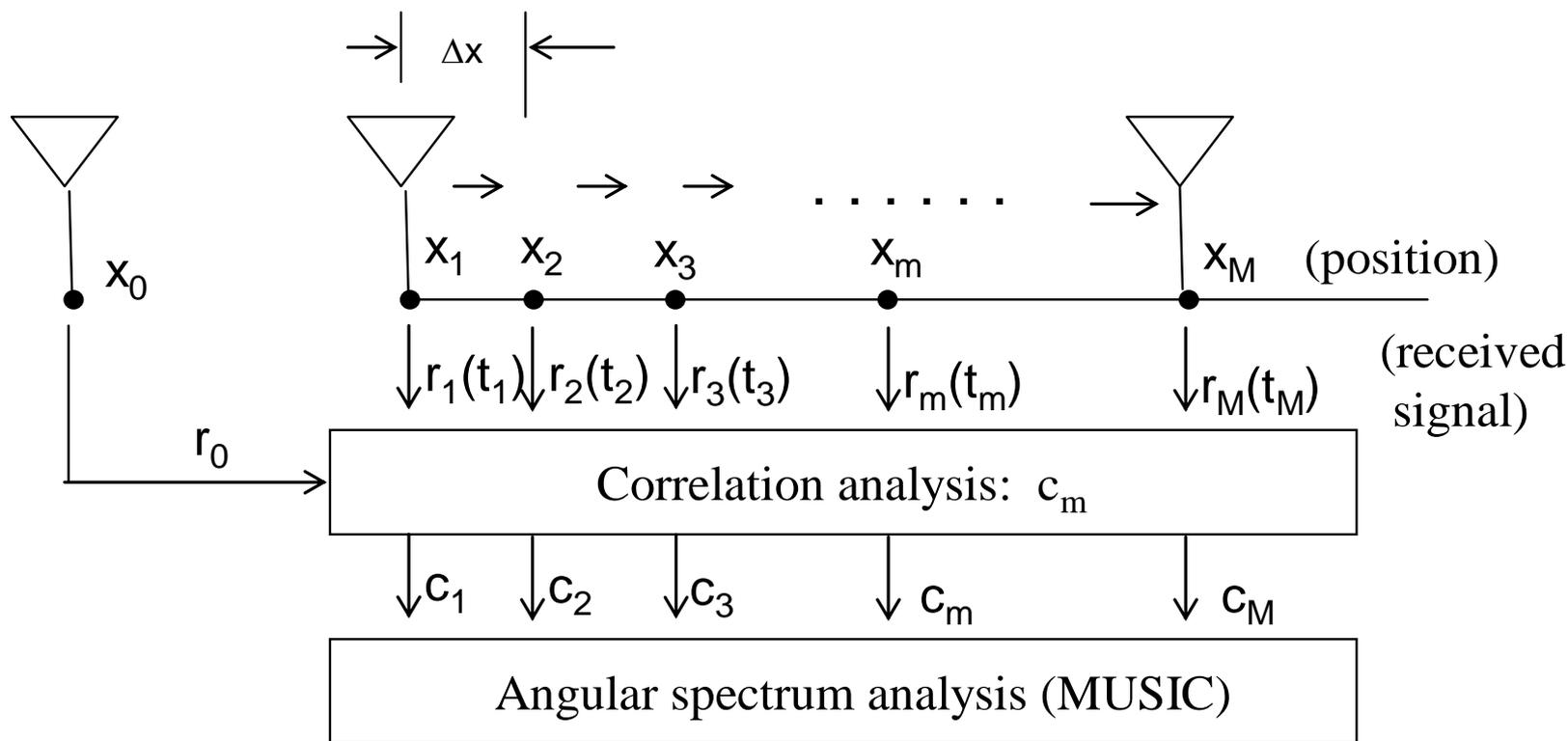


トータルレコーディングの応用 バーチャルアレーによる、電波到来方向の高分解能推定



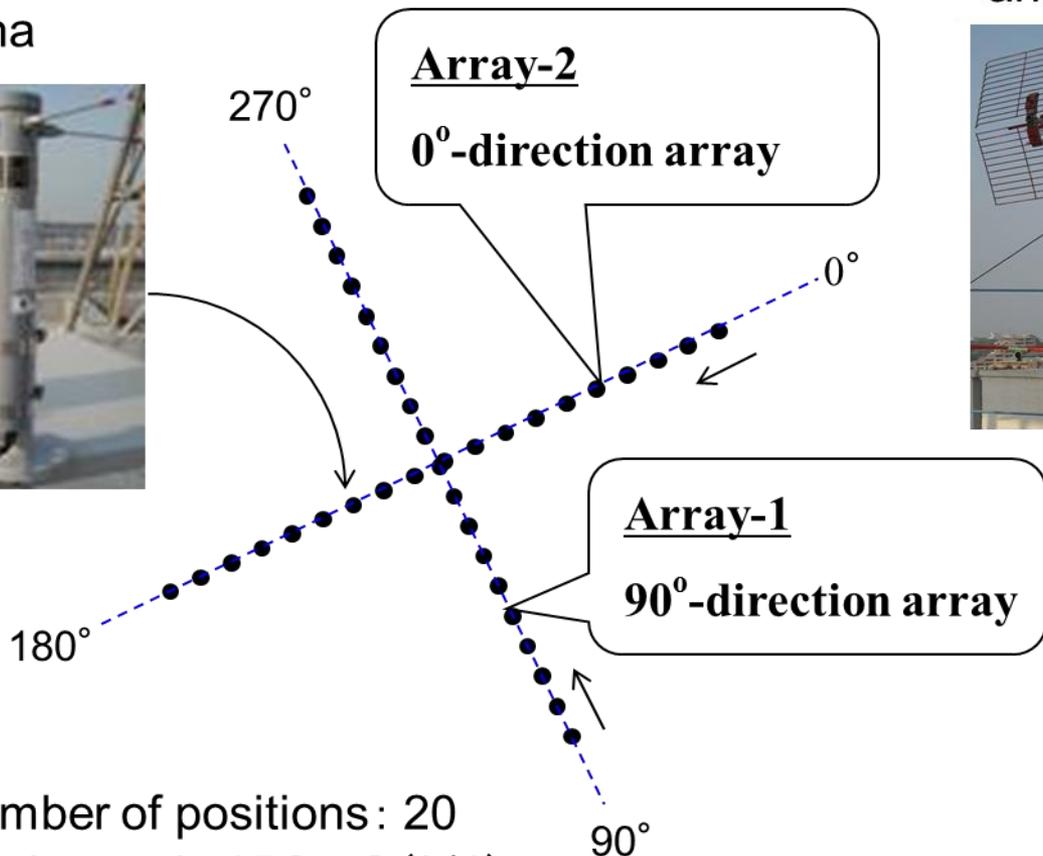
竹本淳他、信学論(B), vol. J92-B, no. 9, pp. 1382-1389, 2009.

K. Morokuma et al., IEICE Trans. Commun, vol. E96-B, no. 4, pp. 986-993, 2013.



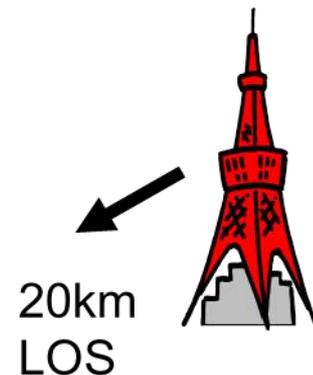
<Rooftop of a building in UEC Tokyo>

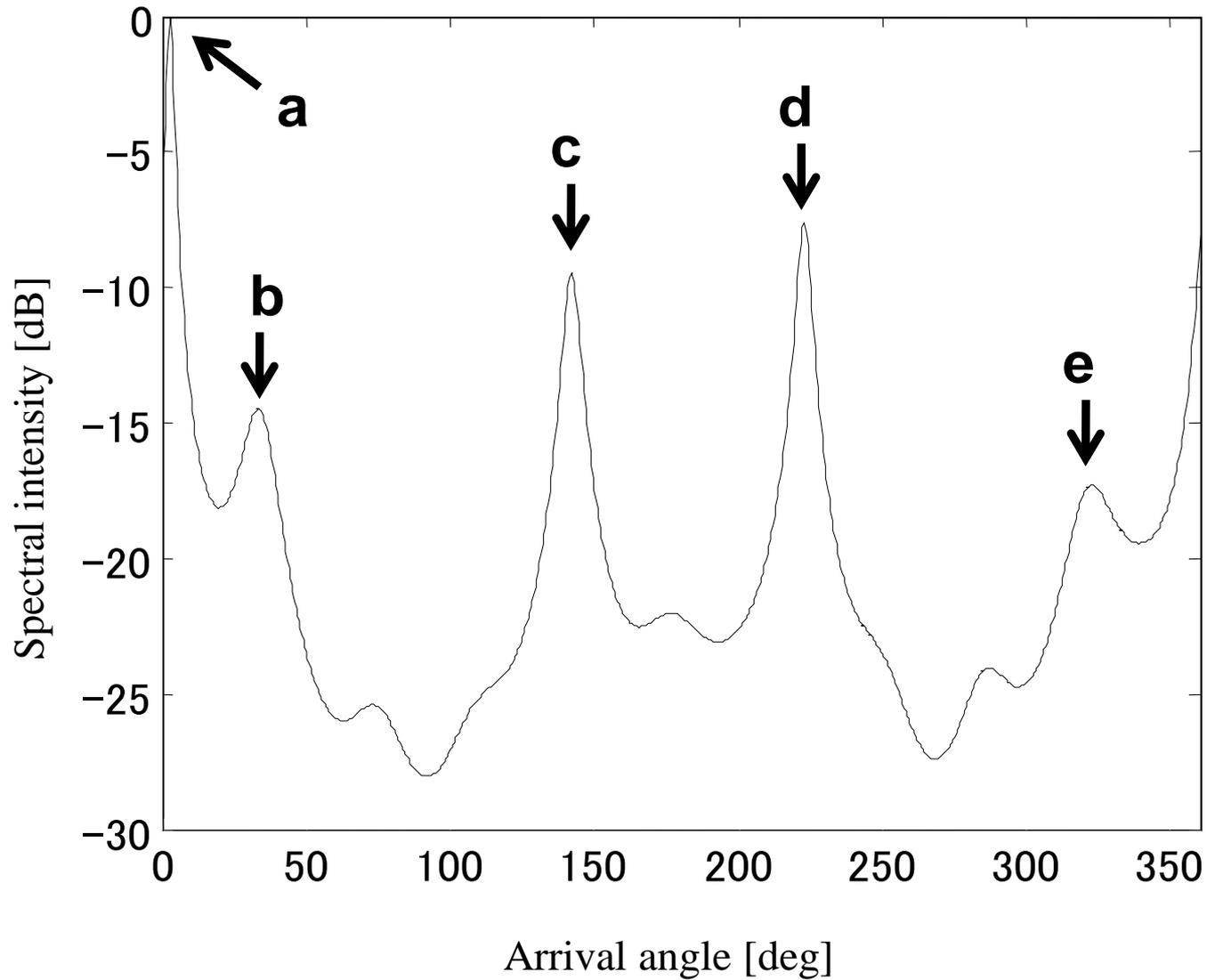
Measurement antenna

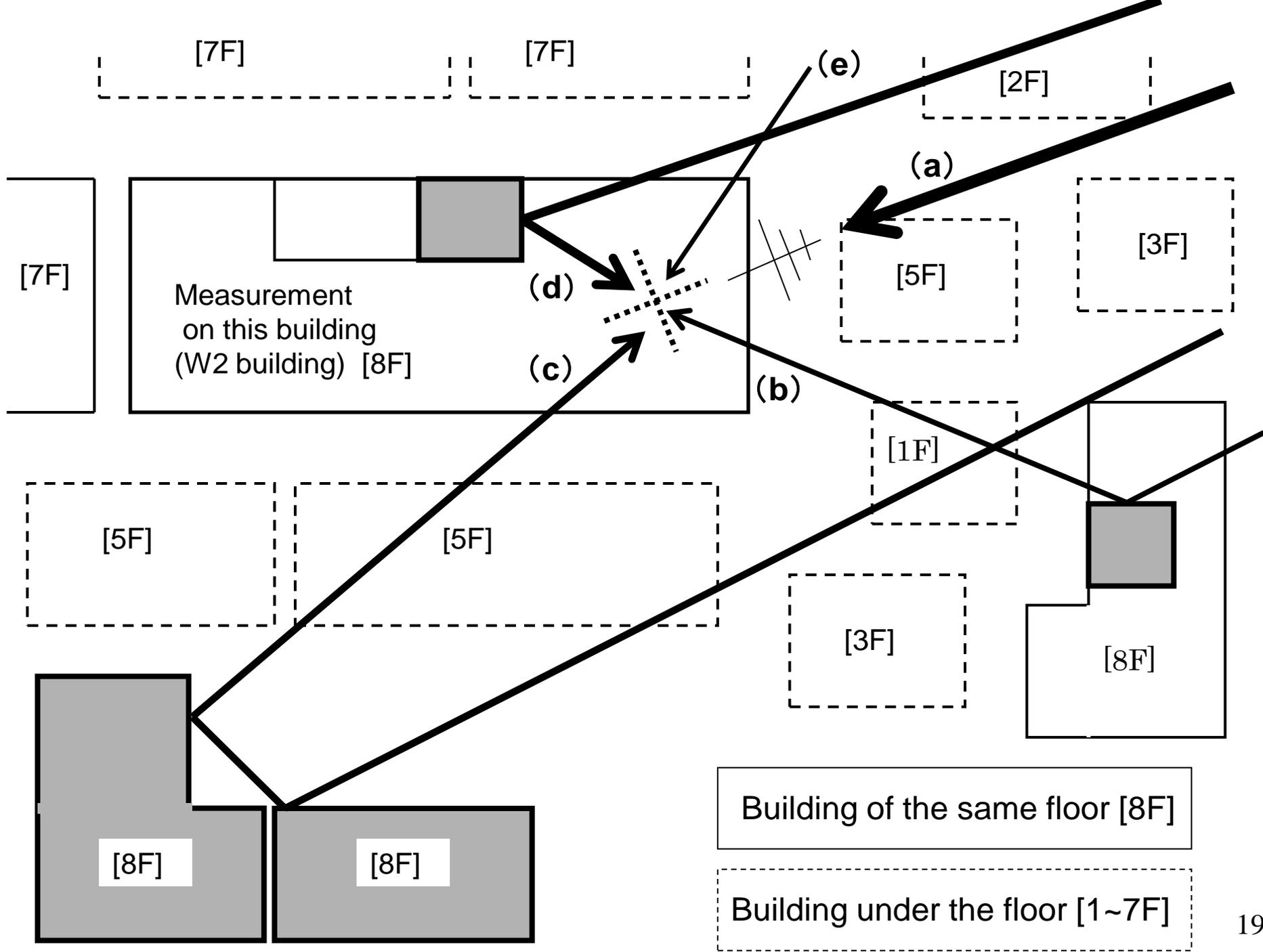


The number of positions: 20
 position interval: 15 [cm] ($\lambda/4$)

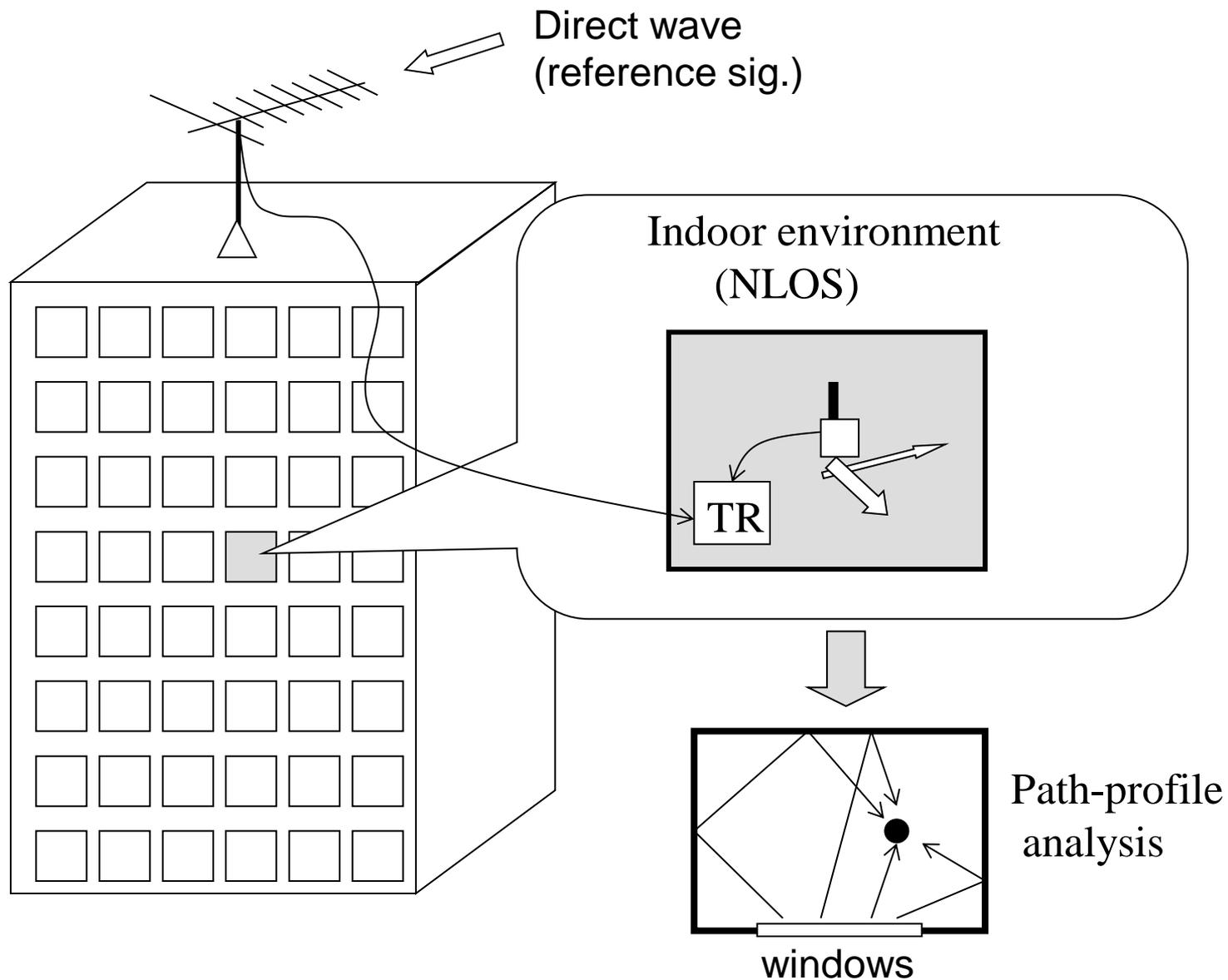
Reference antenna







バーチャルアレーを用いた屋内環境での伝搬特性解析(実施中)





1. 電波環境を測る

- 1) 電波環境のトータルレコーディング(電波の缶詰)
- 2) 200MHz帯以下の全スペクトル測定実験(仙台)
- 3) トータルレコーディングの応用

2. 電波環境を作る(MIMO測定環境)

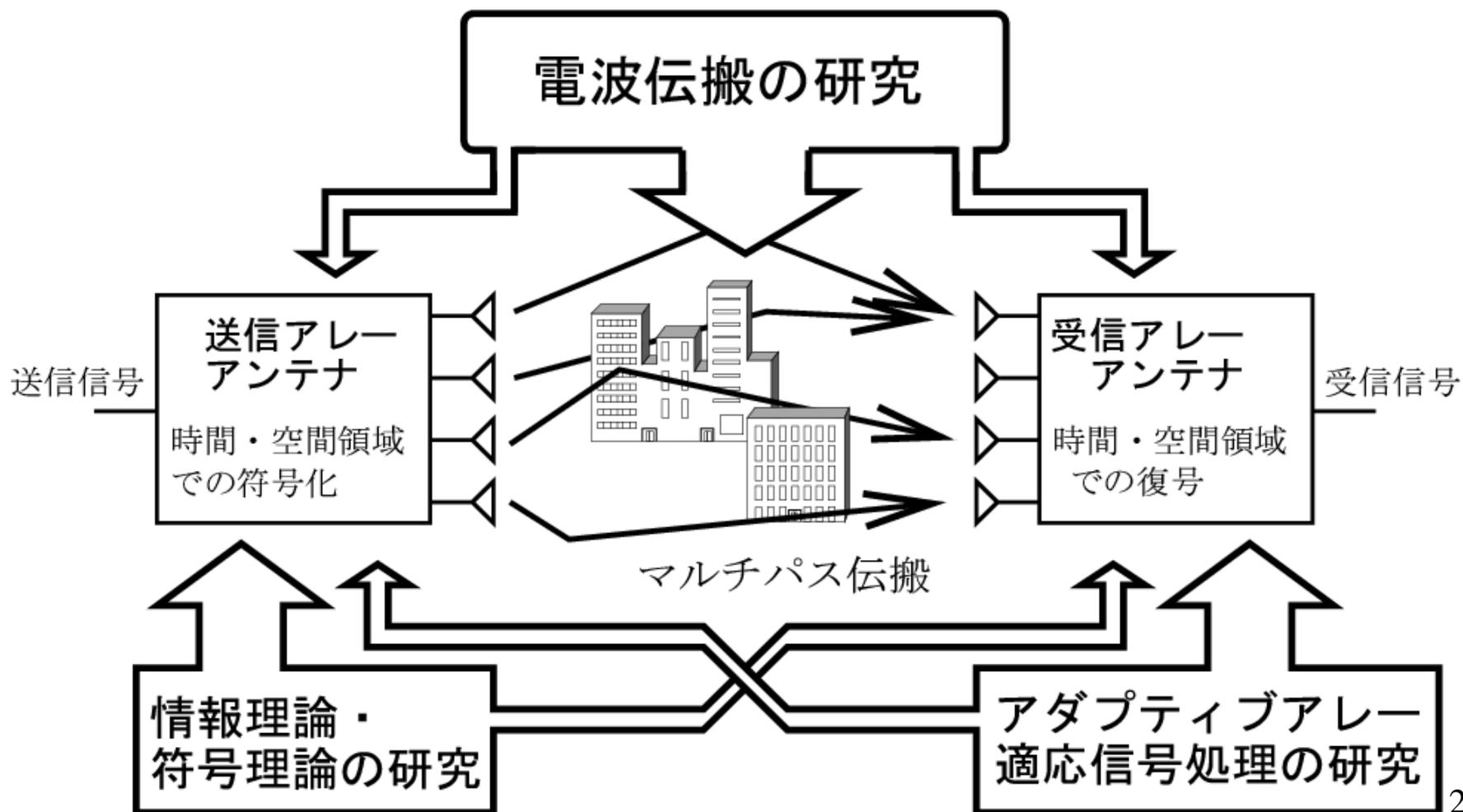
- 1) MIMOとは
- 2) MIMO-OTA
- 3) 電波反射箱(Reverberation Chamber)
- 4) MIMOフェージングエミュレータ



MIMO

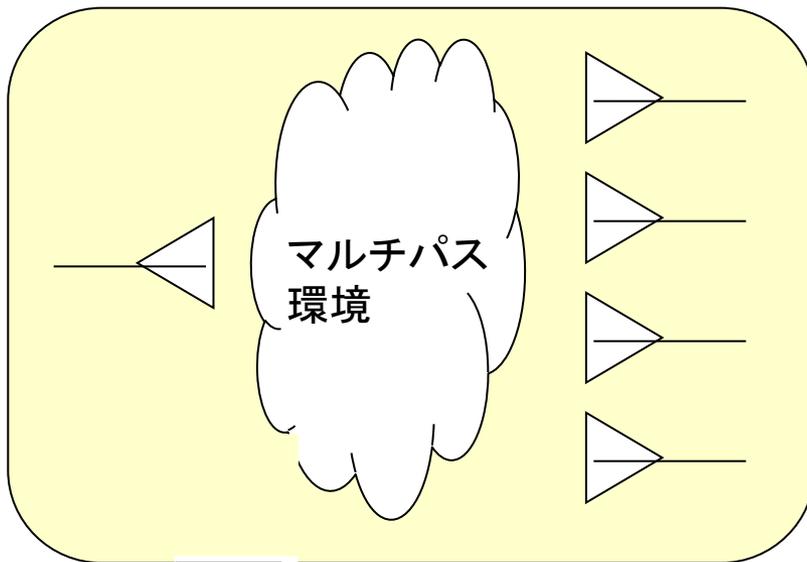
Multi-Input Multi-Output
(多入力・多出力システム)

MIMO 情報伝送技術



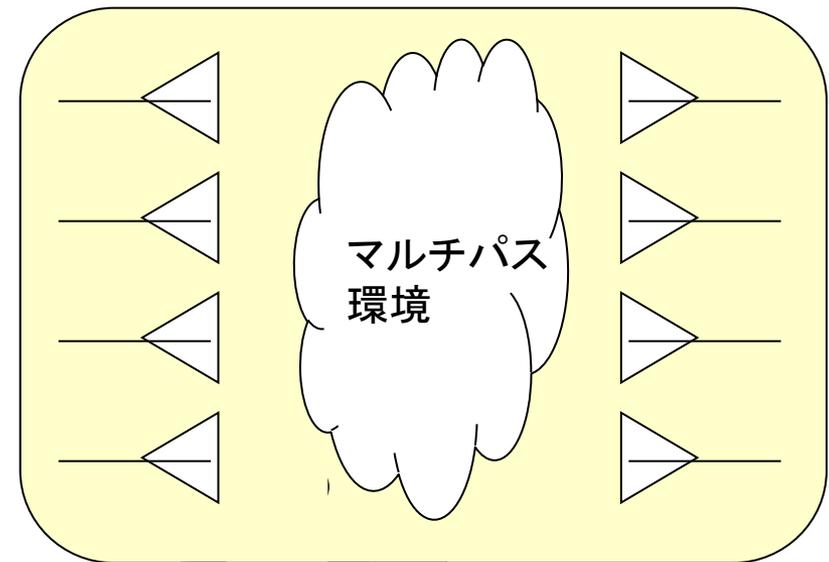
アレーアンテナができること

SIMO



- 4素子ダイバーシチ
- 3つの干渉波除去

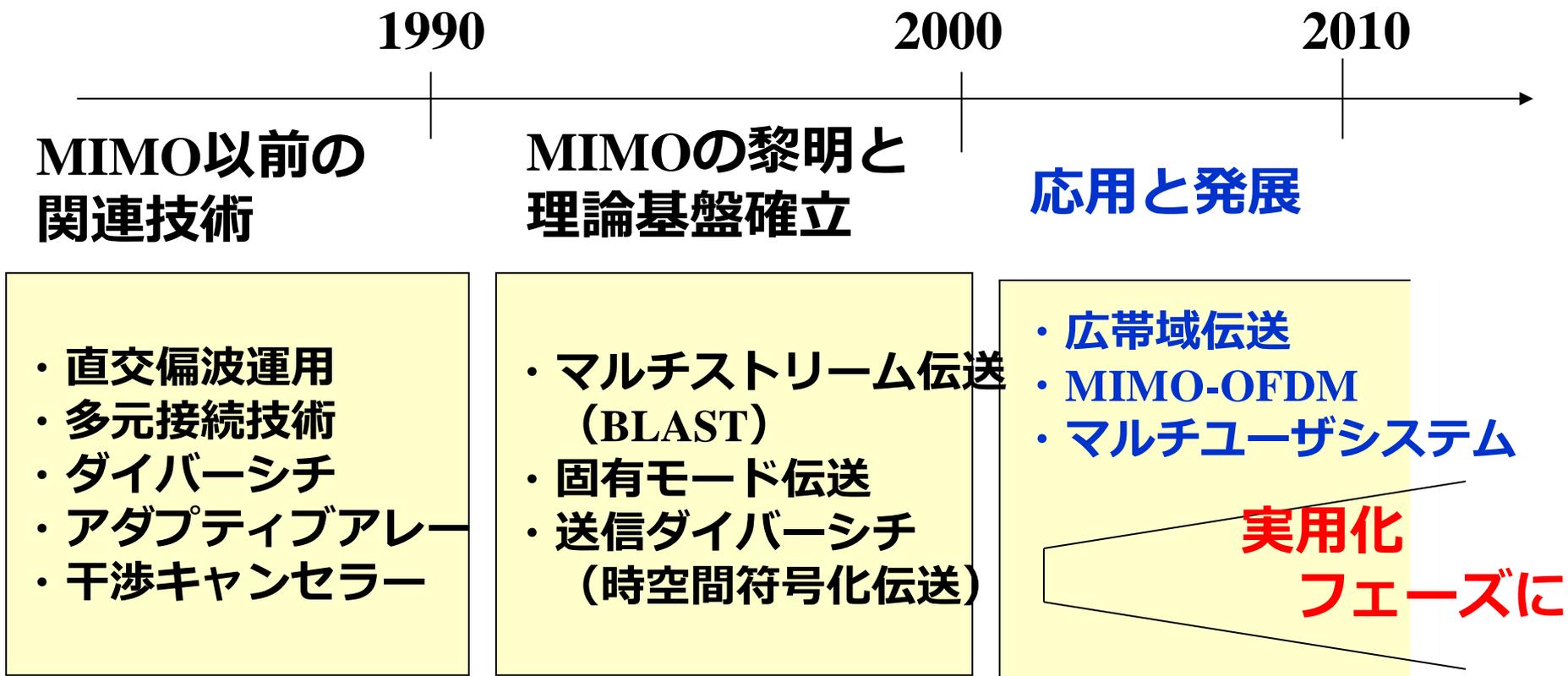
MIMO



- **16素子のダイバーシチ**
- 3つの干渉波除去
- **4つのデータの並列伝送**
(スピーカとマイクロフォン)



MIMO 技術の歴史と展望





MIMO: その二つの顔

(1) **たくさんの情報を伝送する技術**
(高スループット技術：マルチストリーム伝送)



二者択一（過剰な期待は禁物）

(2) **切れないリンクを実現する技術**
(高信頼性技術：送受信ダイバーシチ)



シャノンのチャネル容量定理

報酬

$$C_0 = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

努力

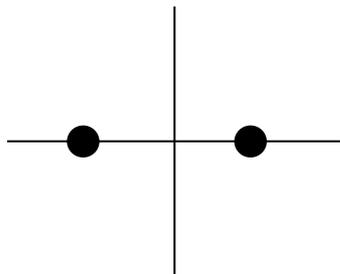
$$\approx \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) \text{ for } S \gg N \quad (\text{bit} / \text{s} / \text{Hz})$$

この式は、電力が有り余っても、容量増加に有効に活かされない構造になっている

→ 電力を倍にしても、1ビット増えるだけ

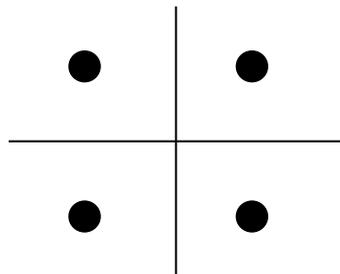


对数的增加の非効率性の例 Example of ineffectiveness for logarithmic increase



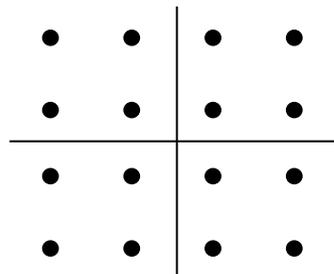
BPSK (1bit/symbol)

SNR →



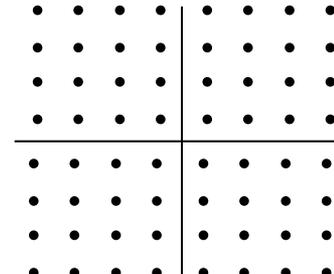
QPSK (2)

+3dB →



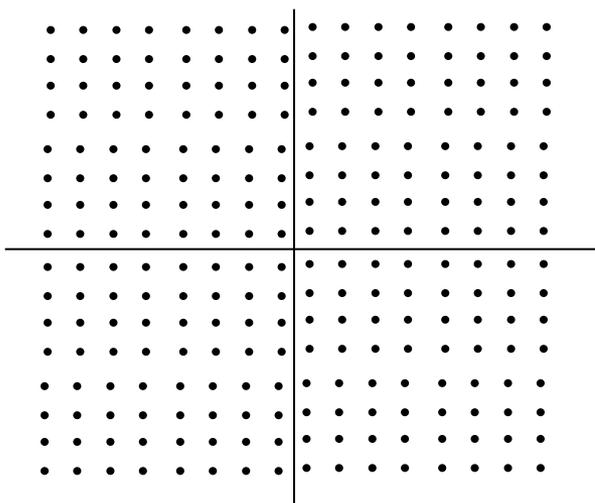
16-QAM (4)

+6dB



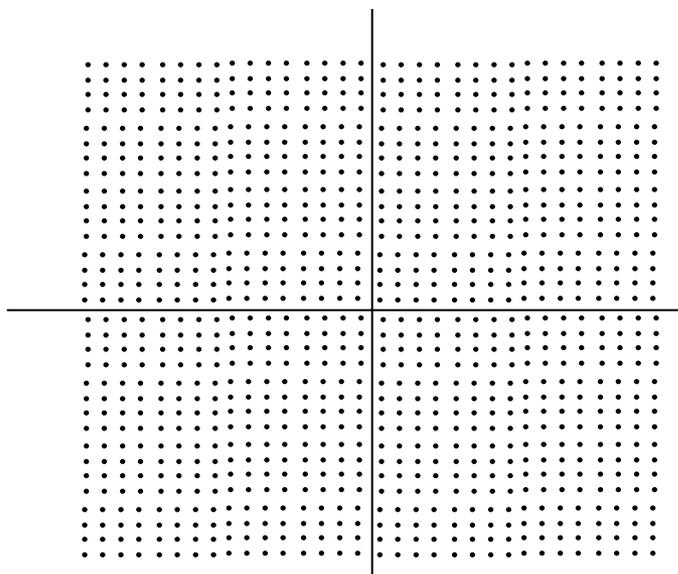
64-QAM (6)

→ +6dB



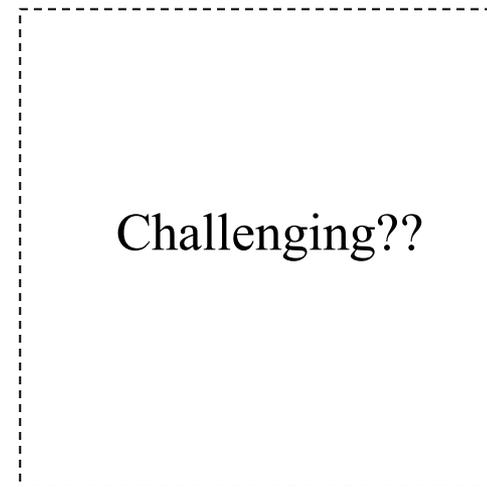
256-QAM (8)

→ +6dB



1024-QAM (10)

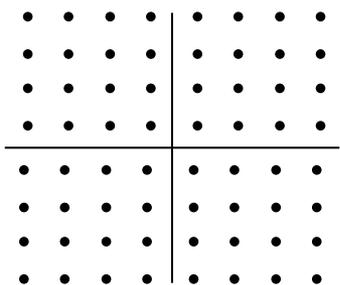
→ +6dB



4096-QAM (12)

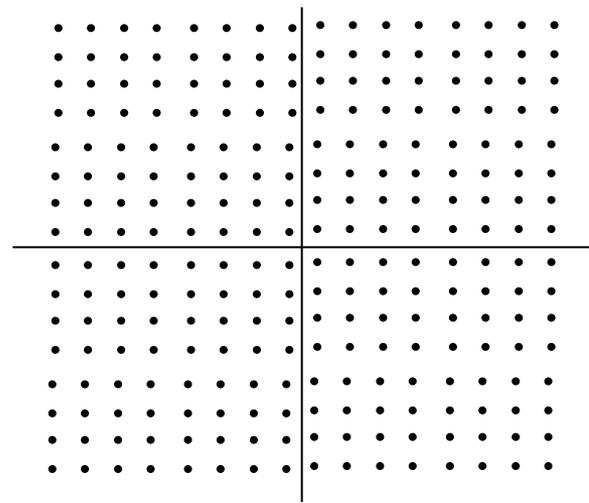
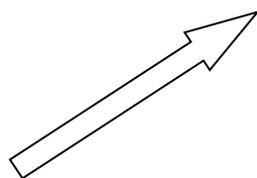


SNRが4倍大きくなったら？



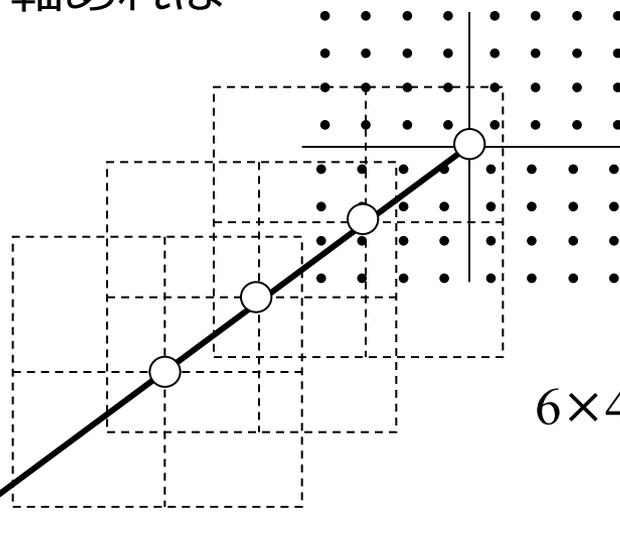
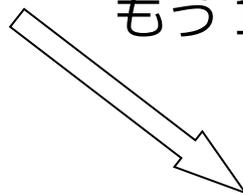
64-QAM
6 bit/symbol

2 直交軸のまま



256-QAM
8 bit/symbol

もう 1 軸あれば



この直交軸は？

それが空間軸

$6 \times 4 = 24$ bit/symbol

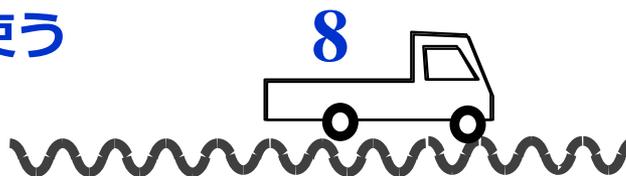
高SNRのケースでは

例：8bit/symbol/シングルストリーム

Case 1: ひとつの道だけを使う

送信情報

P_T



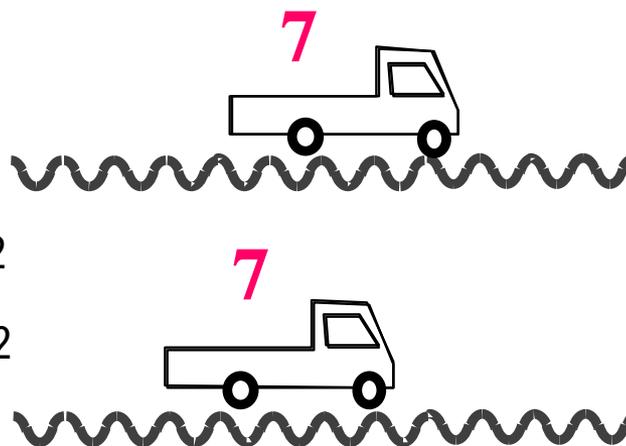
8

Case 2: 二つの道を使う

送信情報

$P_T/2$

$P_T/2$



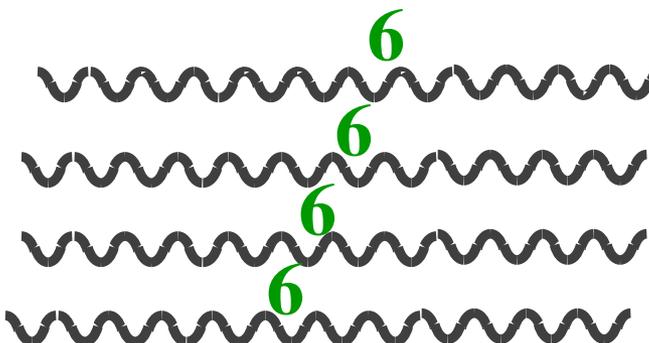
14

Case 3: 四つの道を使う

送信情報

$P_T/4$

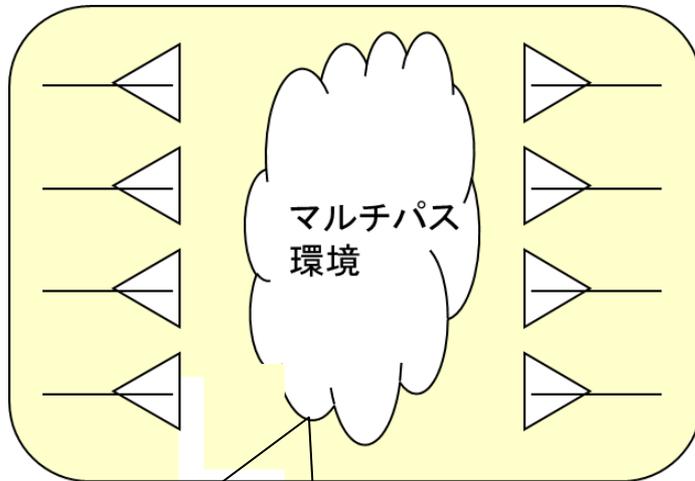
$P_T/4$



24

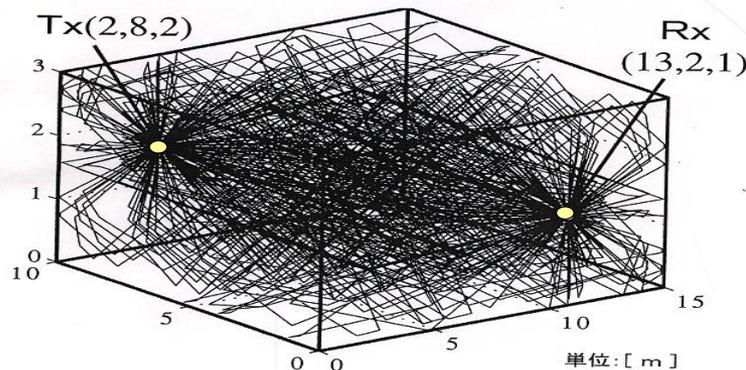
MIMOとは？

アレーアンテナ



マルチパス伝搬

[パスプロファイル]



送受信にアレーアンテナを用いることで、信号の入力(送信側)も、信号の出力(受信側)も、複数の信号を並列に扱うことができる

+

マルチパス伝搬を積極的に利用し、複数のチャネル(電波の通り道)を実現する

通信

||

情報をたくさん送ることができる



MIMO Channel Expression
(SVD: 特異値分解
Singular Value Decomposition)

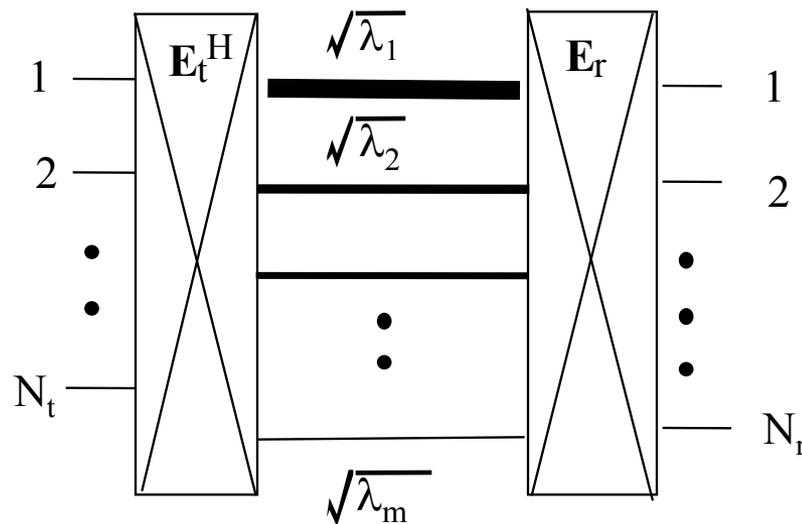
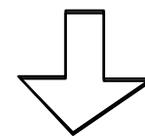
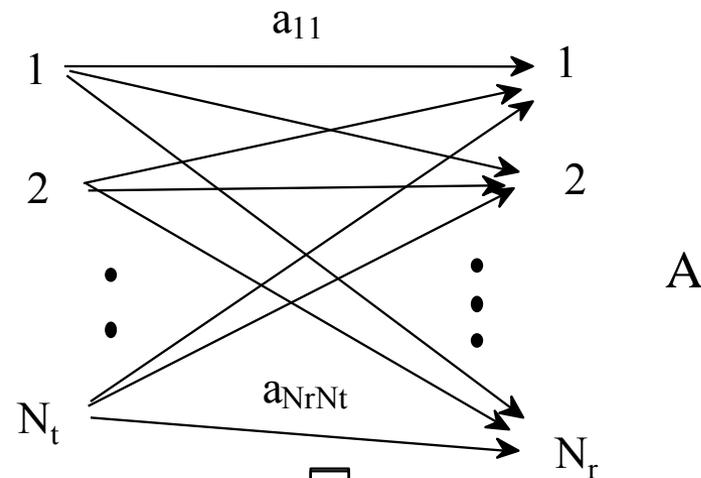
$$A = E_r D E_t^H = \sum_{i=1}^m \sqrt{\lambda_i} \mathbf{e}_{r,i} \mathbf{e}_{t,i}^H$$

$$D \equiv \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sqrt{\lambda_m} \end{bmatrix}$$

$$E_t \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{t,1} & \mathbf{e}_{t,2} & \dots & \mathbf{e}_{t,m} \end{bmatrix}$$

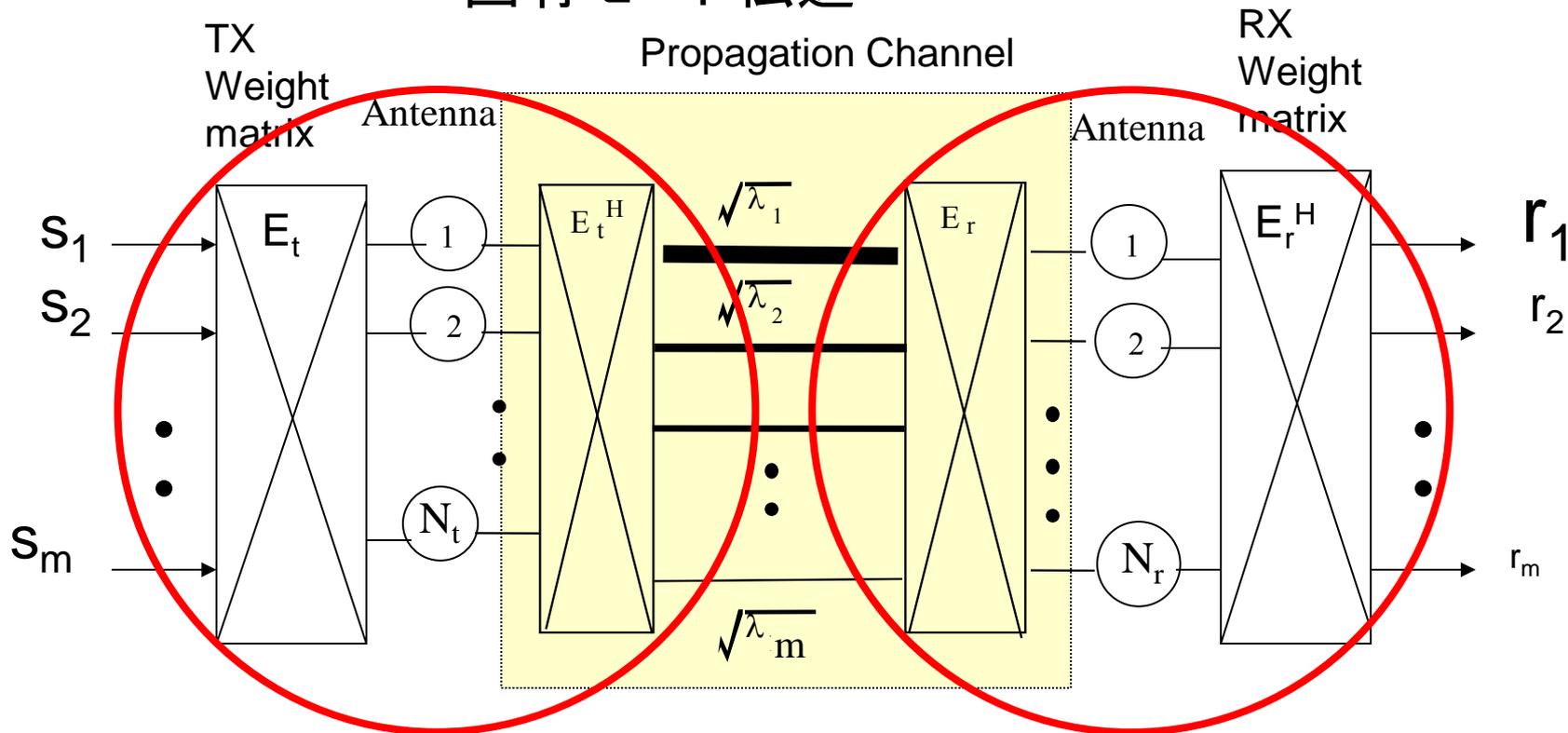
$$E_r \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{r,1} & \mathbf{e}_{r,2} & \dots & \mathbf{e}_{r,m} \end{bmatrix}$$

$$m \equiv \min(N_t, N_r)$$

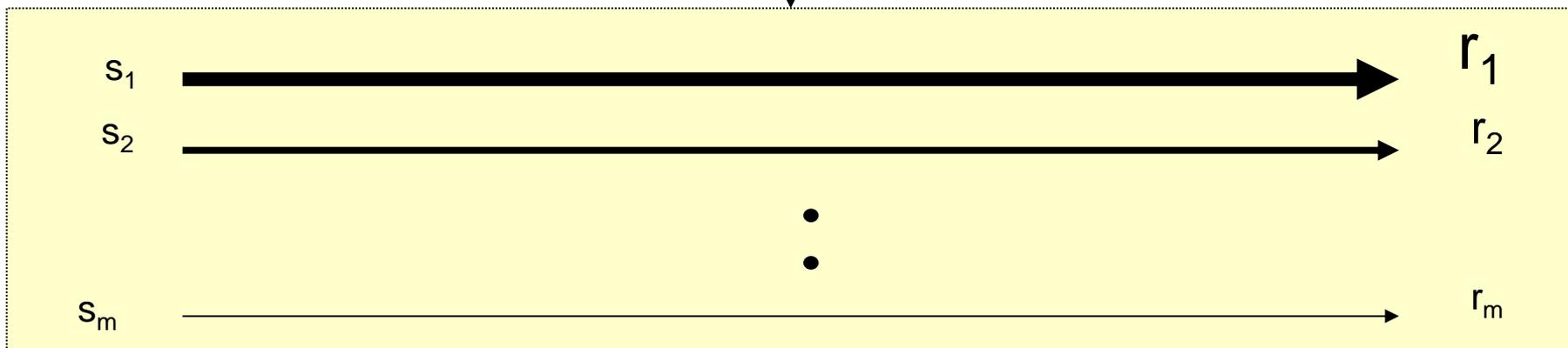




固有モード伝送

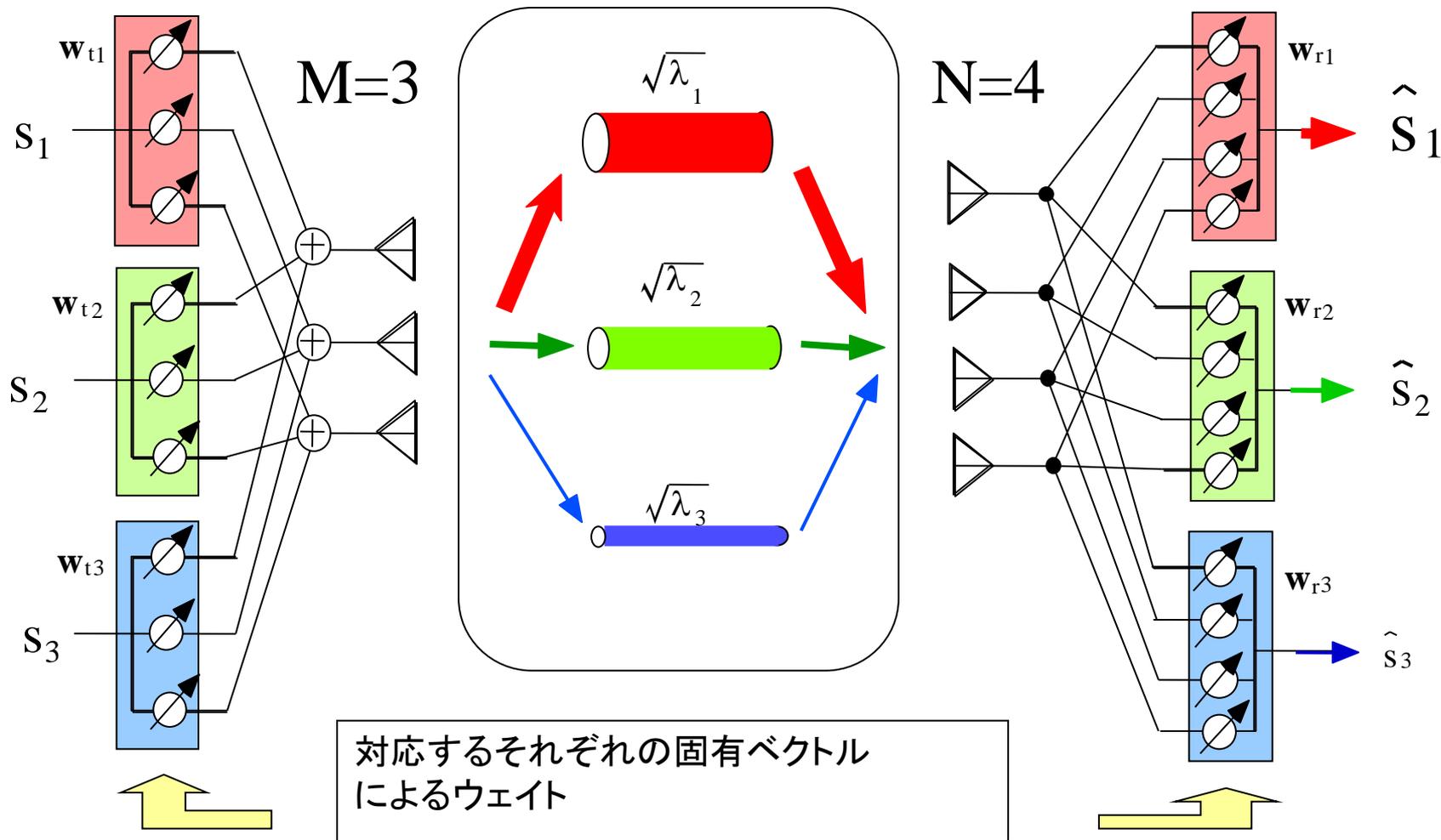


固有モード伝送



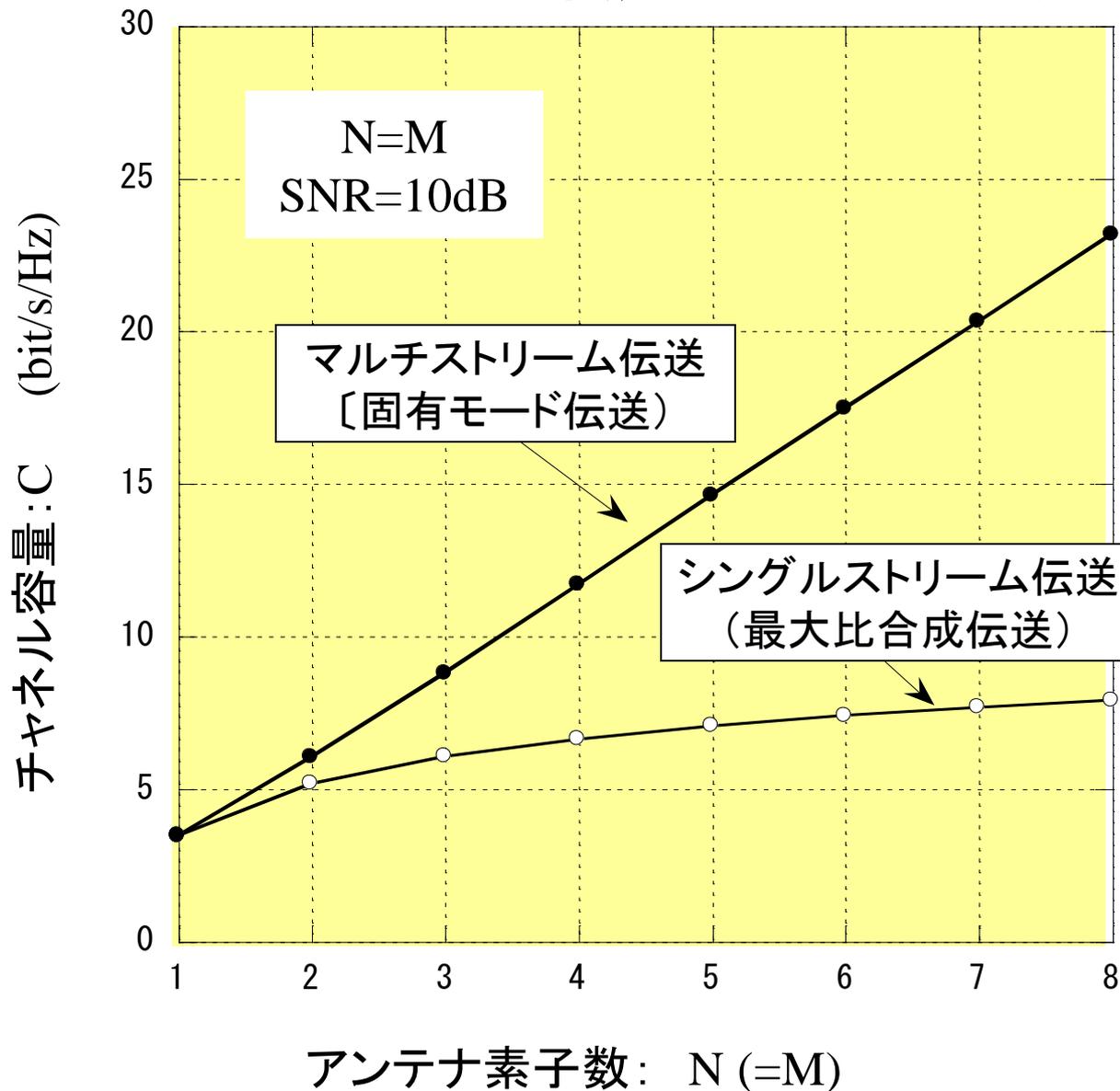


SVDを利用した信号の並列伝送：固有モード伝送





シングルストリーム伝送 vs マルチストリーム伝送



注意！！

この比較はあくまで、
SN比が高いところで
チャンネル容量を
比較したもの

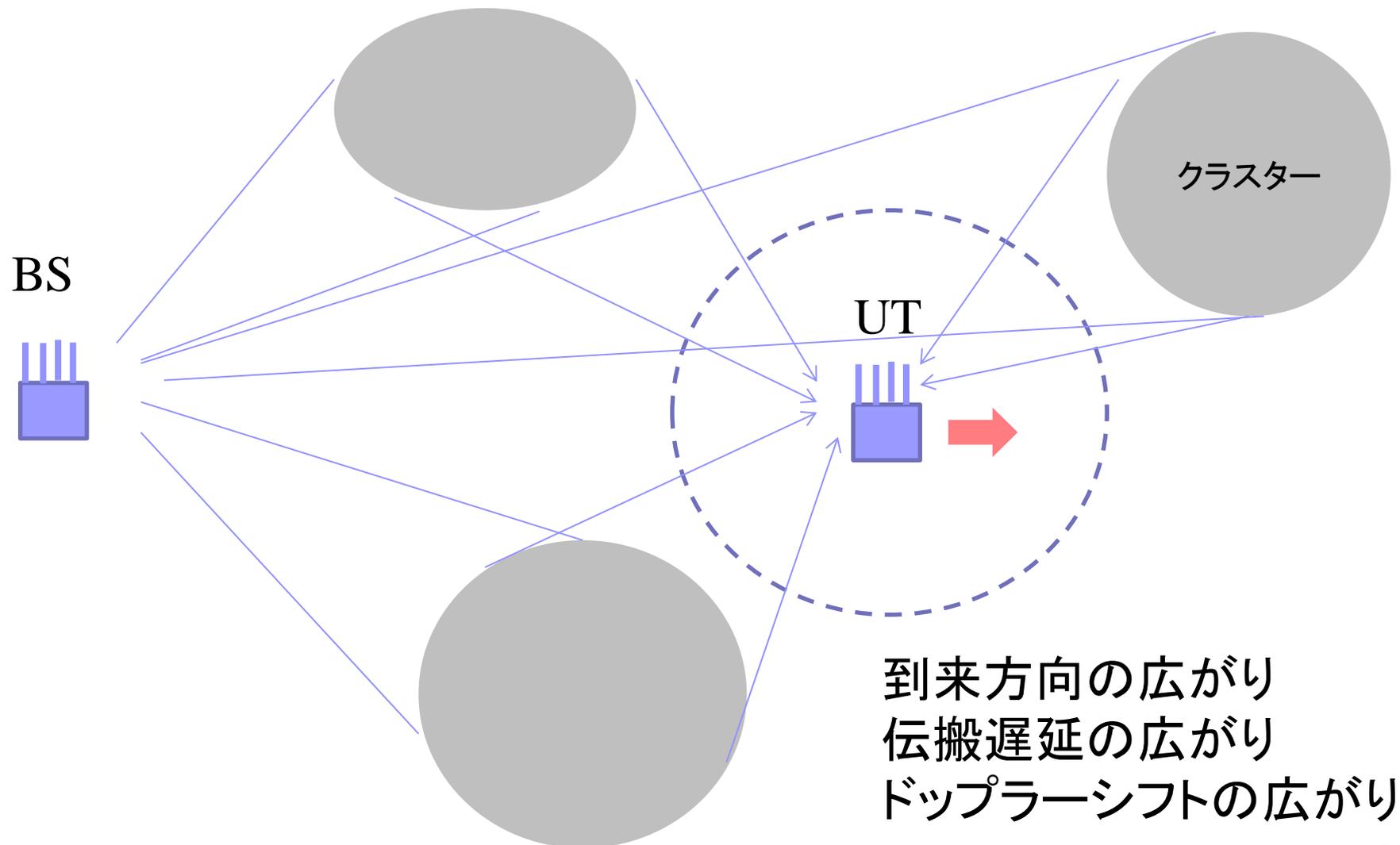
MS伝送がSS伝送より
優れていると言うことを
一般的に言っている
わけではない

MIMOの研究動向

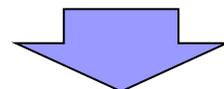
- 情報伝送方式
 - システム応用
 - 装置開発(基地局、端末)
- 実用面でかなり、研究開発が進んできた
- **MIMO端末特性評価環境(OTA測定系)構築と測定法**

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

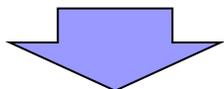
MIMO電波伝搬環境



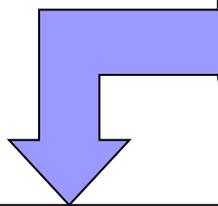
MIMO端末を実際に近い電波環境で評価したい



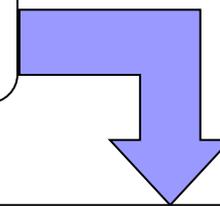
測定環境が必要



MIMO-OTAシステムの構築



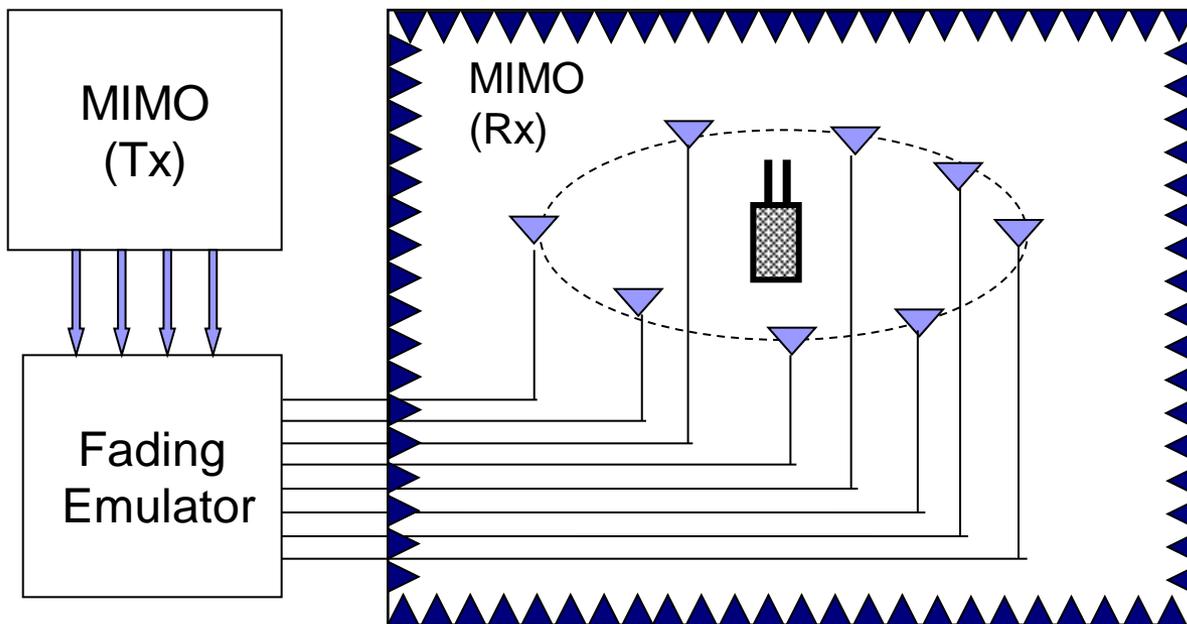
Fading Emulator 方式



電波反射箱方式
Reverberation Chamber Type

OTA: Over-the Air

MIMO-OTA の2方式

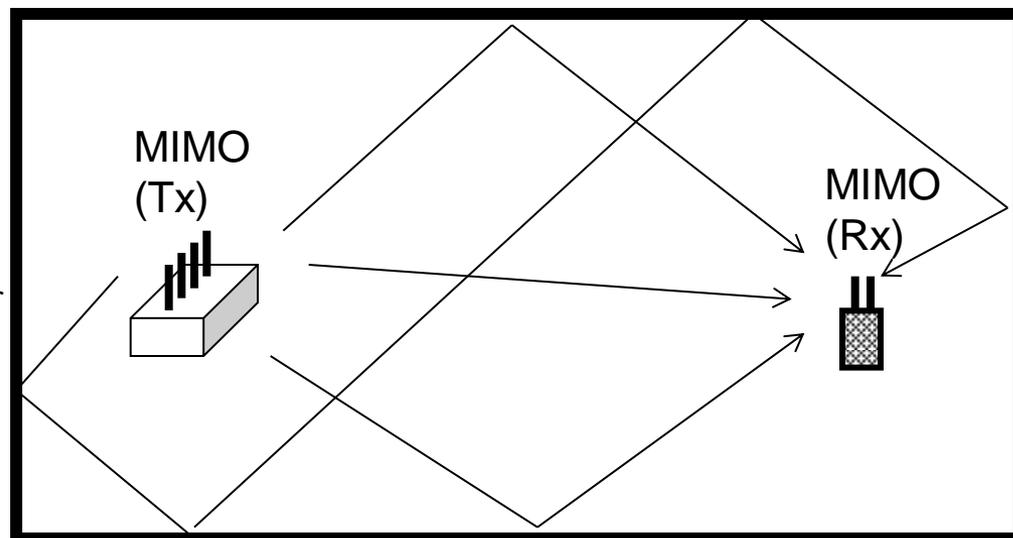


フェージング
エミュレータ型 (FE)

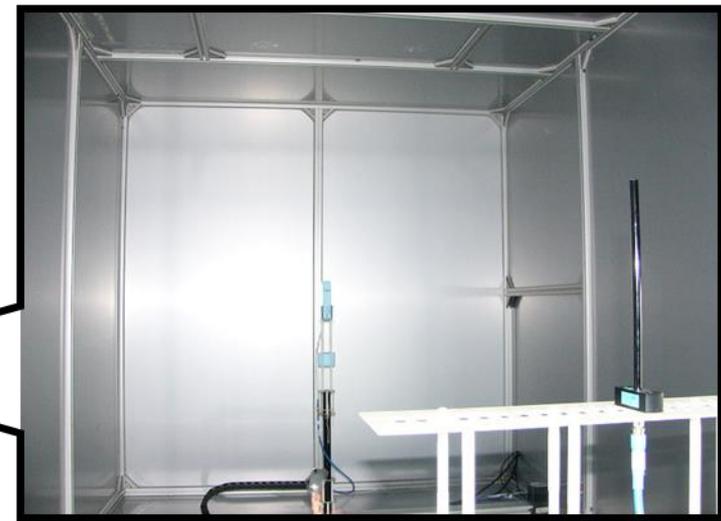
- 種々の機能を入れやすい
- パラメータ制御の柔軟性
- 高構築コスト

電波反射箱型
Reverberation Chamber (RC)

- 遅延を伴う、マルチパス
リッチ環境
- 低構築コスト
- パラメータ制御の非柔軟性



4m×2m×2mの電波反射箱 (Reverberation Chamber)



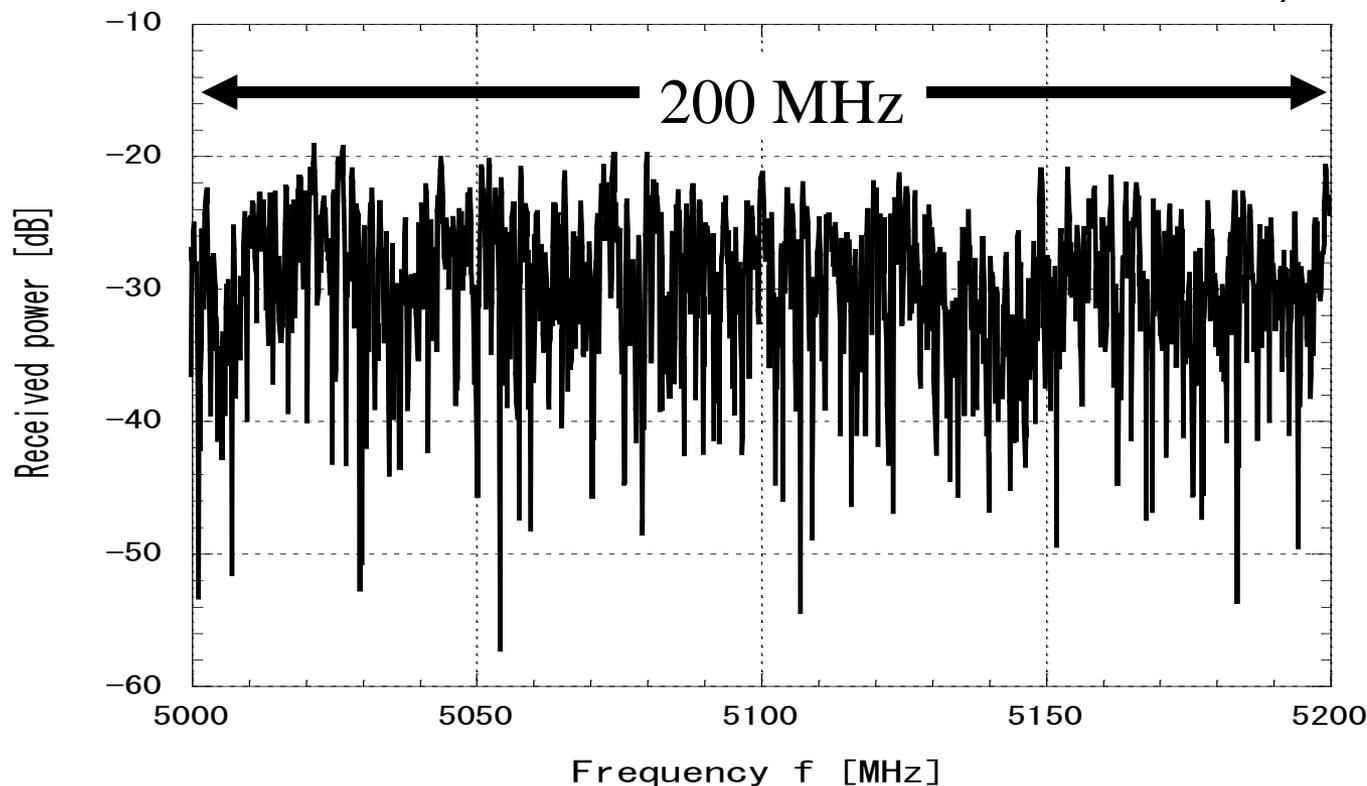
なぜ、4(m) × 2(m) × 2(m)
のサイズか？

- 遅延の大きさが1 μ s以上であるマルチパス環境を作りたい
- 人間が入って作業しやすい
- 屋内に設置できる
- 2(m) × 1(m)の定尺サイズのパネルで組み立てたい



基本ブロックデータ

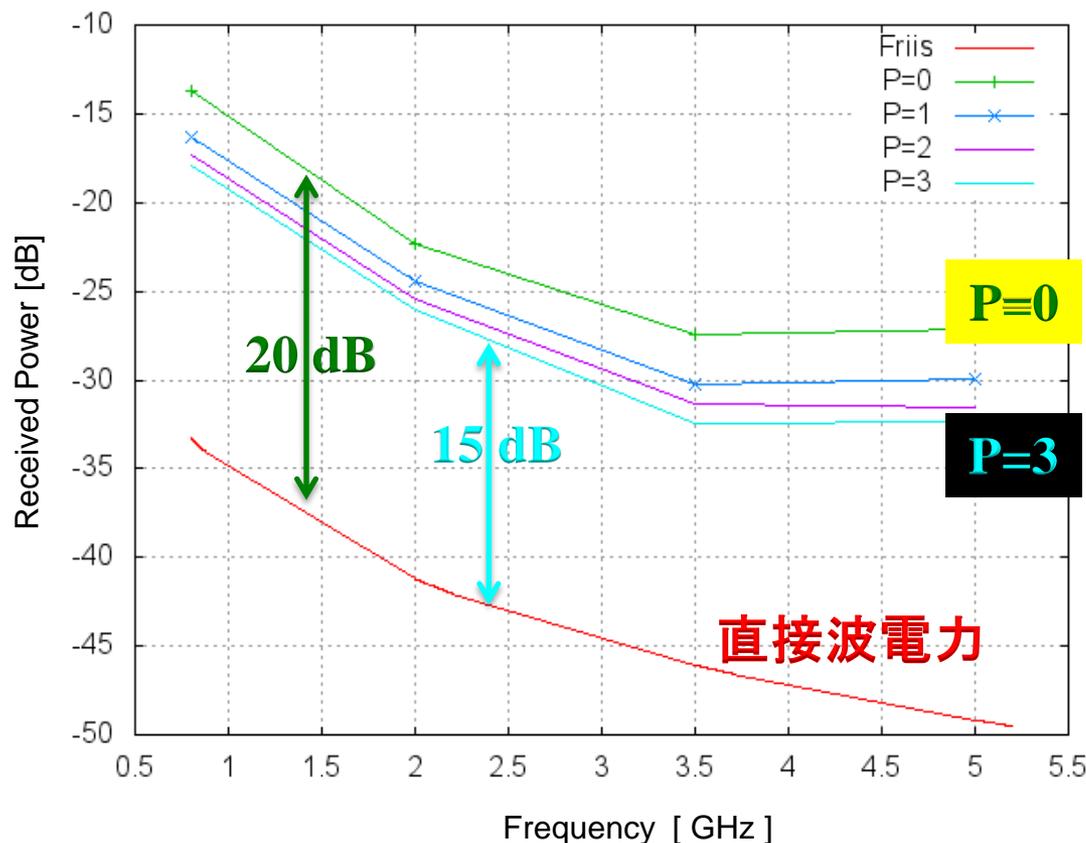
測定基本データ(生データ)の一例 (周波数 5 GHz, 偏波 V-V, 移動方向 y, シート数 0, ポジション ①)



- ・周波数軸上に、レイリーフェージングが発生している(1,601ポイント)
- ・空間的に測定位置をずらして、ブロック数を多くし(ブロック数:61)、総合データ数を増やす



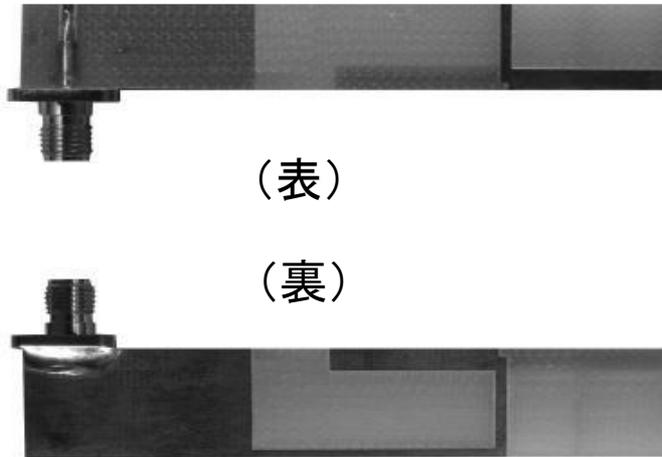
平均受信レベルの周波数依存性 (送信出力を基準とした受信電力)



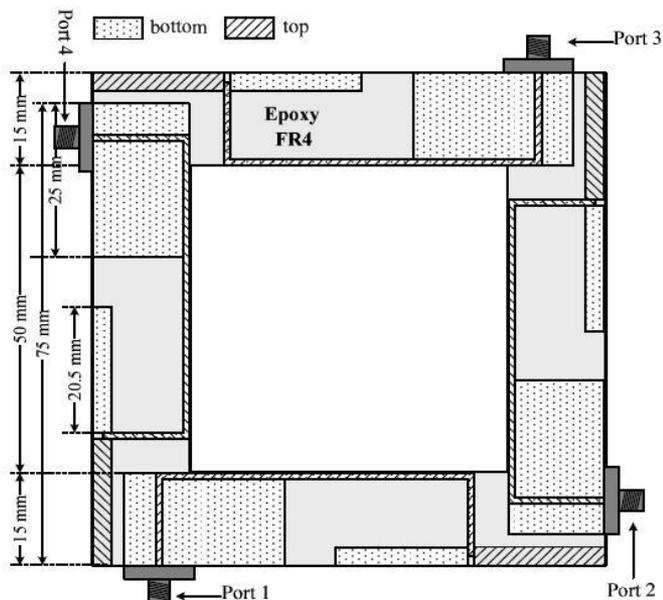
偏波 V-V,
移動方向 y,
ポジション ①

- ・周波数が小さいほど平均受信レベルは大きくなる (f^2 の特性に近い)
- ・吸収シート無では、直接波のレベル (Friis の公式で計算) より 20 dB (100 倍) 以上強い
- ・吸収シート 3 枚入れても 15 dB 以上、マルチパス電力が強い

応用例: 超広帯域アンテナの通信路容量特性評価には電波反射箱が適している



超広帯域アンテナの基本構造



4 × 4 MIMOアンテナ構成

VSWR

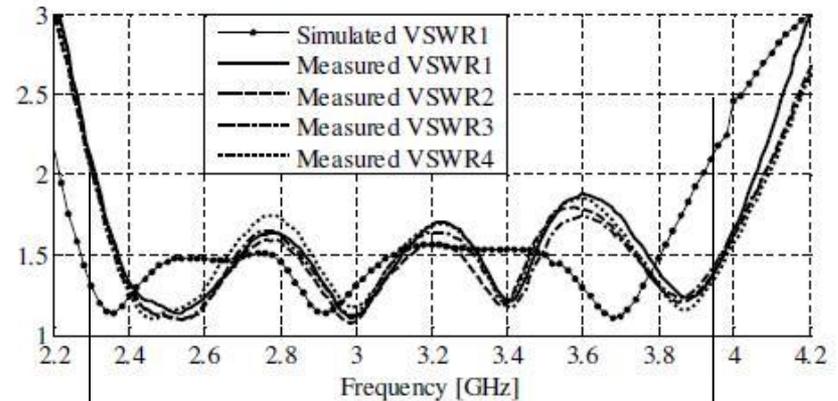


Fig. 13 VSWR characteristics of array ports

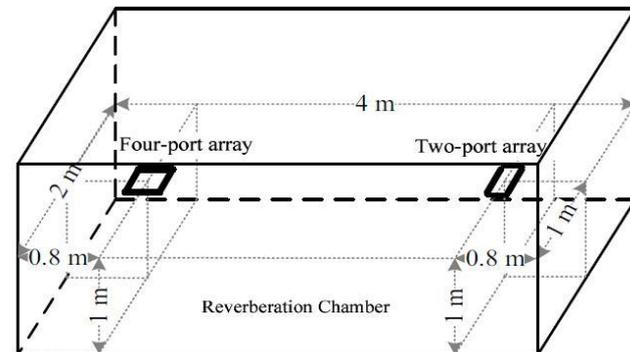
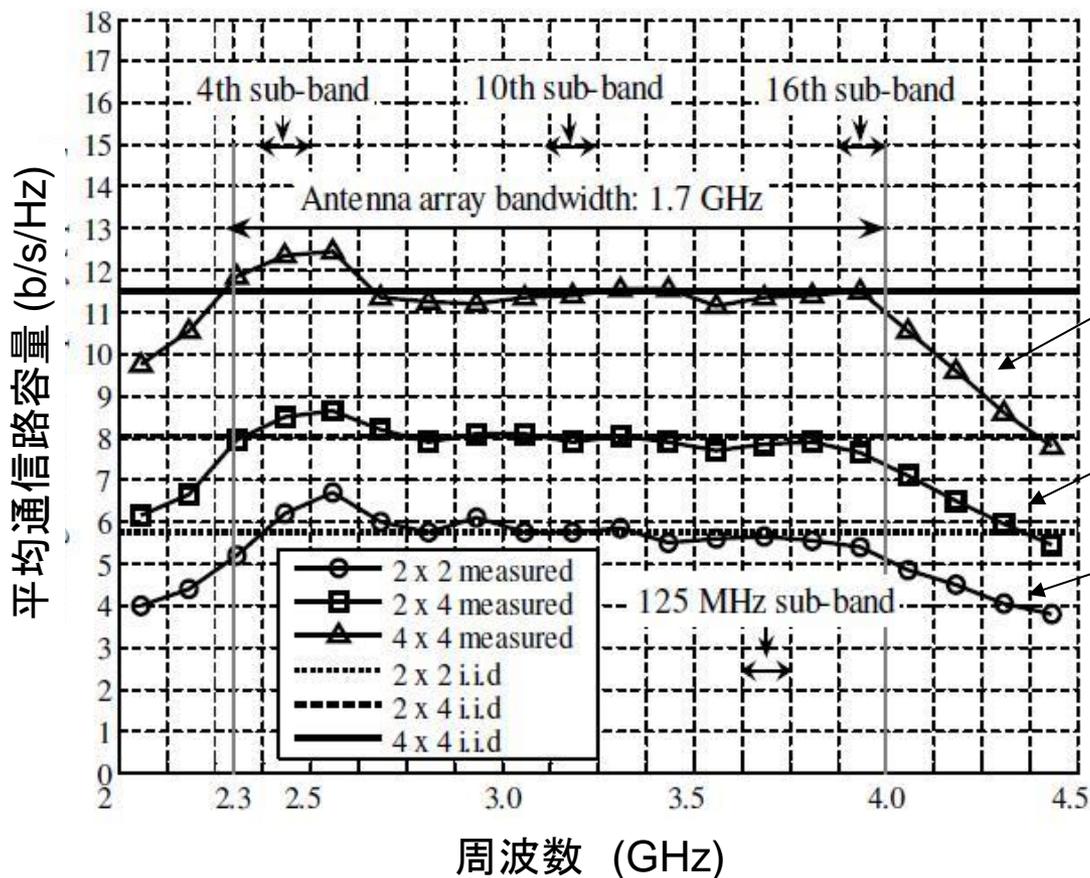
1.7 GHz

このアンテナのマルチパス環境での
4x4 MIMO伝送特性(通信路容量)を
広帯域にわたって測定したい



超広帯域アンテナのコグニティブ無線応用: その特性評価

マルチパス環境での通信路容量の周波数特性



電波反射箱は
こういう測定に
有効

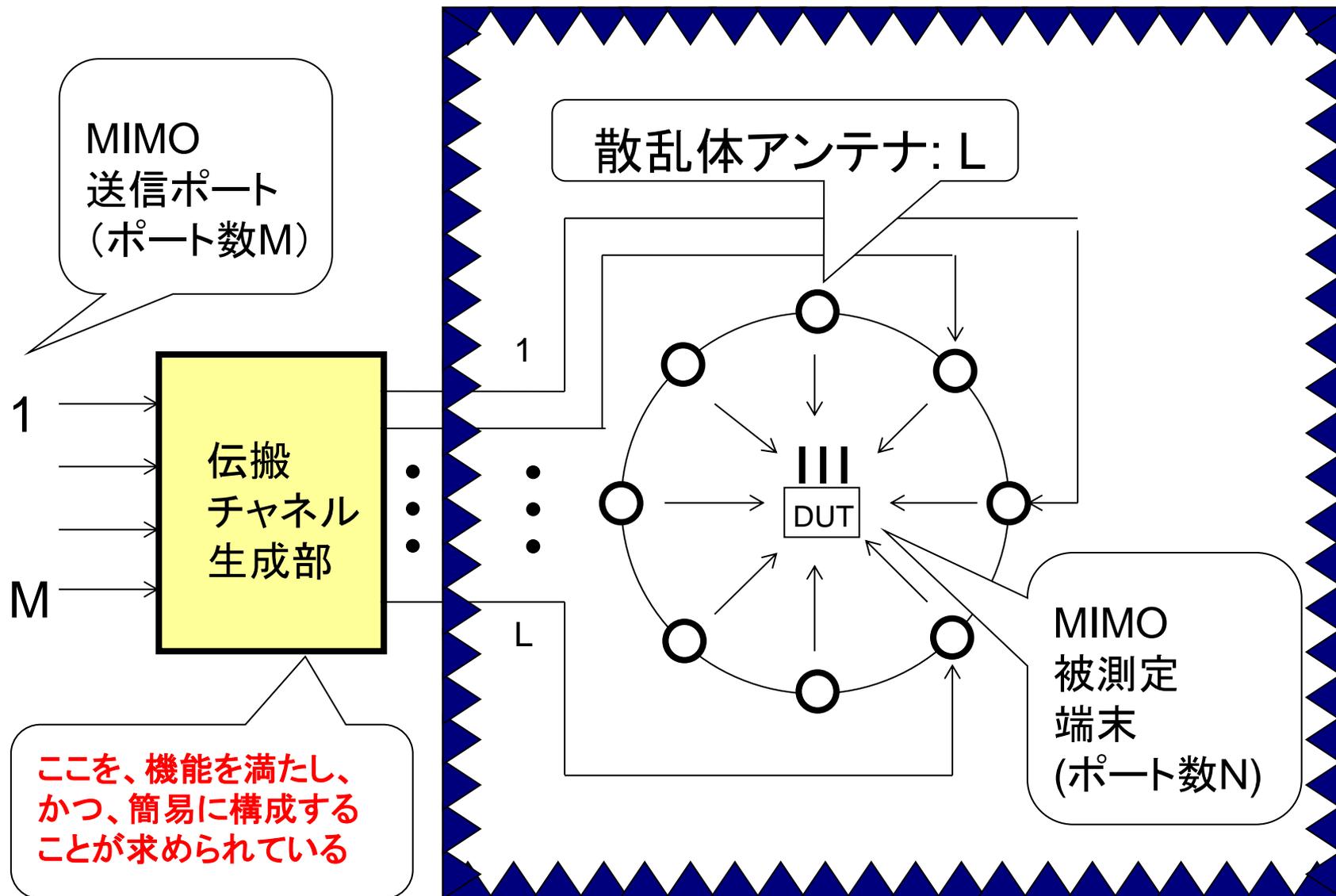
4 × 4

4 × 2

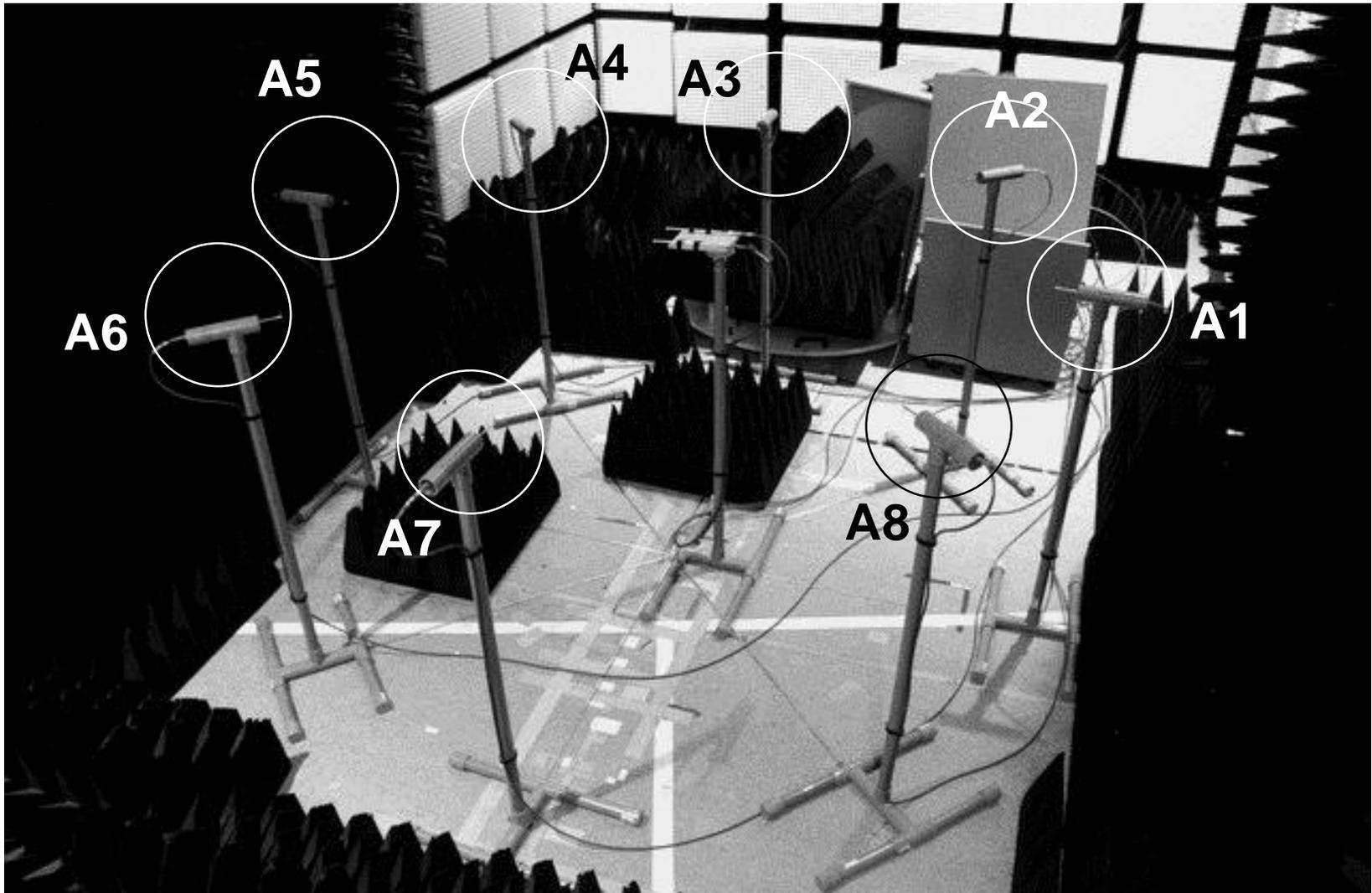
2 × 2

シンプルなものにも、シンプル
な使い方がある!!

フェージングエミュレータ(FE)タイプOTA: 全体構成

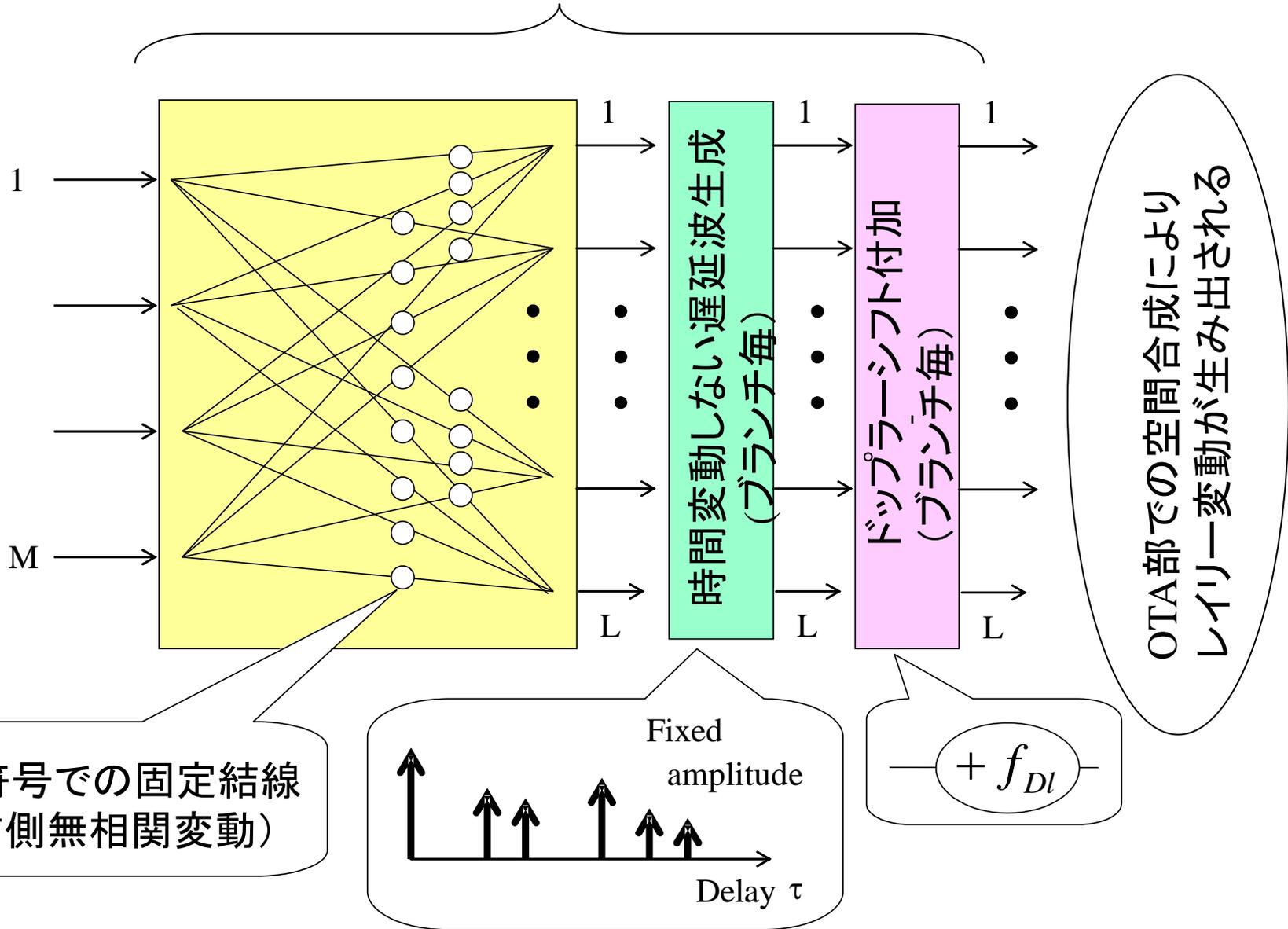


Experiment in an Anechoic Chamber (2x8x2; f=5GHz)



FE-2型 (アンテナブランチ制御型: 提案方式)

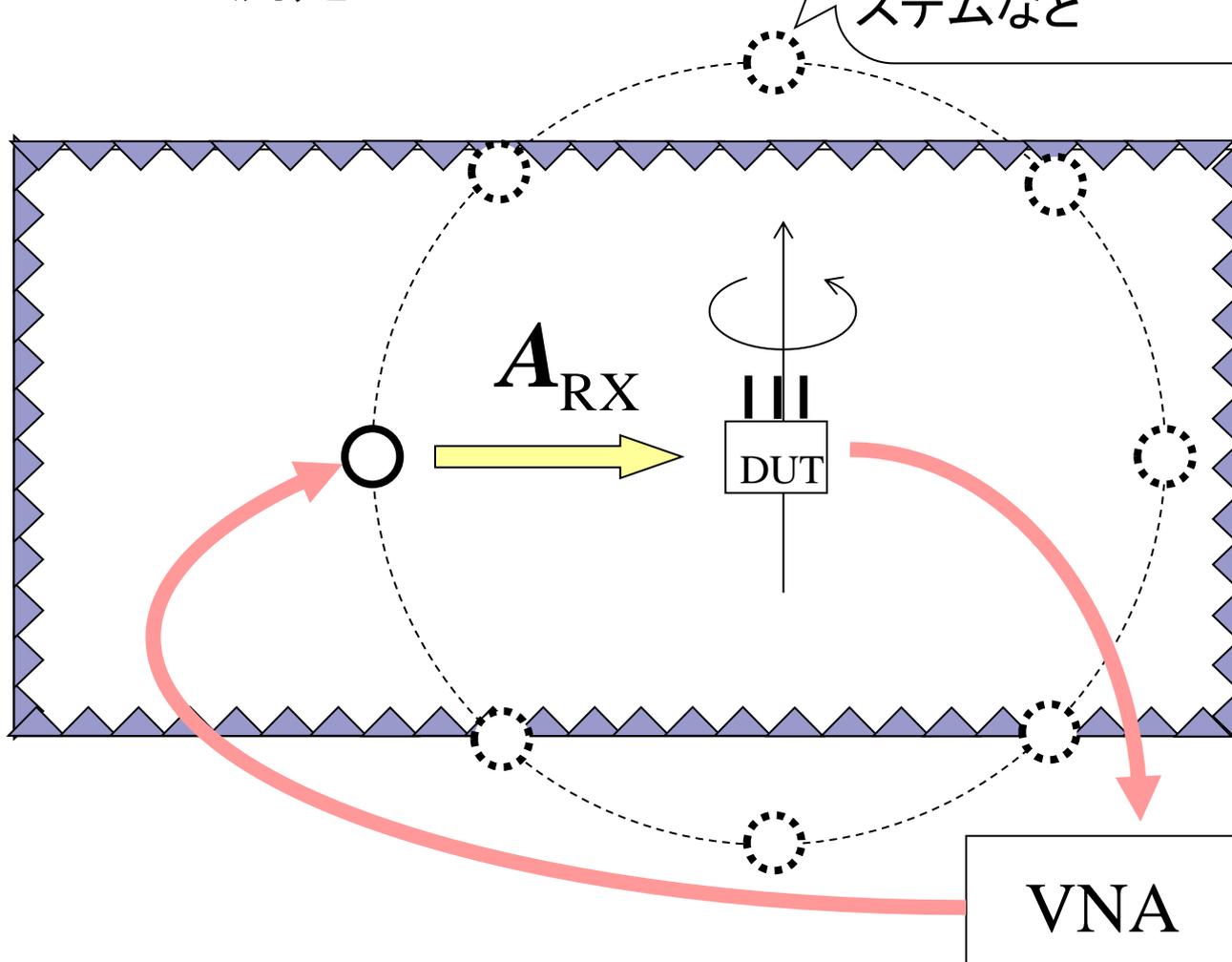
特徴: 機能分担し、夫々に時間変動制御をどこにも含まない



MIMO-OTA測定法:2ステージ法

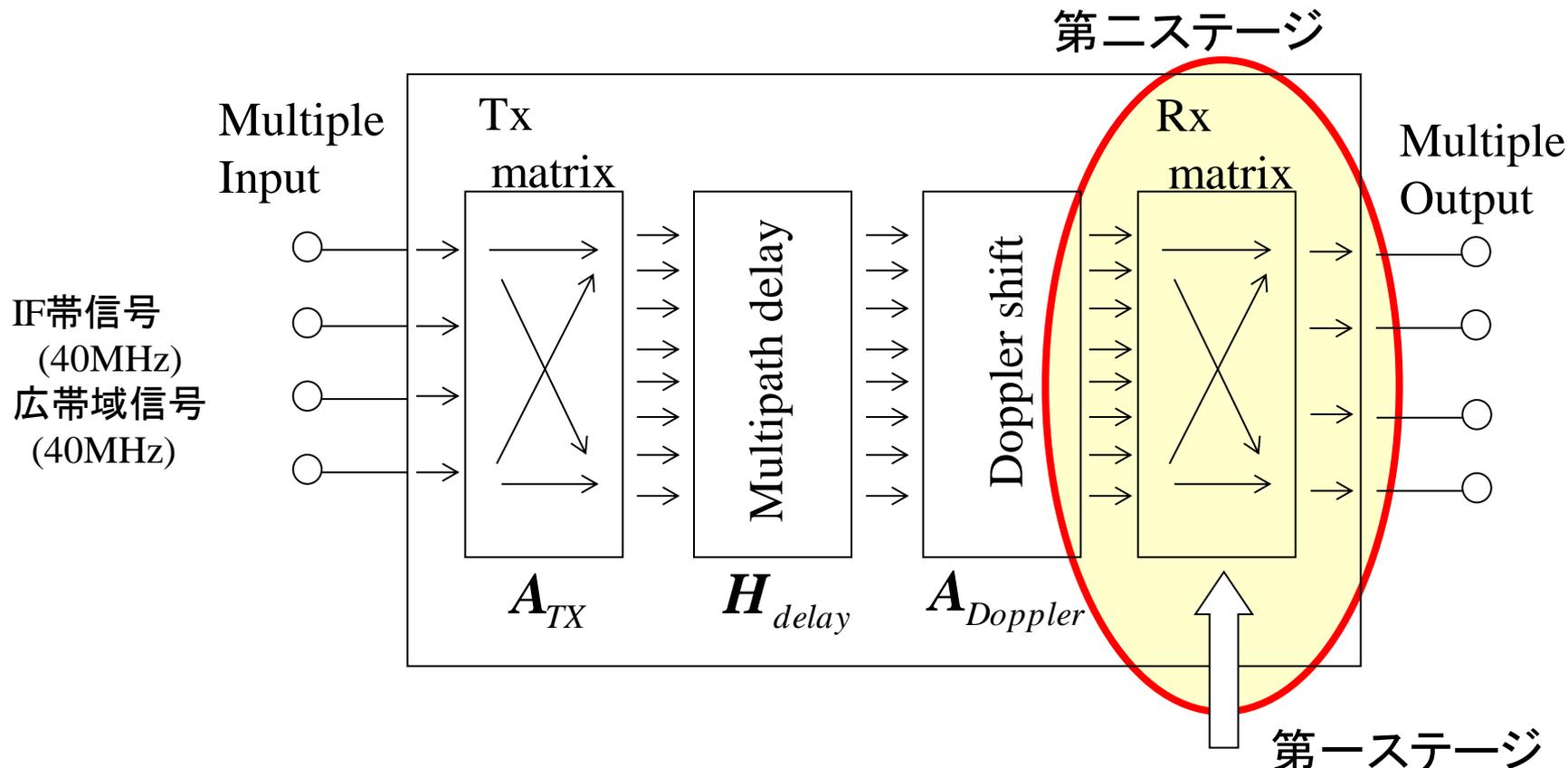
第1ステージでの測定

電波暗室内にプローブアンテナを配置できるスペースがない、例えば、自動車に取り付けられた大規模アンテナシステムなど

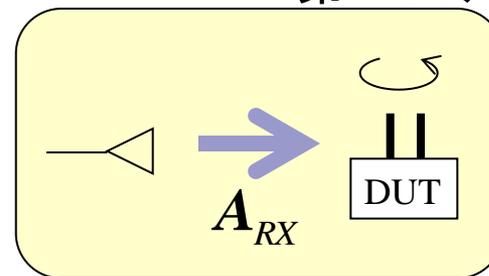




2ステージ法を取り入れた提案構成 (FE-2型簡易構成)

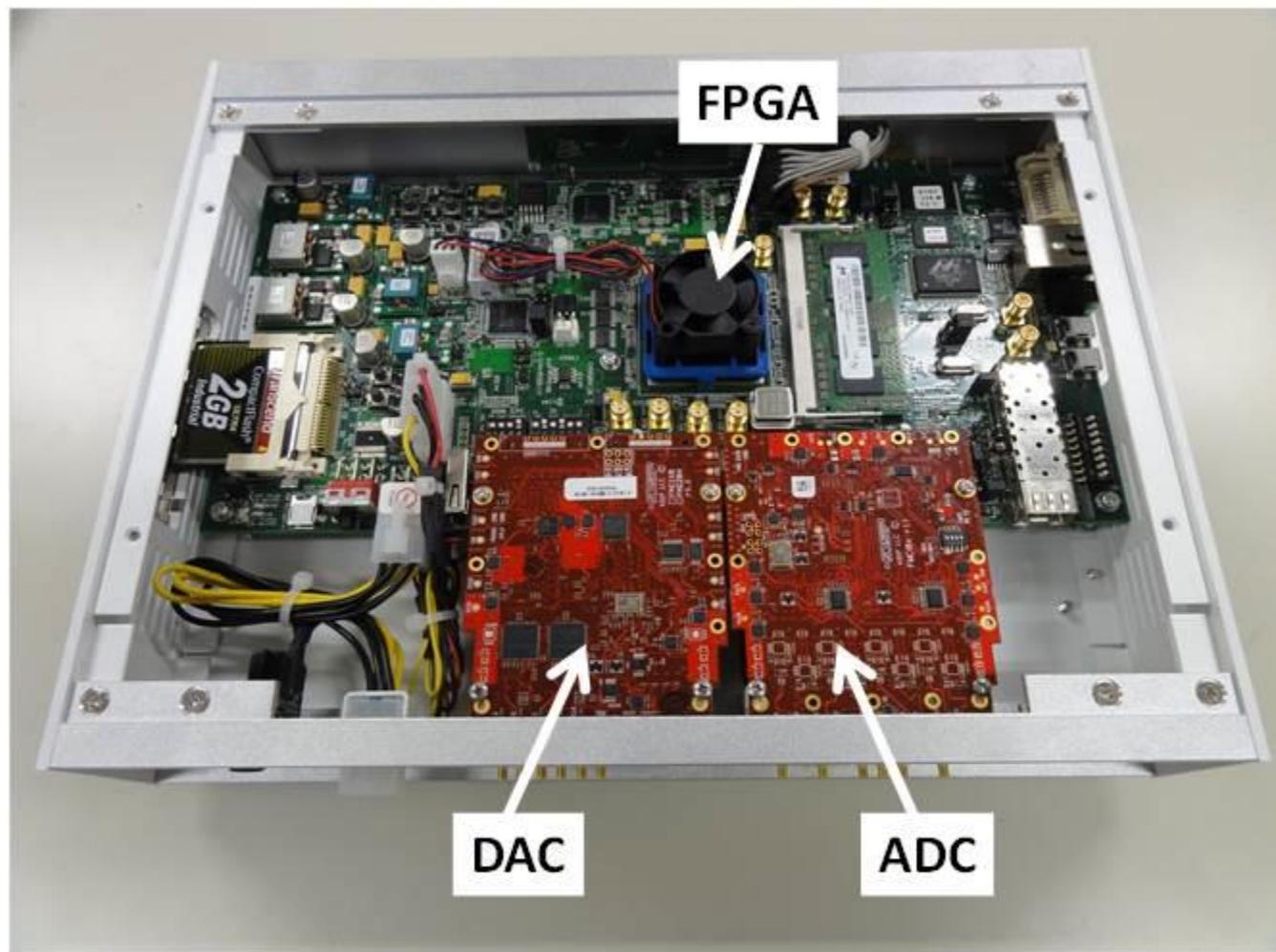


MIMO-OTA測定システムというよりは
MIMOフェージングエミュレータ
と呼ぶのが相応しい



試作したMIMOフェージングエミュレータの性能諸元 (FPGA実装)

FPGA	評価ボード 搭載IC	XILINX ML605 XLINX Virtex-6 LX240T XC6VLX240	
入出力	A/D コンバータ D/A コンバータ 入力ポート数M 出力ポート数N サンプリング周波数 f_s IF 周波数 IF信号帯域	4DSP FMC104 4DSP FMC204 4 4 160 MHz ~40MHz ~40MHz	
信号処理	プローブアンテナ数 L	8	16
遅延	遅延波数K 遅延時間 T_k 分解能	10 6.25ns~50 μ s 6.25ns	6 6.25ns~25 μ s 6.25ns
ドップラー	ドップラー周波数: f_D 分解能	~1MHz 0.60Hz	



試作した信号処理部の外観
(28cm × 22cm × 5cm)

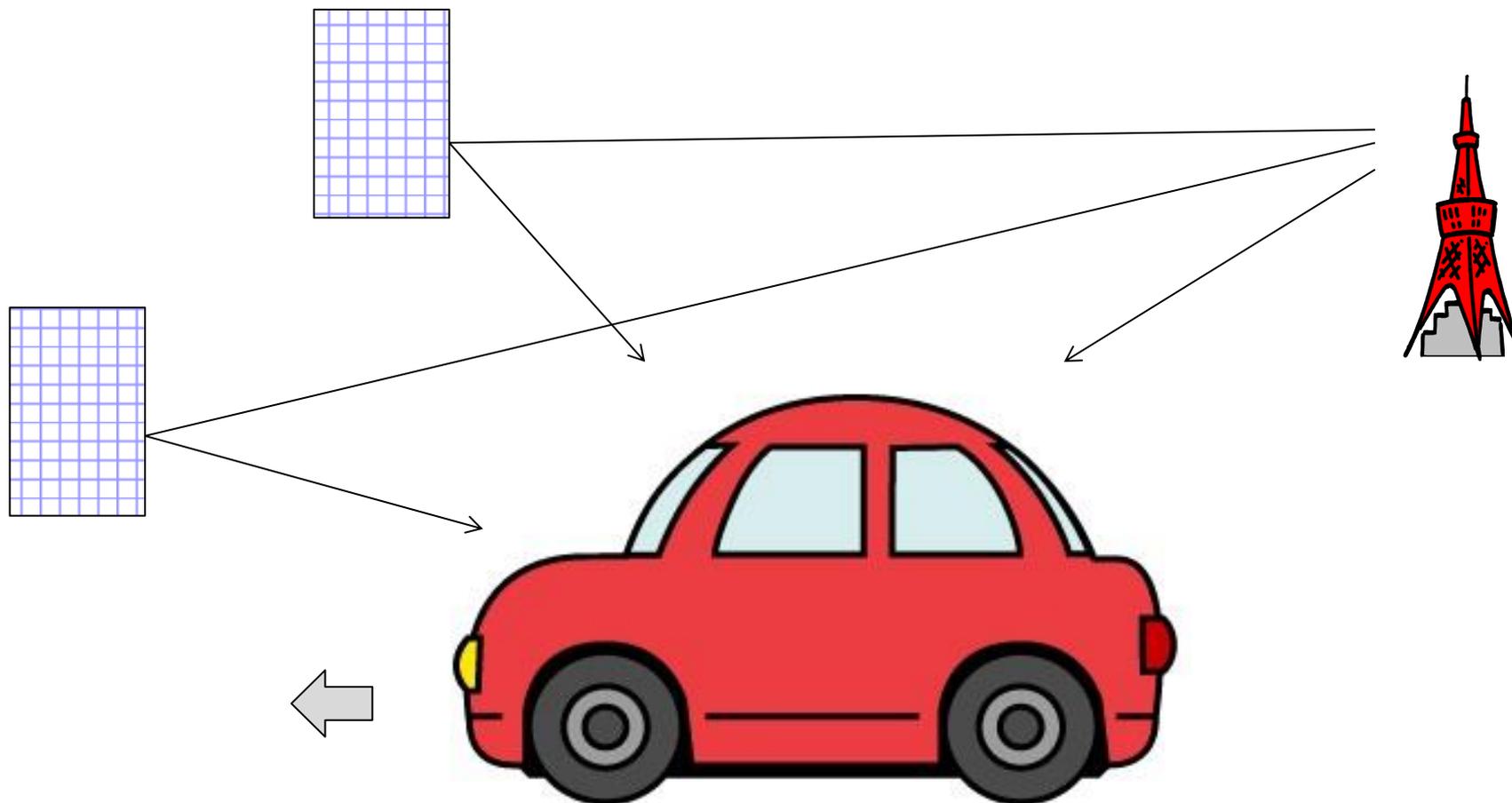


道具ができたので、使ってみたい

- 1) 地デジ信号 (ISDB-T) のMRCダイバーシチ受信
- 2) 無線LANの伝送特性評価

応用その1

地デジ信号 (ISDB-T) のMRCダイバーシチ受信



- 4アンテナMRCダイバーシチ受信特性評価への応用



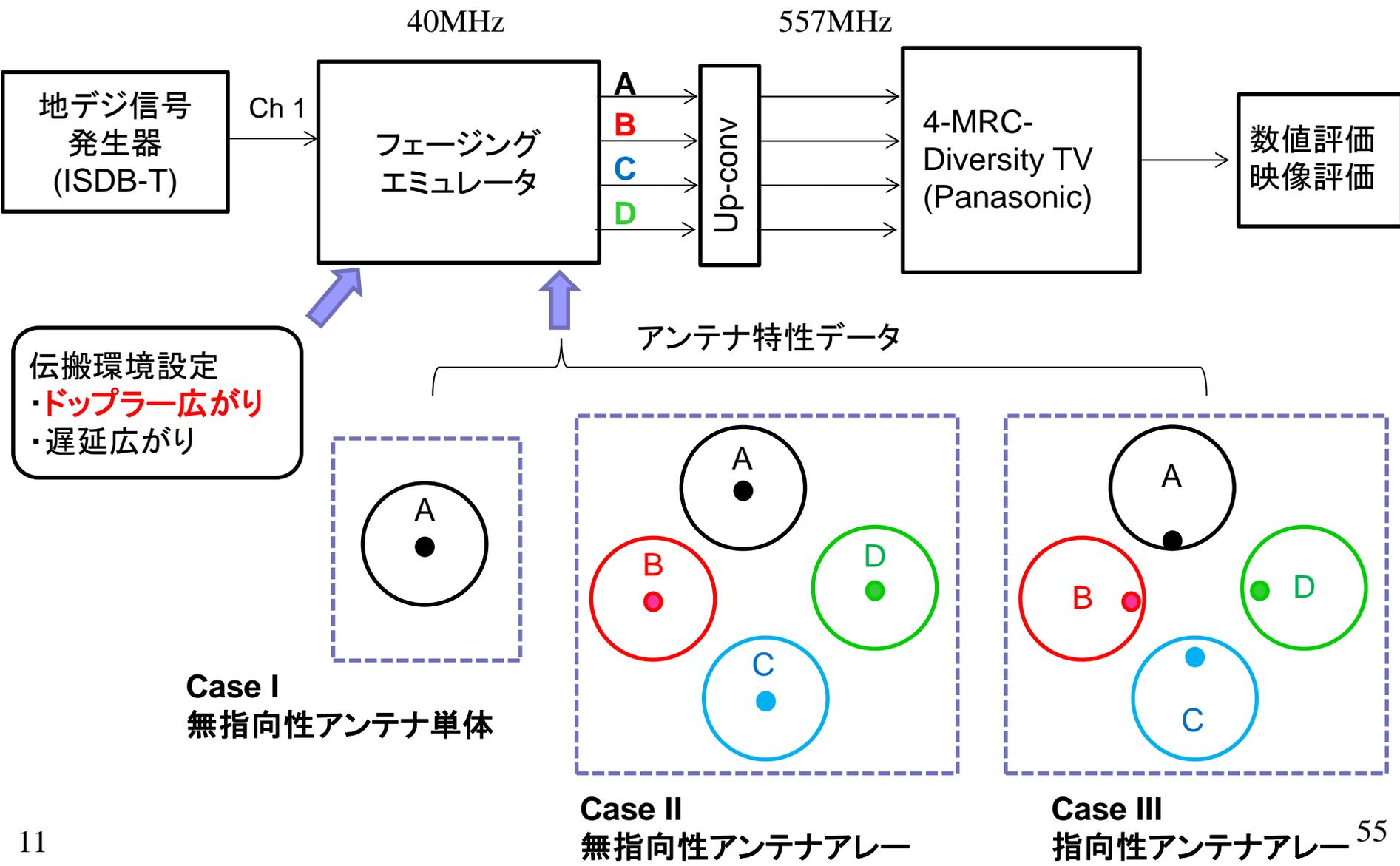
Panasonic TH-L17F1



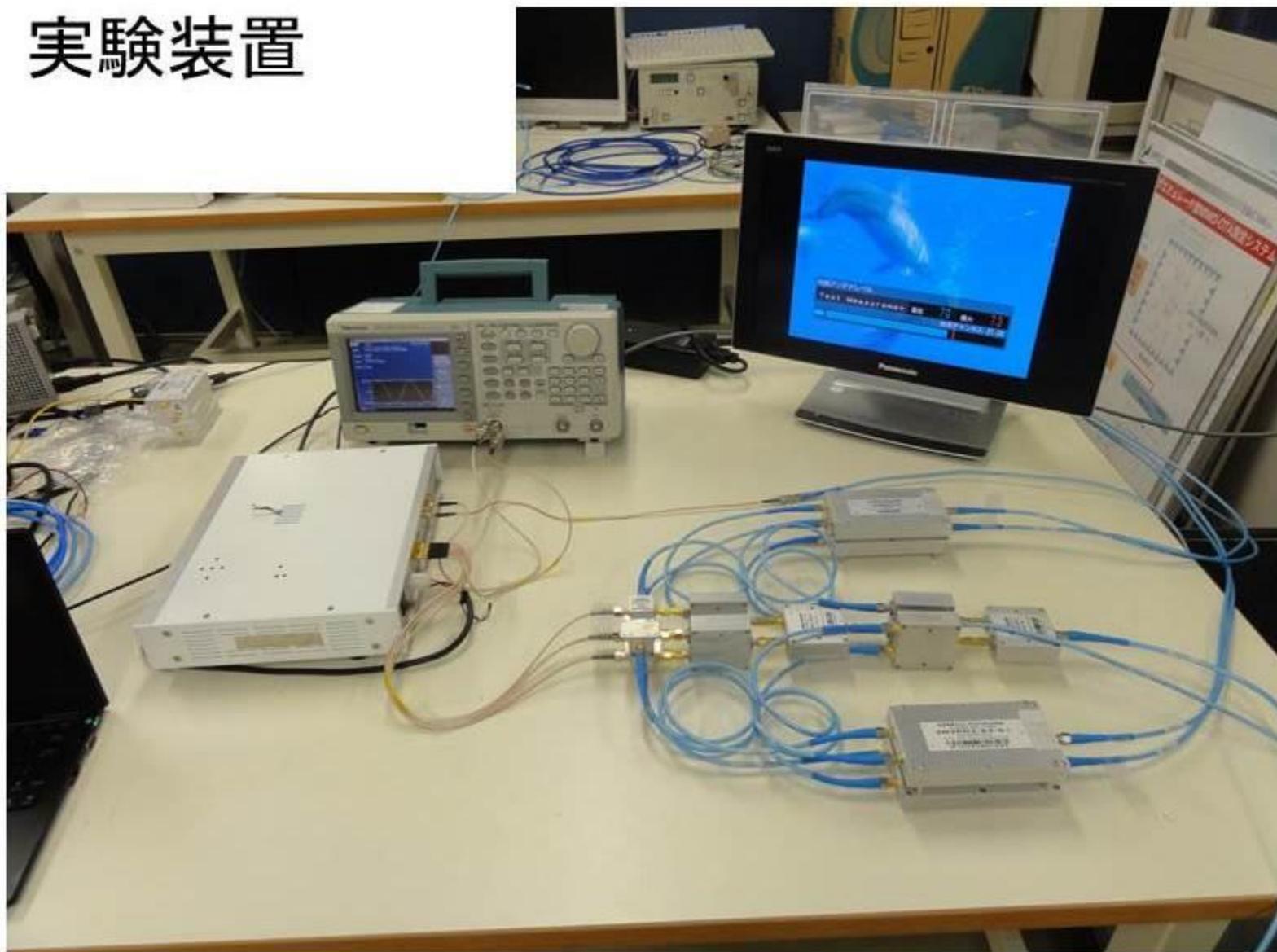
(裏面)



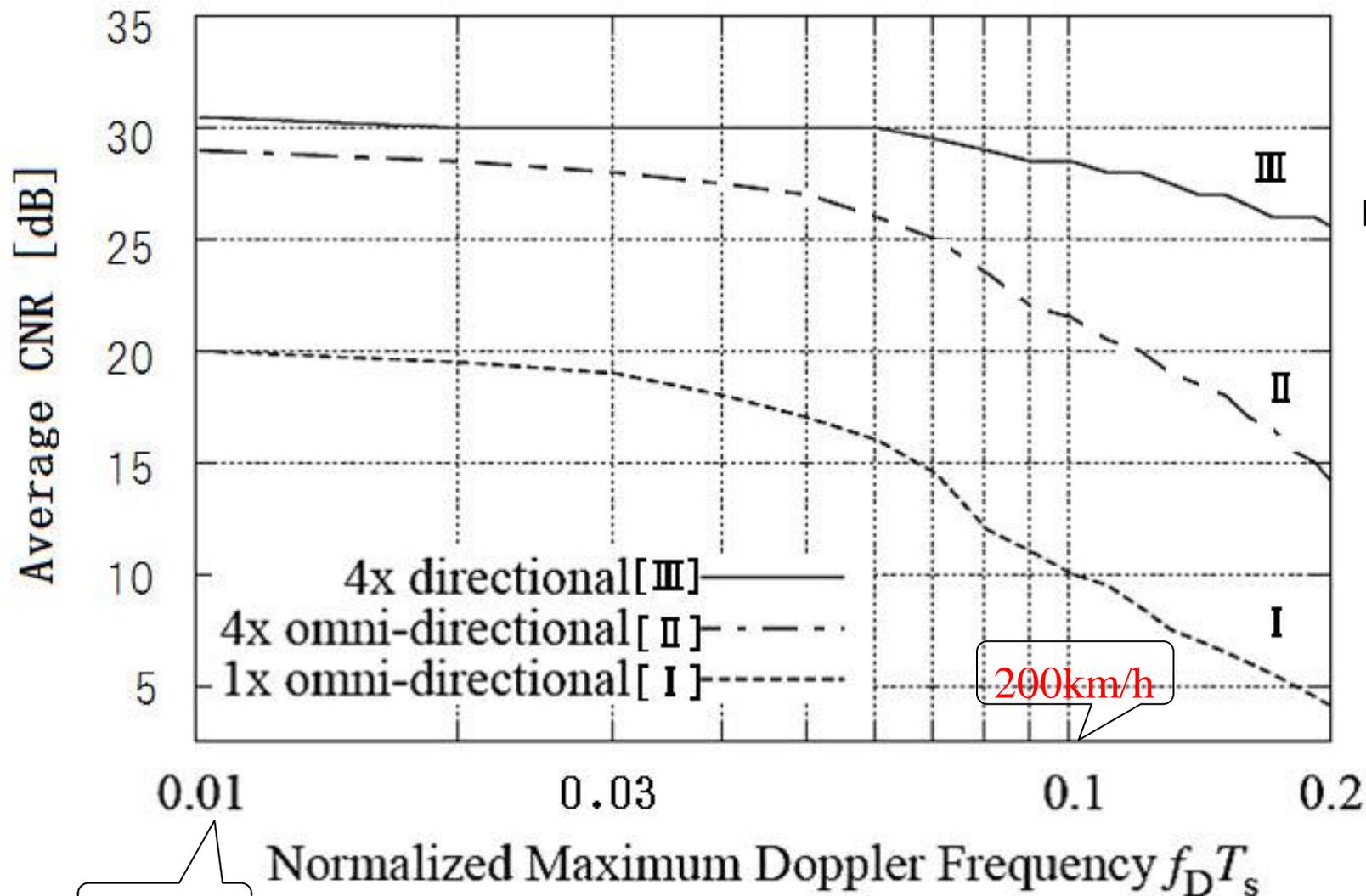
実験系とダイバーシチアンテナ構成



実験装置



評価結果例 (ドップラー広がりに対する耐性)



20km/h

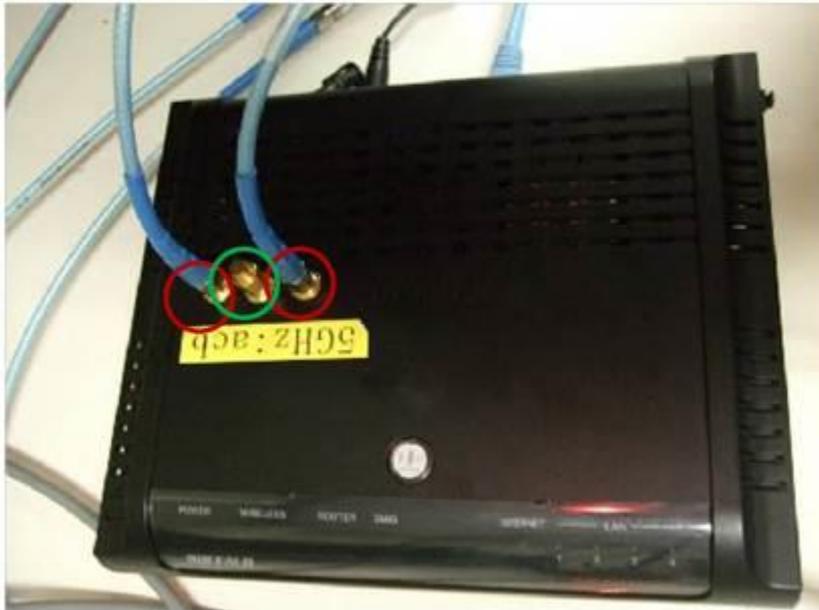
200km/h

映像良



応用その2: 無線LAN(IEEE802.11n)のフェージング耐性評価

AP



WZR-AMPG300NH

UE/UT

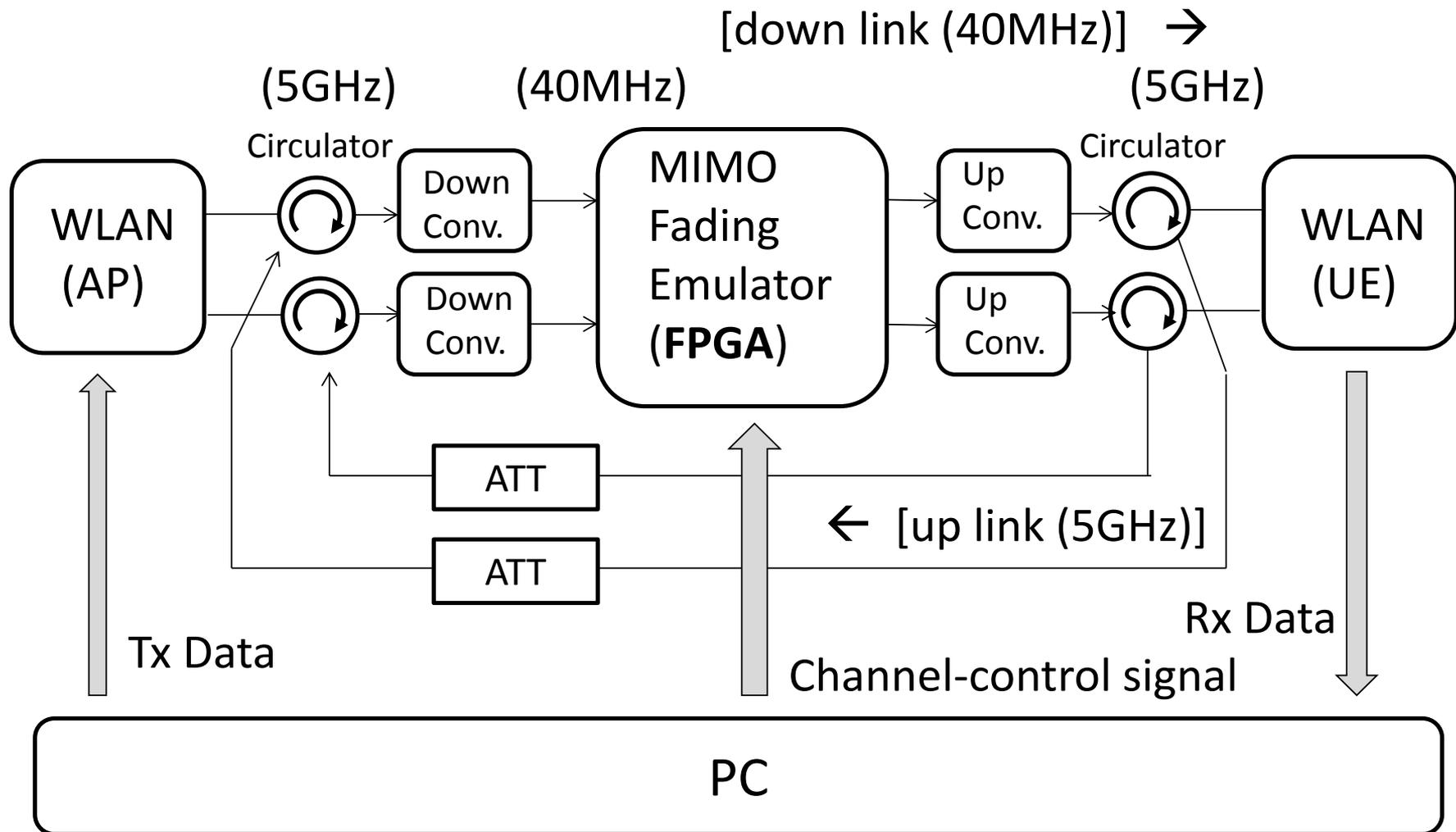
データ
受信確認

Two blue arrows pointing from the AP to the UE/UT and back, indicating data flow and reception confirmation.

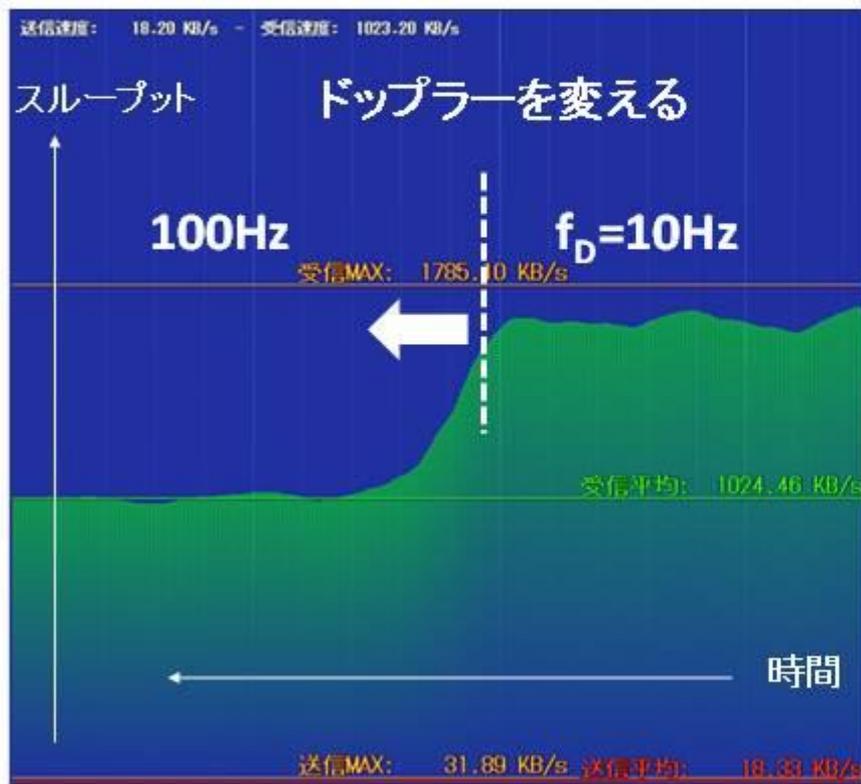
Intel Centrino Advanced-n 6200



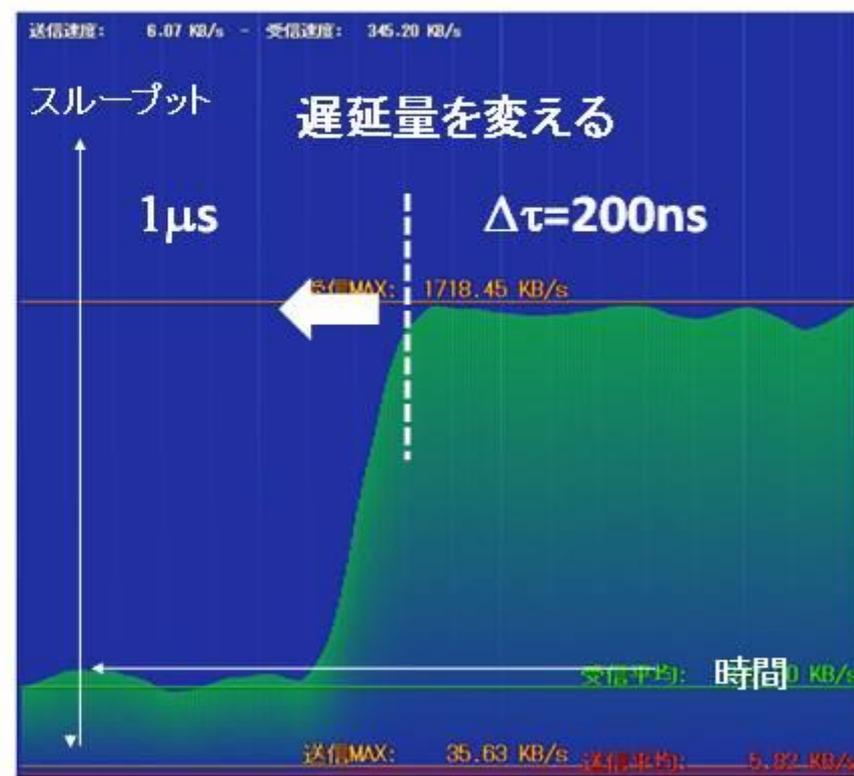
実験構成 (フィードバックループを組む)



測定結果の例(フェージングに対する耐性)



ドップラ広がりに対する耐性



遅延広がりに対する耐性



講演のまとめ

1. 電波環境を測る(トータルレコーディング)

電波環境を丸ごと記録する手段があると、電波伝搬解析・通信障害解析に有用。パソコンレベルで、現時点で、パーツ(DAC, ADC, マザーボード, CPU, SSD or HDD)を選べば、200MHz帯域信号の長時間収録(1時間以上の)が可能。(仙台での測定実験を紹介した)

2. 電波環境を作る(MIMO-OTA)

- ・電波反射箱型(Reverberation Chamber)
超広帯域伝送特性の評価が可能
- ・MIMOフェージングエミュレータ
リアルタイムのマルチパス環境が構築できる

上記1, 2をプロ(=計測器メーカー)が行うと、高性能であるが超高価格なものとなる。自分たち研究や開発に必要な道具は、自分たちで作ってみよう。



本日の講演の参考文献(唐沢研究室発)

【トータルレコーディング】

- [1] 竹本淳、高橋宏和、唐沢好男, "トータルレコーディング技術に基づく地上デジタル放送マルチパス波の到来方向・遅延時間高分解能測定法," 信学論(B), Vol.J92-B, No.9, pp.1381-1389, 2009.
- [2] K. Morokuma, A. Takemoto, and Y. Karasawa, "A Novel High-Resolution Propagation Measurement Scheme for Indoor Terrestrial TV Signal Reception Based on Two-Dimensional Virtual Array Technique," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.4, pp. 986-993, 2013.
- [3] 唐沢好男, 中田克弘, ポンマサック パーワンナー "電波環境のトータルレコーディングとその応用"信学技報 RCS2012-103, pp. 43-48, 2012.08.

【MIMO-OTA】

Reverberation Chamber

- [1] ファタフッディン タムリン, 大島一郎, 唐沢好男 "A Reverberation Chamber to Realize Multipath-Rich Environment [IV] – Frequency Dependence of Propagation Characteristics in the Chamber –"信学技報, vol. 112, no. 285, AP2012-113, pp. 115-120, 2012.11.
- [2] 大島一郎、唐沢好男, "二重電波反射箱によるマルチパス伝搬環境制御," 信学論(B)、vol. E94-B, no. 9, pp.1056-1064, 2011.09.
- [3] I. Oshima, Y. Karasawa, "Experimental Evaluation of the Propagation Environment Control Function in a Double-layered Reverberation Chamber in a MIMO-OTA System," IEICE Trans. Commun., (accepted).
- [4] 篠沢政宏, パシシング・サハルル, アリフ・リズワン, 唐沢好男, "任意ドップラースプレッドのマルチパス環境を実現するMIMO端末特性評価用電波反射箱," 信学論(C), Vol.J93-C, No.12, pp.612-621, 2010.12.
- [5] D. T. Le and Y. Karasawa, "A Simple Broadband Antenna for MIMO Applications in Cognitive Radio," IEICE Trans. Communications, Vol.E95-B No.1 pp.18-26, 2012.01. (電波反射箱の応用)

Fading Emulator

- [1] 小佐古 昂、篠沢政宏、唐沢好男, "フェージングエミュレータ型 MIMO-OTA測定システムの簡易構成法," 信学論(B) Vol.J95-B, NO.2, pp.275-284, 2012.02.
- [2] Y. Karasawa, Y. Gunawan, S. Pasingi, K. Nakada, A. Kosako, "Development of a MIMO-OTA System with Simplified Configuration," Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (JKIEES), Vol.12, NO.1, pp77-84, Mar.2012.
- [3] 孫 桂江、中田克弘、大島一郎、唐沢好男, "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," 信学論(B)、Vol.E96-B, NO.7, pp.701-711, 2011.07.
- [4] 中田克弘, 唐沢好男, "簡易型広帯域MIMO-OTAシステム信号処理部のFPGA実装と評価," 信学技報, SR2012-5, pp. 31-36, 2012.05.
- [5] 中田克弘, 小谷里佳子, 唐沢好男 "簡易型MIMOフェージングエミュレータの開発とその応用"信学技報,RCS2013-115,pp.203-208, 2013.07.