



三菱電機 講演会
(H19.12.21)

MIMO の不思議探検

通信からレーダへ

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)



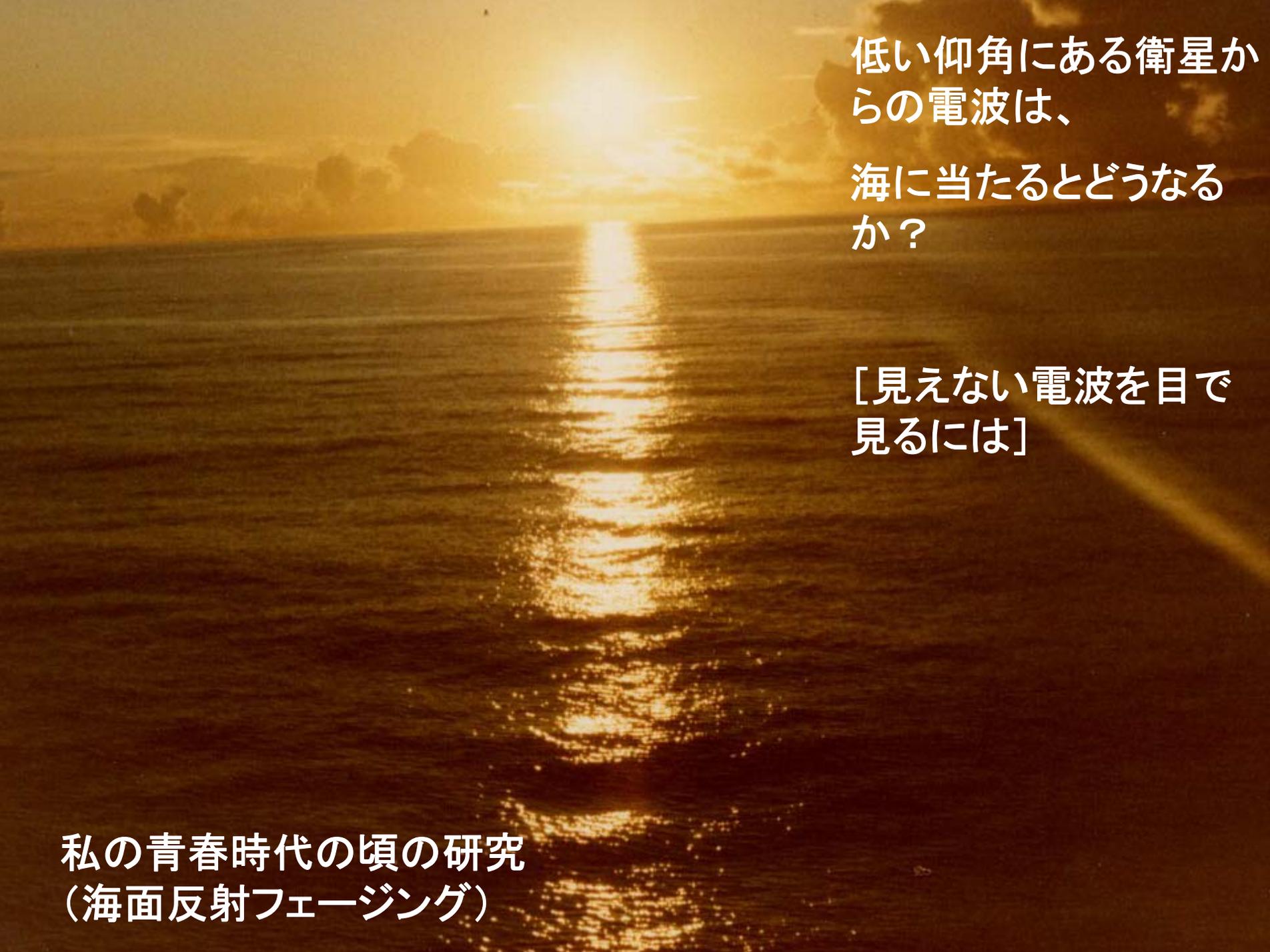
講演の内容

- 私の電波研究遍歴
- アレーアンテナのできること(SIMOとMIMO)
- 電波信号処理アダプティブアレー(SIMO)
 - 地上デジタル放送波の移動体受信
- MIMOの働き
 - 送受信最大比合成伝送
 - 伝送路容量を上げる
 - 信頼性を上げる(送信ダイバーシチ)
- MIMOの動向:無線LANからセルラーへ
 - アンテナカップリングと受信性能
- MIMO技術:通信からレーダへ



私の電波研究遍歴

- 流星(風)レーダの研究(大学院)
- 海面反射フェージングの研究
(船や飛行機に対する衛星通信)
- 電波の雨による減衰、対流圏や電離圏で
発生するシンチレーションの研究
(衛星通信)
- アレーアンテナで妨害波を防ぐ研究
- モバイル情報通信の研究(移動通信)



低い仰角にある衛星からの電波は、

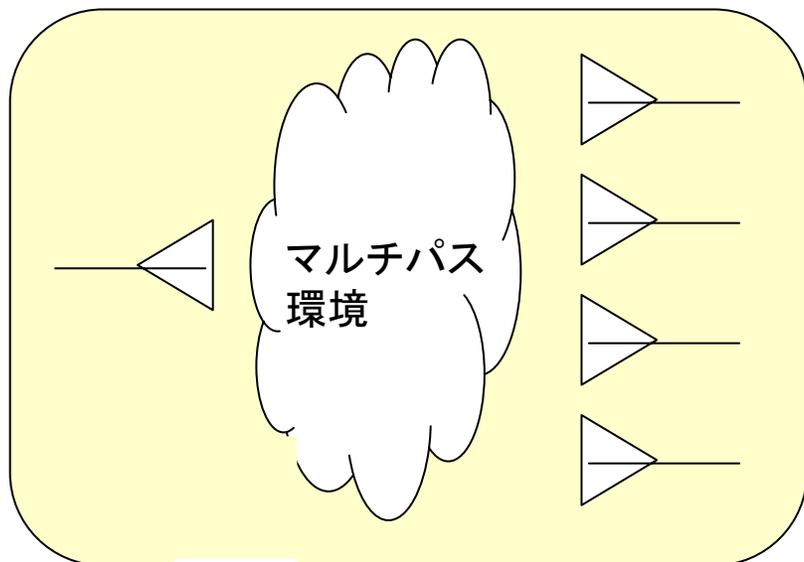
海に当たるとどうなるか？

[見えない電波を目で見るには]

私の青春時代の頃の研究
(海面反射フェージング)

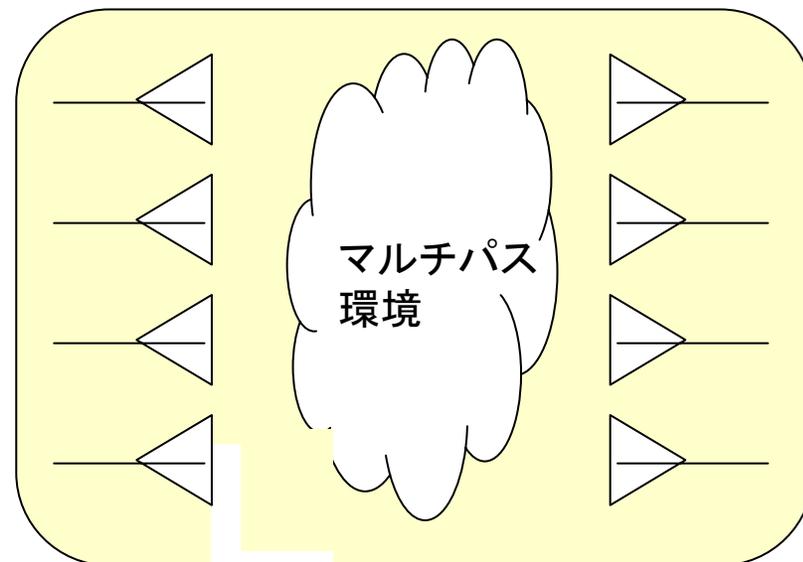
アレーアンテナができること

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

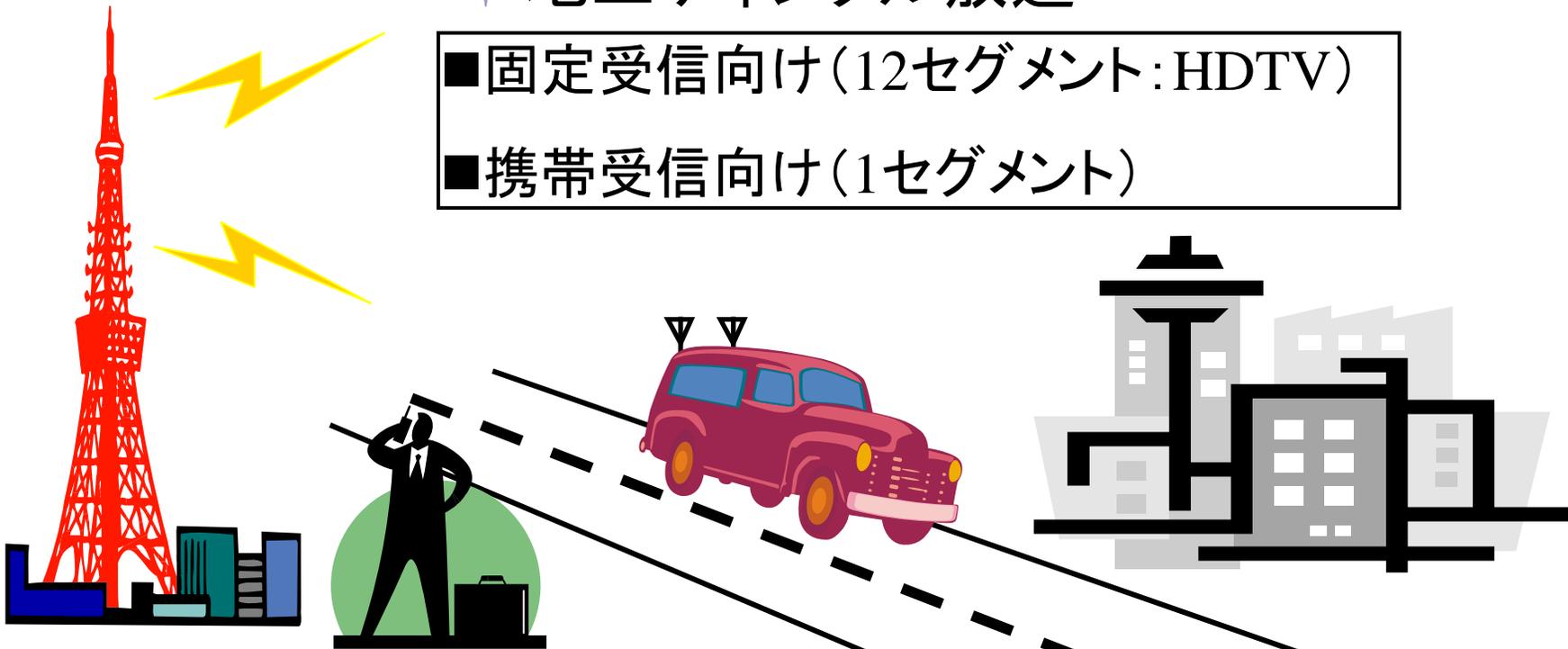


SIMOダイバーシチ合成の研究紹介

電波信号処理による地上デジタル放送波のダイバーシチ合成受信

✦ 地上デジタル放送

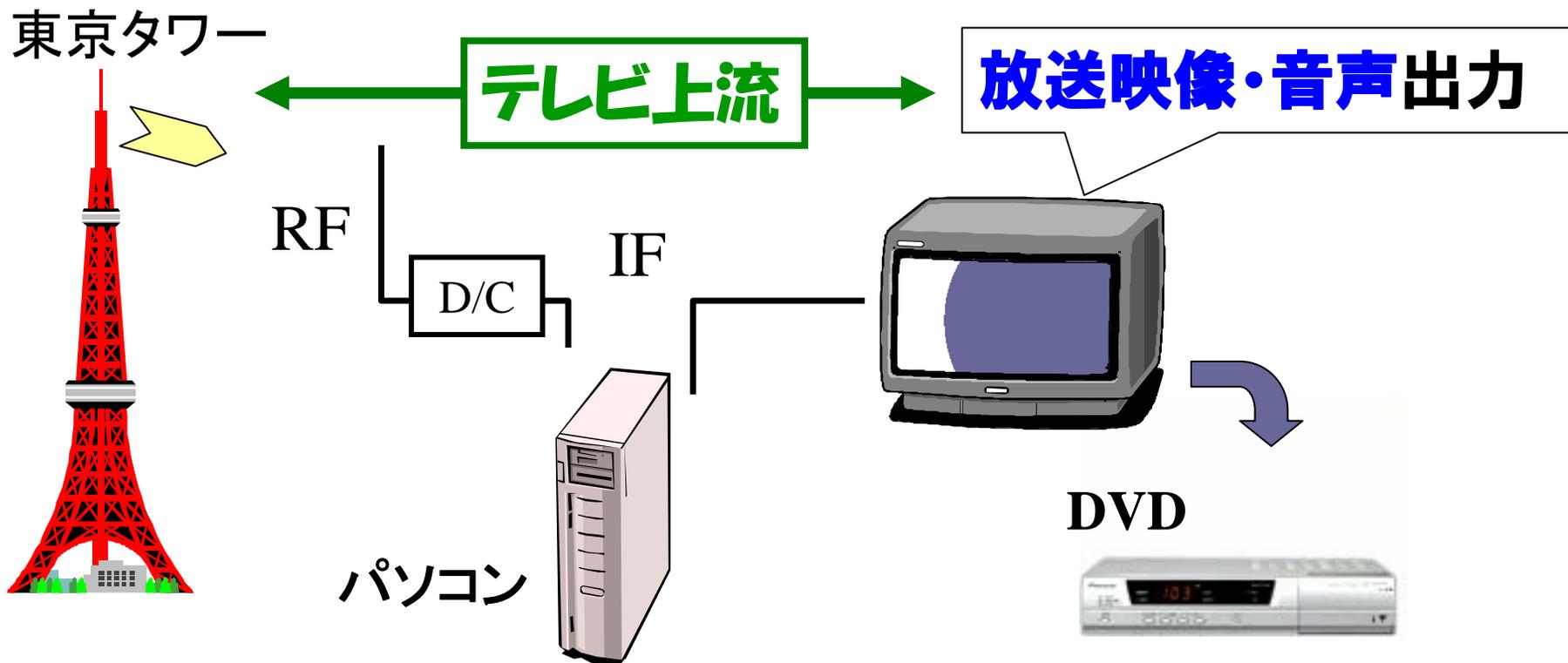
- 固定受信向け(12セグメント:HDTV)
- 携帯受信向け(1セグメント)



移動中での受信特性の向上



TV放送波のトータルレコーディング



超大容量ハードディスクへ
電波のまま記録



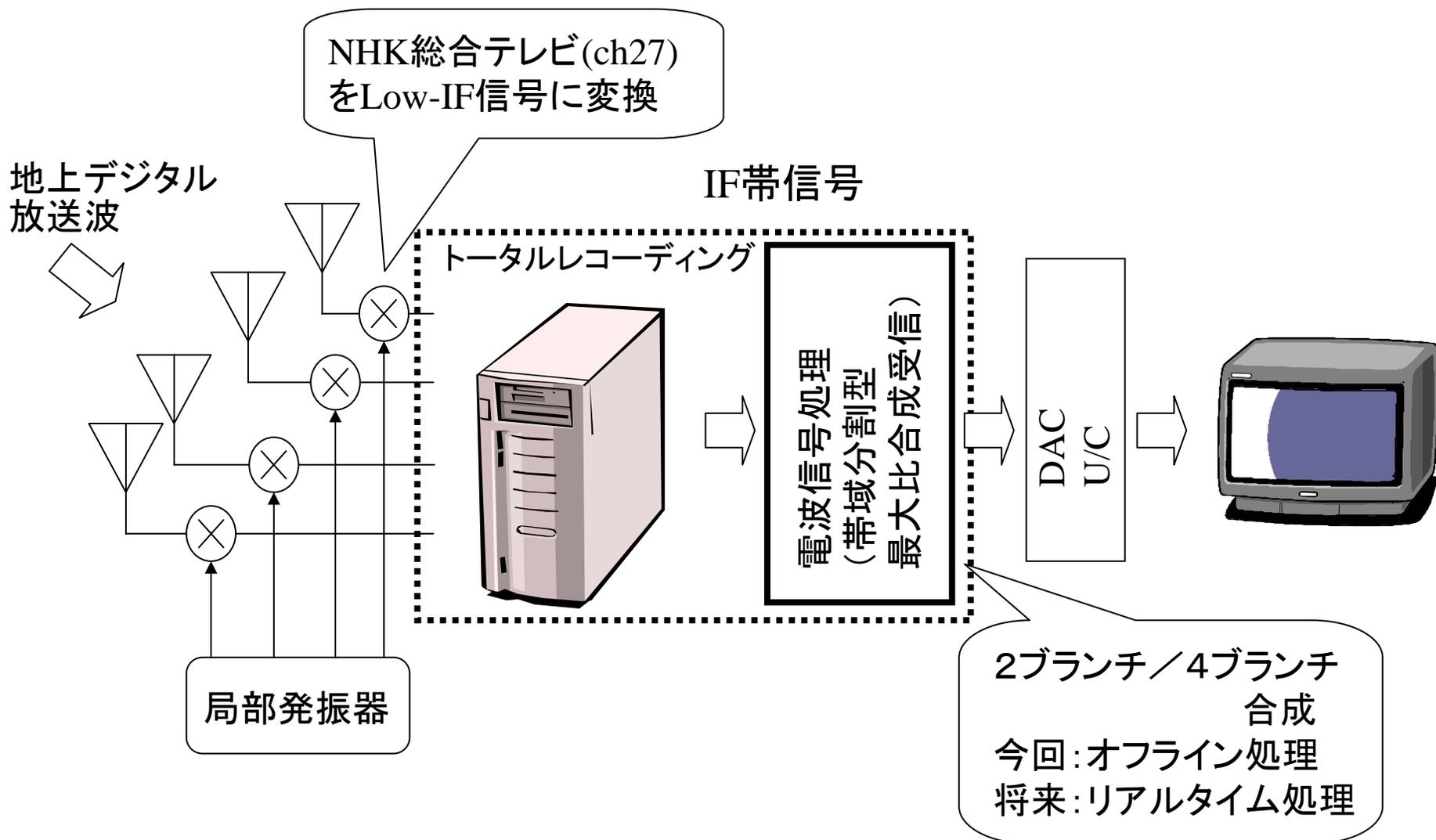
実験エリア

調布市界隈
東京タワーから
約20km





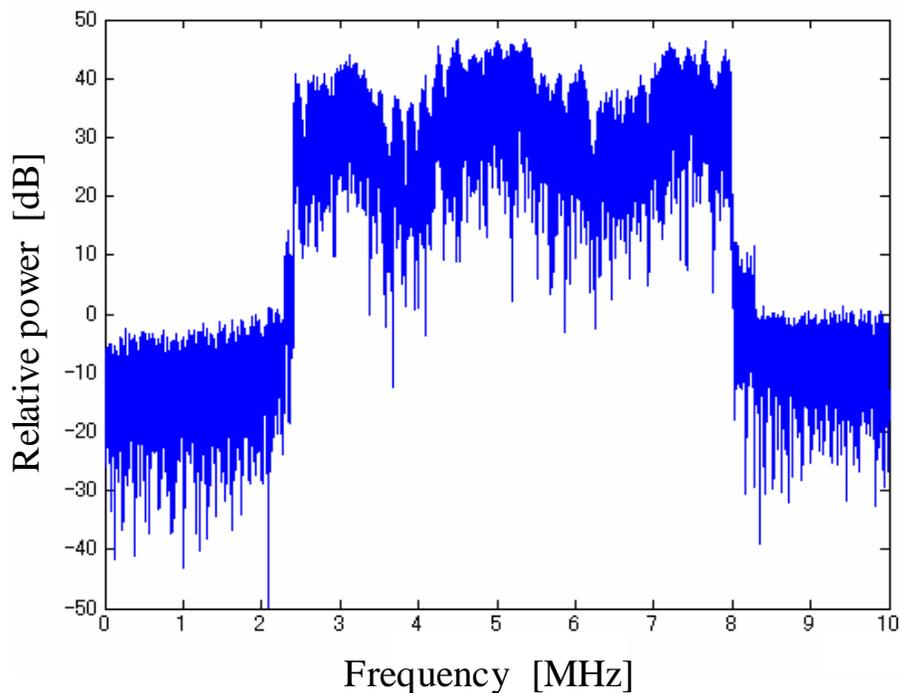
地上デジタル放送波の移動体受信と電波信号処理による帯域分割型最大比合成



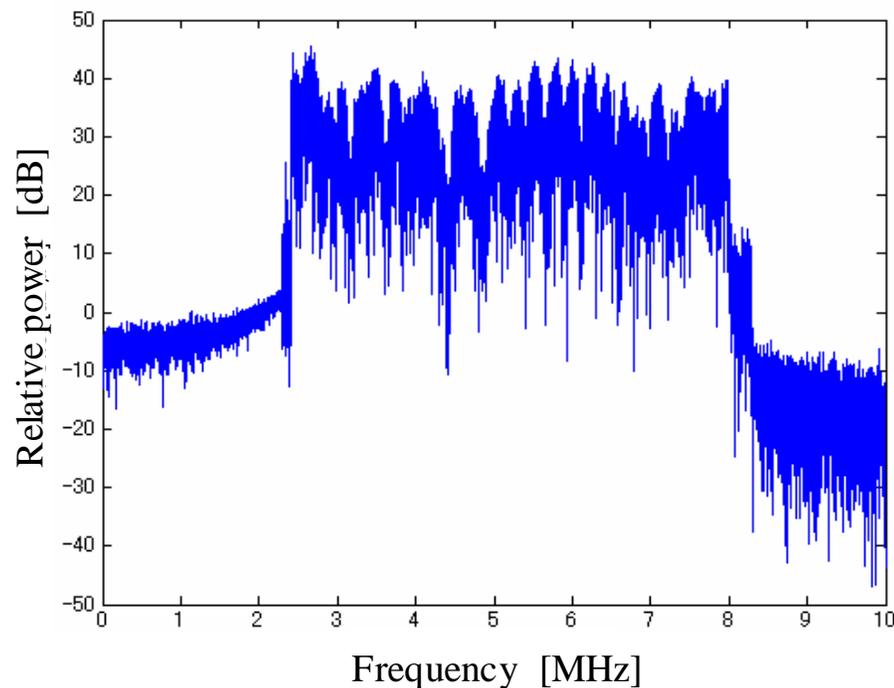




移動体受信時の周波数スペクトルの例



遅延広がりが小さい例

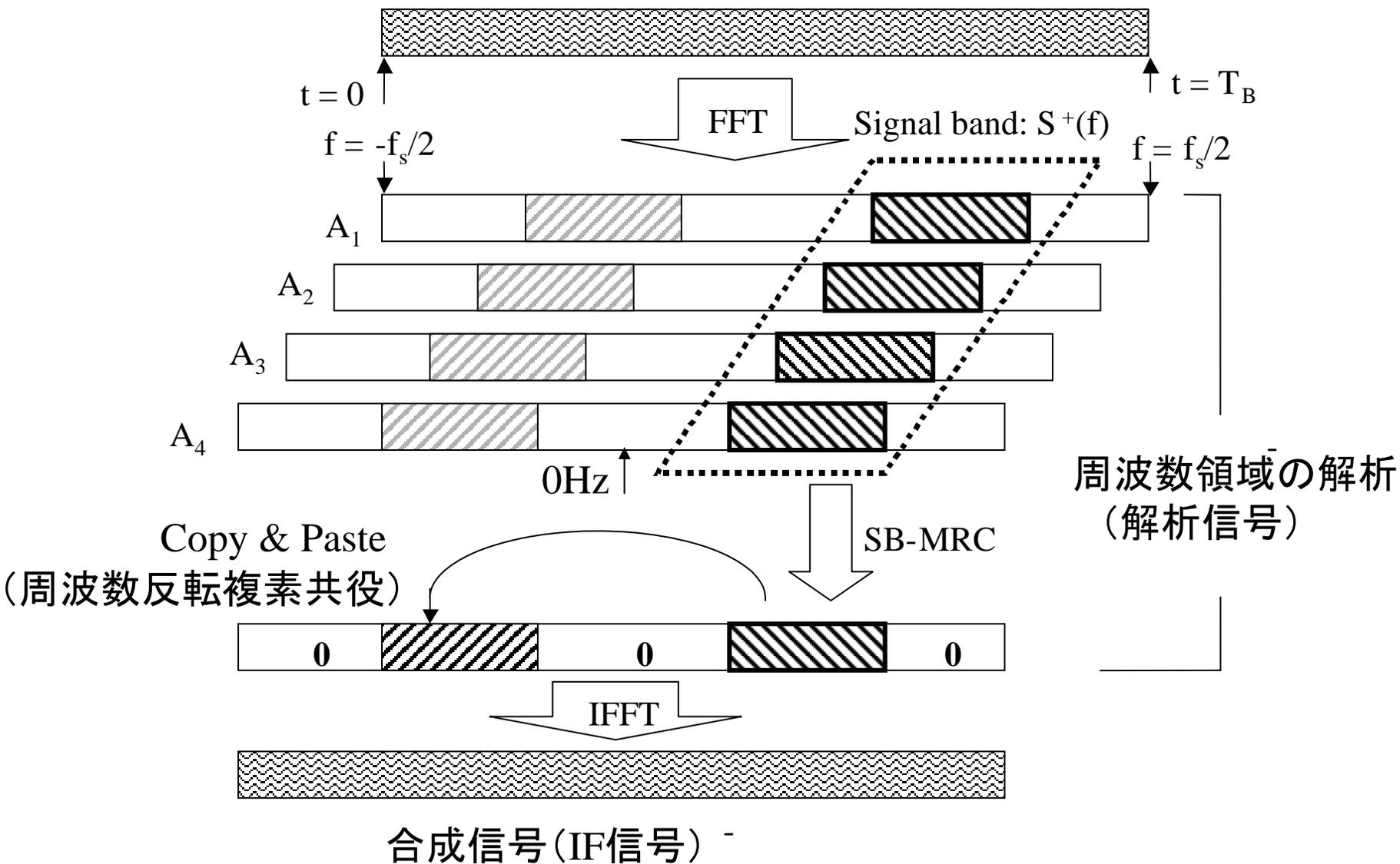


遅延広がりが比較的大きい例



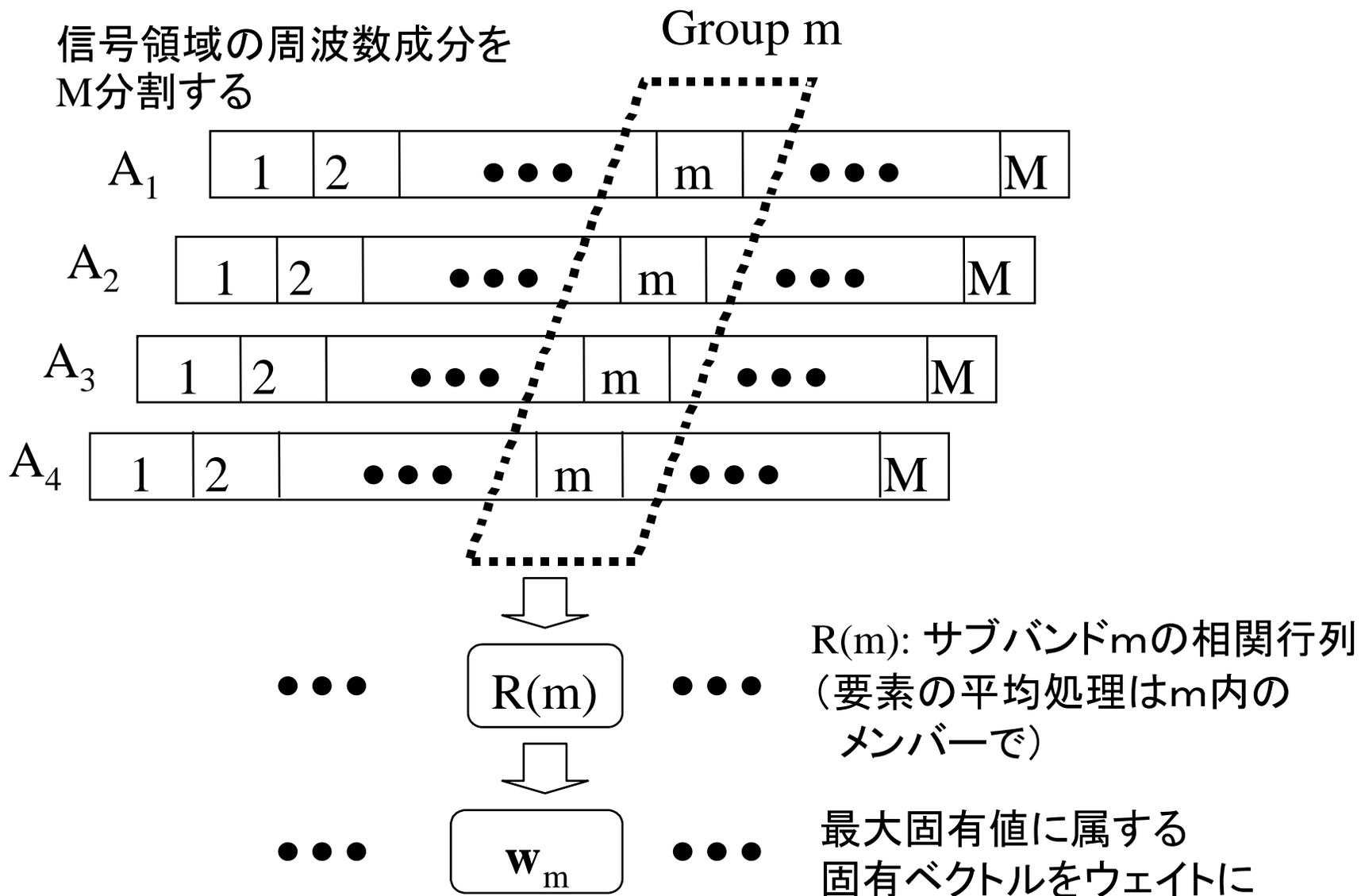
電波信号処理

アンテナA₁のIF信号 (実数信号)



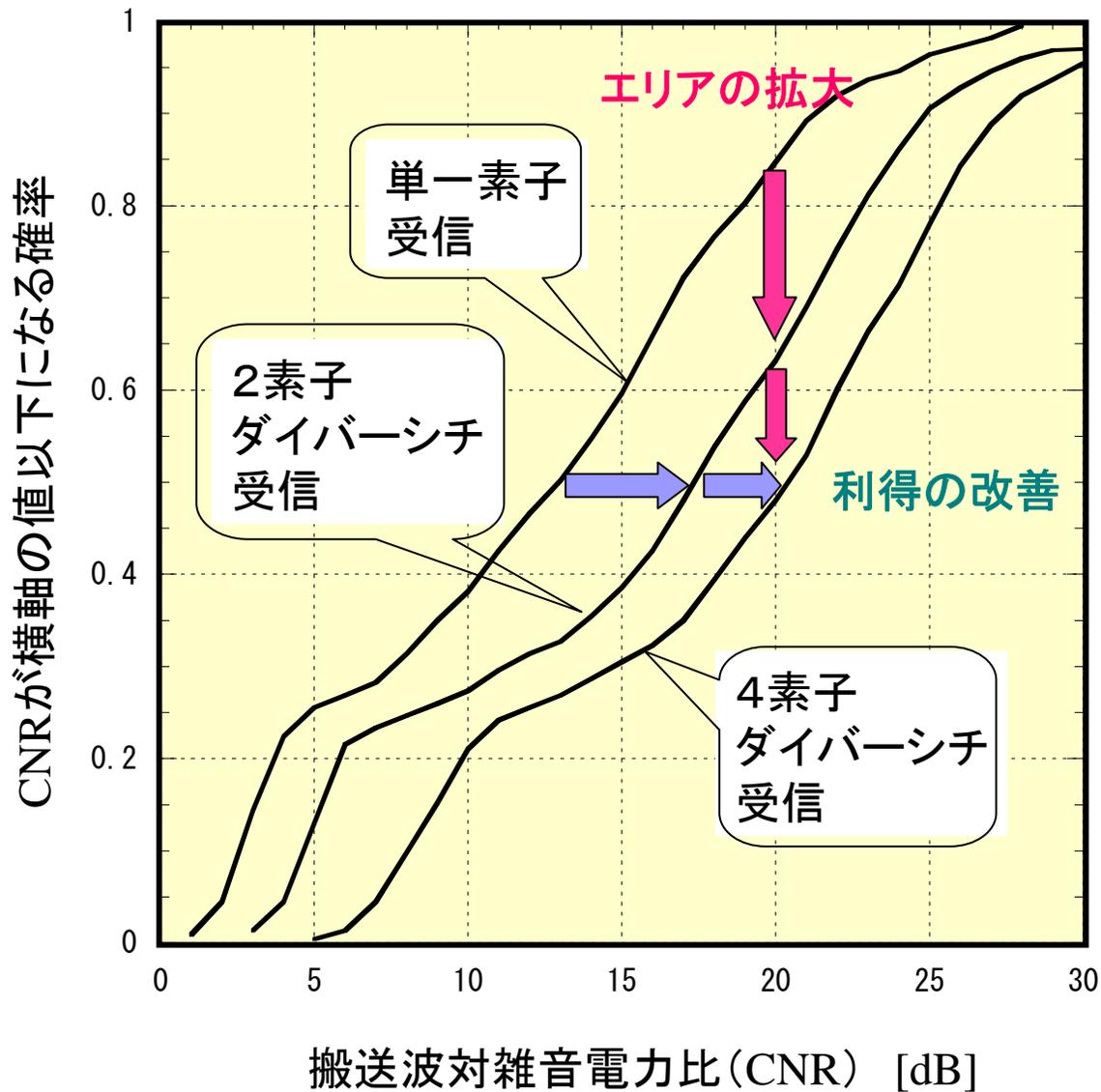


帯域分割信号処理型最大比合成(ベースバンド信号処理)





ダイバーシチ効果(電波信号処理による解析)



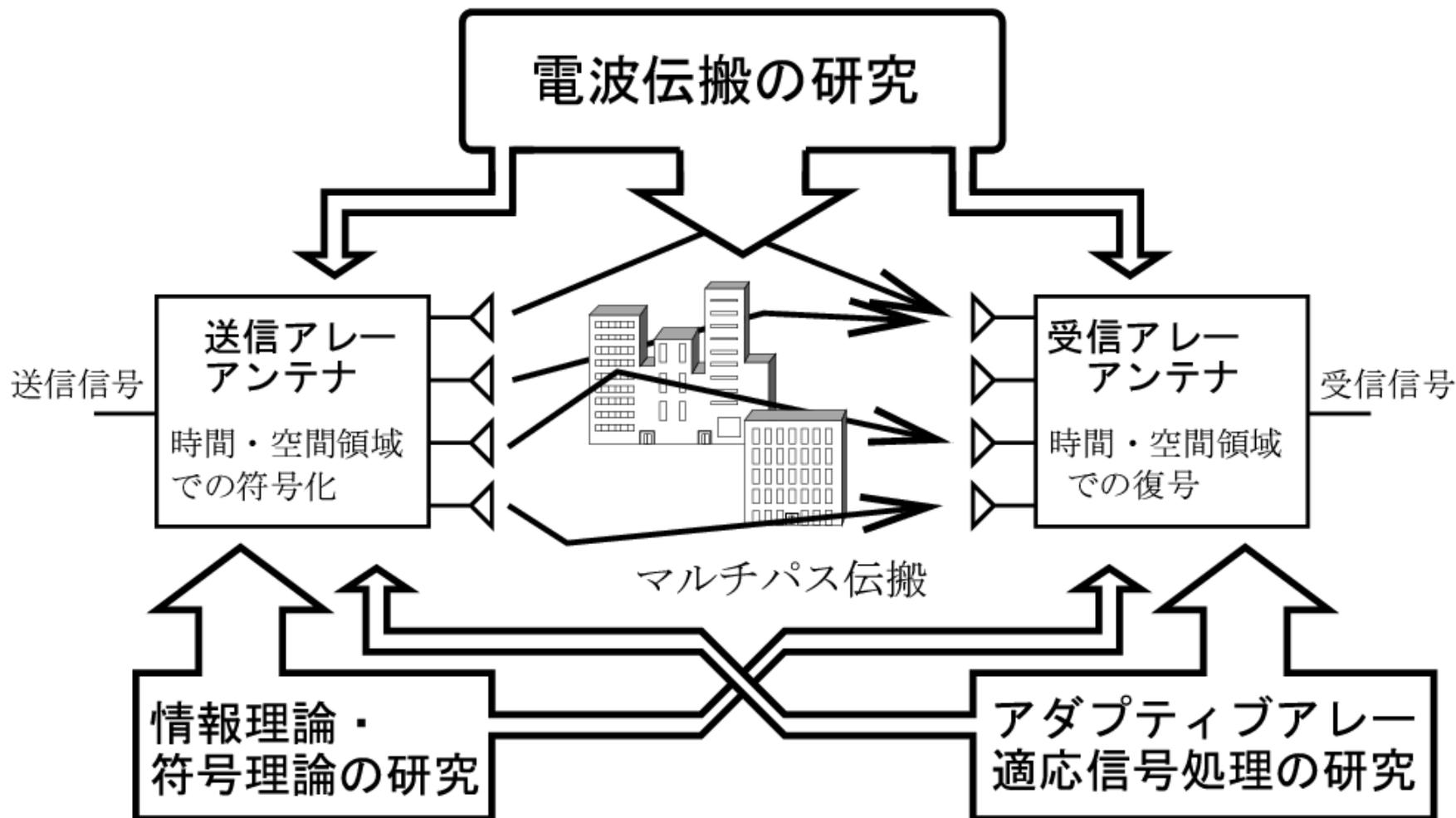


MIMOの基礎

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

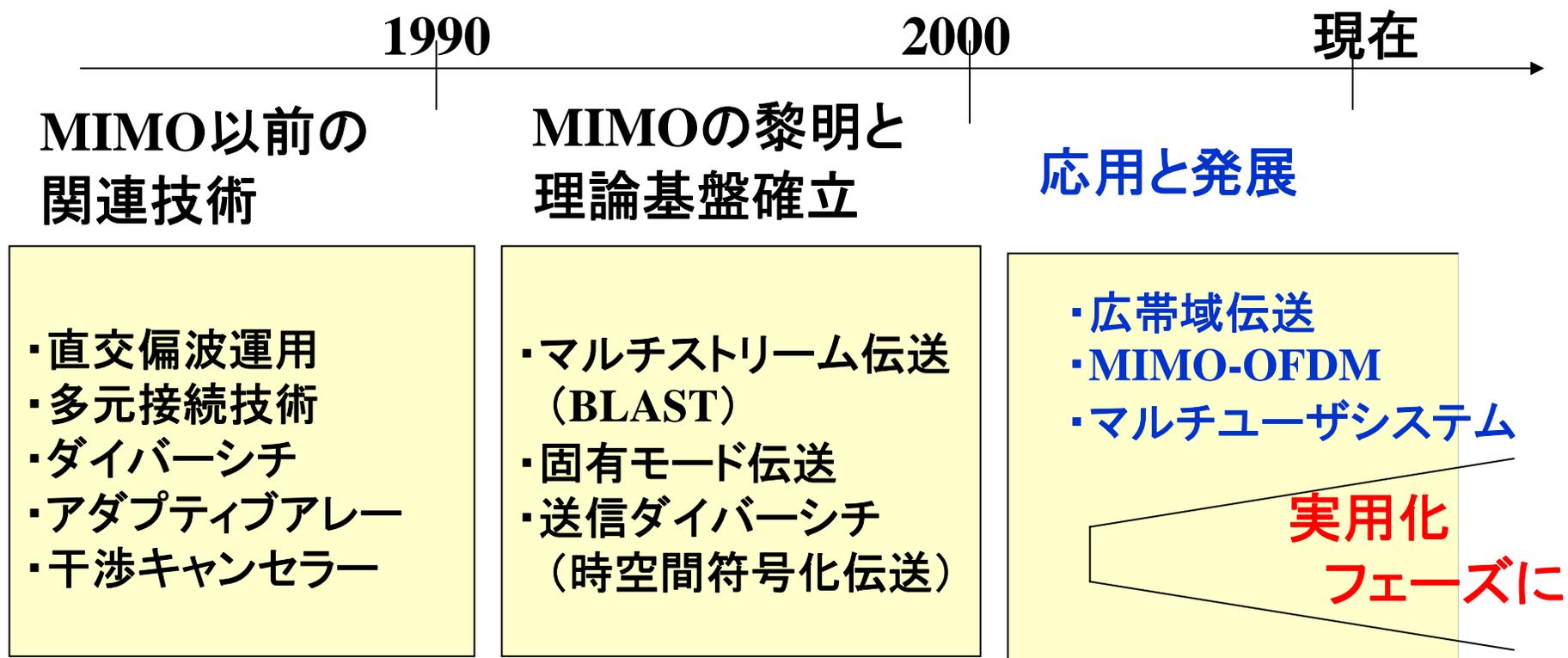


MIMO 情報伝送技術





MIMO 技術の歴史と展望





MIMOのふしぎ探検

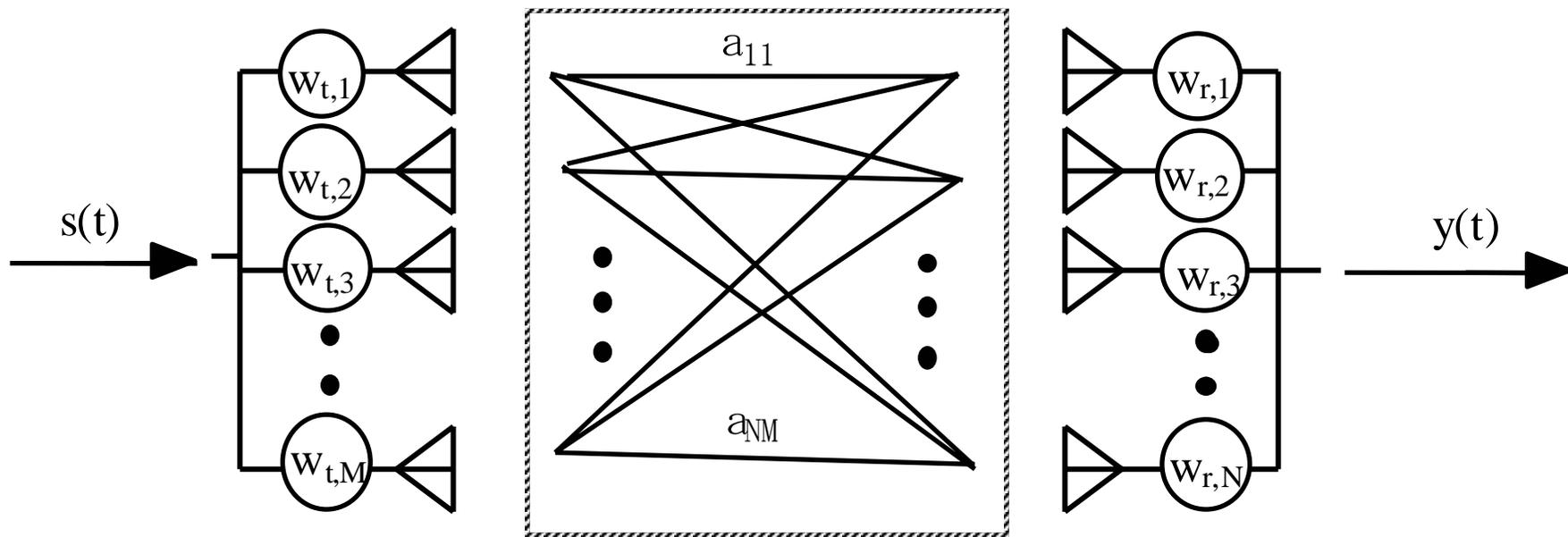
MIMOの伝送をキャッチボールにたとえると

- 1) 優秀なピッチャーとキャッチャーのキャッチボール
(送受信ウェイト制御型最大比合成伝送)
- 2) 千手観音同士のキャッチボール
(マルチストリーム伝送)
- 3) 濃い霧の中でのボールの投げ方
(時空間符号化伝送)



MIMOのふしぎとの出会い

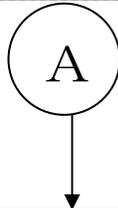
シングルストリームビームフォーミング伝送



$w_t = e_1$ for R_t

w_t

$R_t = A^H A$



$R_r = A A^H$

w_r

$w_r = e_1$ for R_r

第一固有ベクトル

第一固有ベクトル

最大SNR受信を実現する送受のウェイトは？



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)



情報を運ぶ道は、運ぶ情報量が増えるほどに
コストが指数関数的に高くなる宿命になっている



もし、複数の道を手に入れることができたなら
より低いコストでより多くの情報を運ぶことができる



それを実現するのがMIMO



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



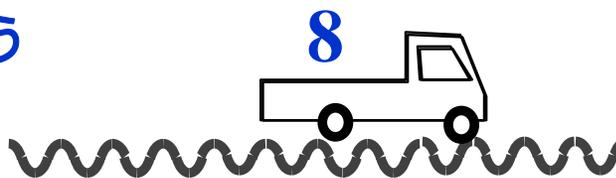
高SNRのケースでは

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



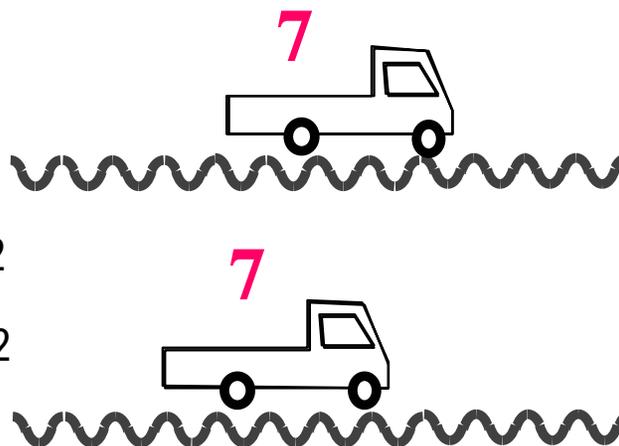
8

Case 2: 二つの道を使う

送信情報

$P_T/2$

$P_T/2$



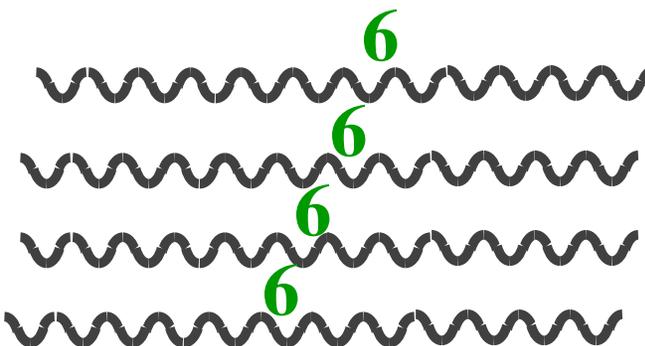
14

Case 3: 四つの道を使う

送信情報

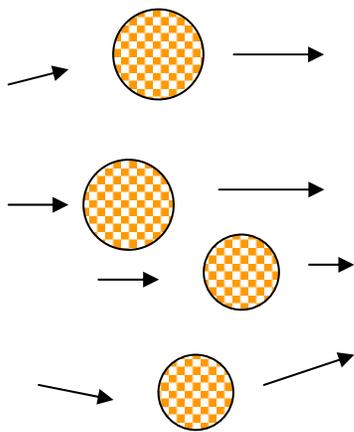
$P_T/4$

$P_T/4$



24

千手観音同士の キャッチボール





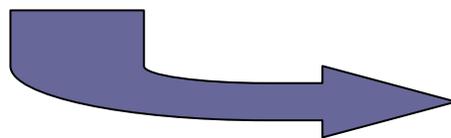
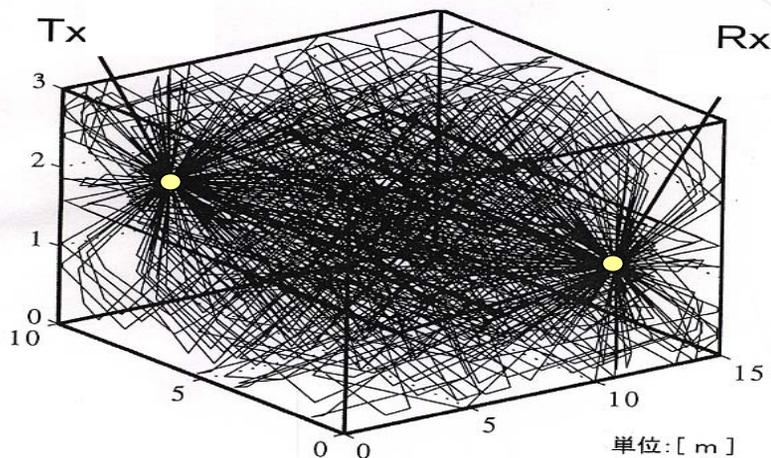
では、複数の伝送路をどのようにして
手に入れるか？

マルチパス環境ならそれができる。

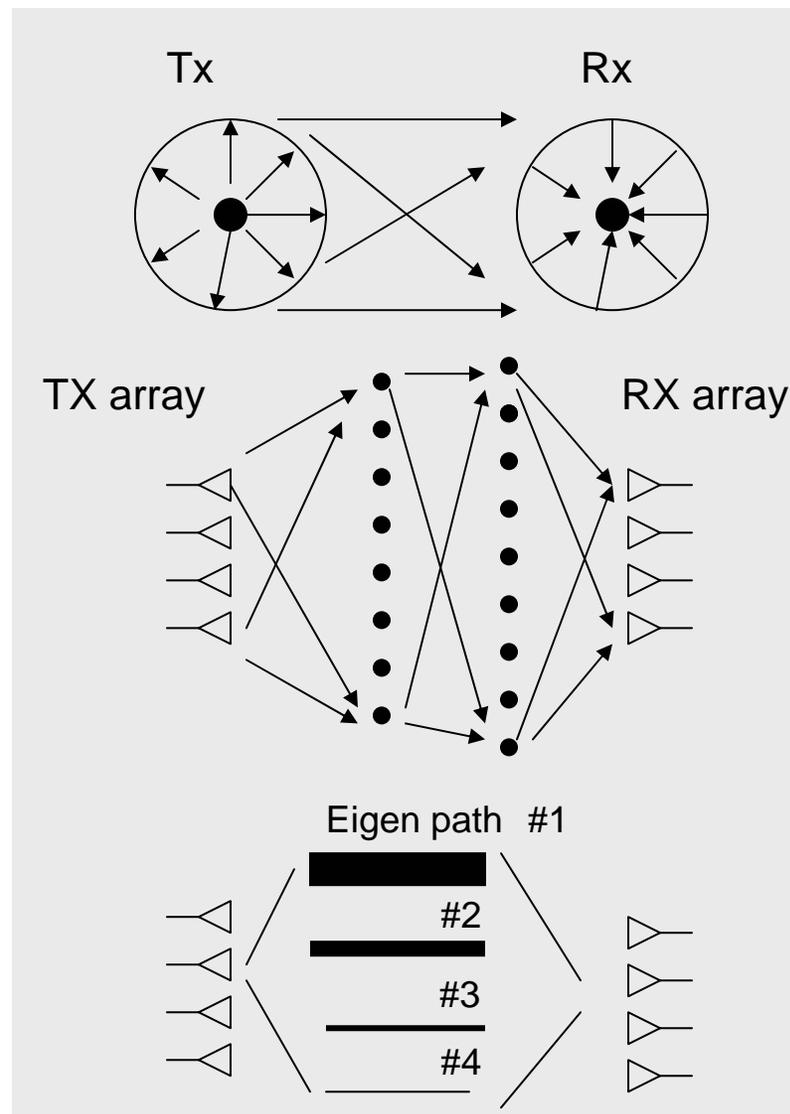
【マイナス要因をプラス要因に変える発想の転換
(パラダイムシフト)がある】

MIMO 伝搬チャネルモデル

パスプロファイル(屋内)

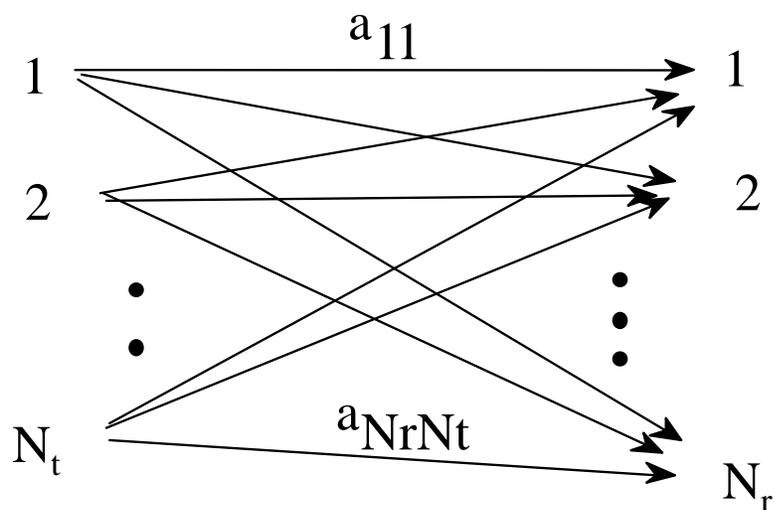


SVDによる等価回路





チャネル行列: A



$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_r 1} & \cdots & a_{N_r N_t} \end{bmatrix}$$

$$m = \min \{N_t, N_r\}$$

$$n = \max \{N_t, N_r\}$$



チャンネル相関行列: R_r and R_t

$$R_r \equiv AA^H$$

$$R_t \equiv A^H A$$

固有値 ($\lambda_i ; i = 1, 2, \dots m$) for R_r or R_t

固有ベクトル ($\mathbf{e}_{r,i} ; i = 1, 2, \dots m$) for R_r

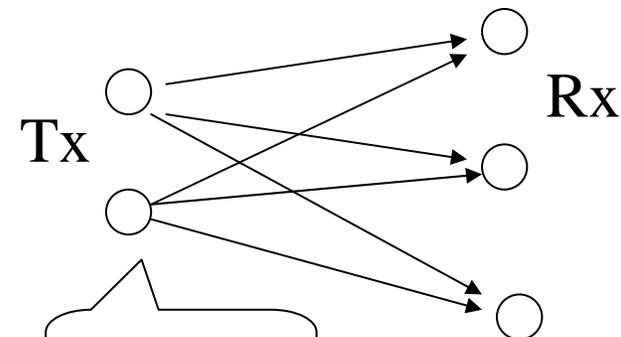
固有ベクトル ($\mathbf{e}_{t,i} ; i = 1, 2, \dots m$) for R_t



R_t と R_r の性質

3x2 MIMO の場合

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}$$



送信側
空間相関

$$R_t = A^H A = E_t D E_r^H E_r D E_t^H = E_t D^2 E_t^H$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & a_{31}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{32}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}^* a_{11} + a_{21}^* a_{21} + a_{31}^* a_{31} & a_{11}^* a_{12} + a_{21}^* a_{22} + a_{31}^* a_{32} \\ a_{12}^* a_{11} + a_{22}^* a_{21} + a_{32}^* a_{31} & a_{12}^* a_{12} + a_{22}^* a_{22} + a_{32}^* a_{32} \end{pmatrix}$$

受信側
空間相関

$$R_r = A A^H = E_r D E_t^H E_t D E_r^H = E_r D^2 E_r^H$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & a_{31}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{32}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} a_{11}^* + a_{12} a_{12}^* & a_{11} a_{21}^* + a_{12} a_{22}^* & a_{11} a_{31}^* + a_{12} a_{32}^* \\ a_{21} a_{11}^* + a_{22} a_{12}^* & a_{21} a_{21}^* + a_{22} a_{22}^* & a_{21} a_{31}^* + a_{22} a_{32}^* \\ a_{31} a_{11}^* + a_{32} a_{12}^* & a_{31} a_{21}^* + a_{32} a_{22}^* & a_{31} a_{31}^* + a_{32} a_{32}^* \end{pmatrix}$$



MIMO チャンネルの表現 (SVD: 特異値分解)

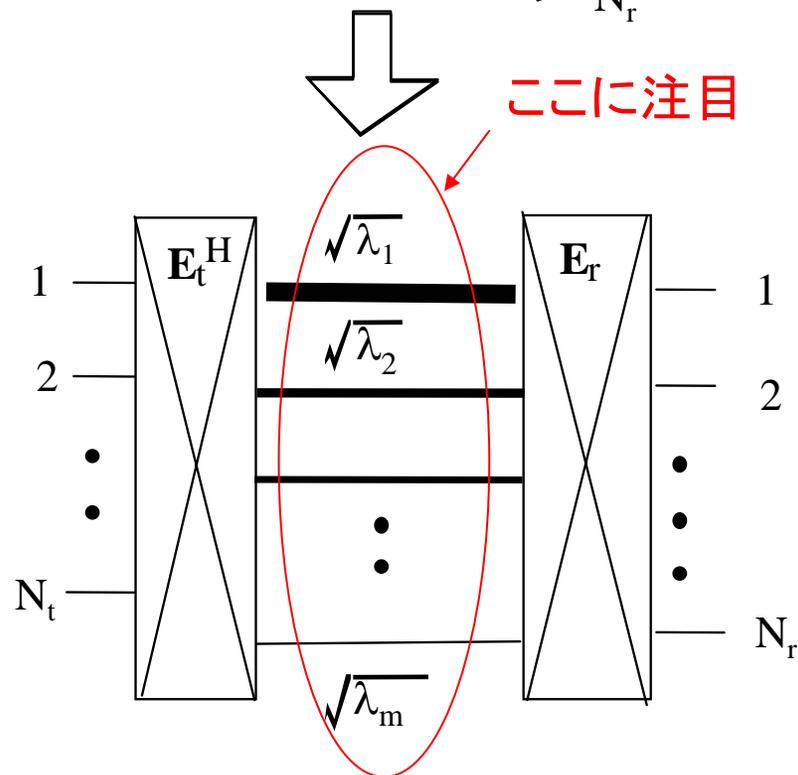
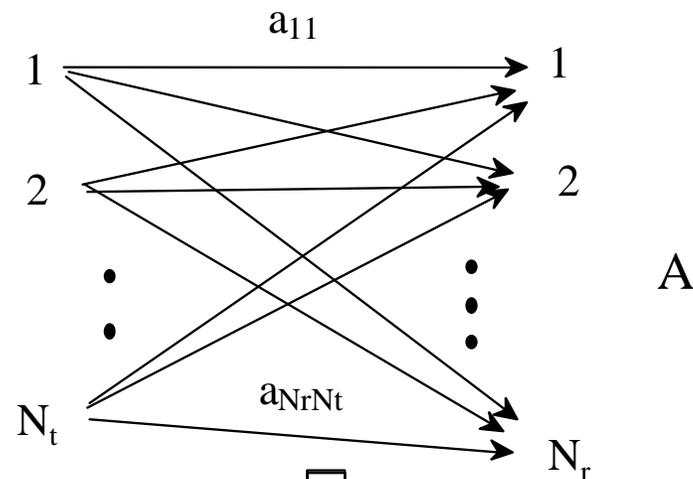
$$\mathbf{A} = \mathbf{E}_r \mathbf{D} \mathbf{E}_t^H = \sum_{i=1}^m \sqrt{\lambda_i} \mathbf{e}_{r,i} \mathbf{e}_{t,i}^H$$

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

$$\mathbf{E}_t \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{t,1} & \mathbf{e}_{t,2} & \cdots & \mathbf{e}_{t,m} \end{bmatrix}$$

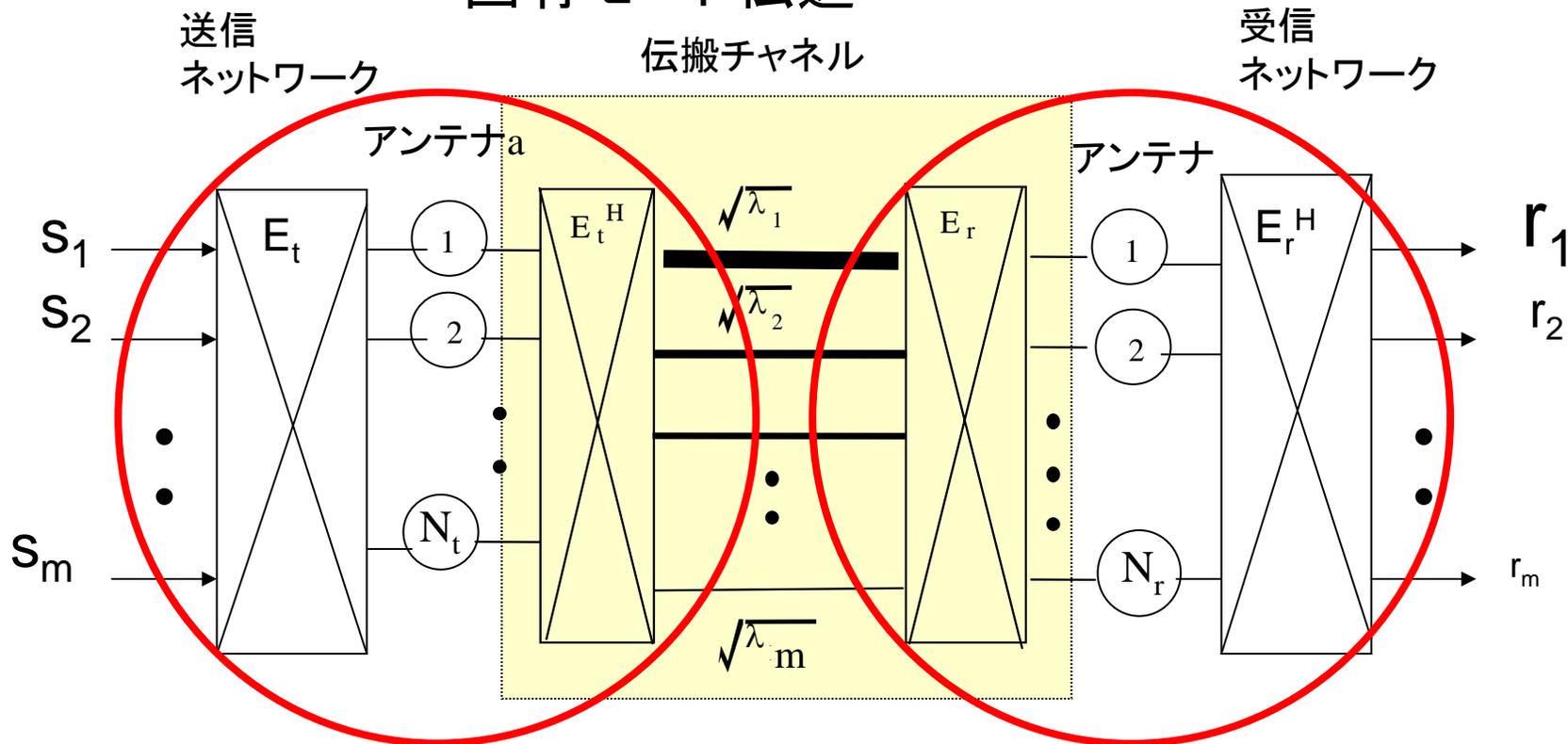
$$\mathbf{E}_r \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{r,1} & \mathbf{e}_{r,2} & \cdots & \mathbf{e}_{r,m} \end{bmatrix}$$

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

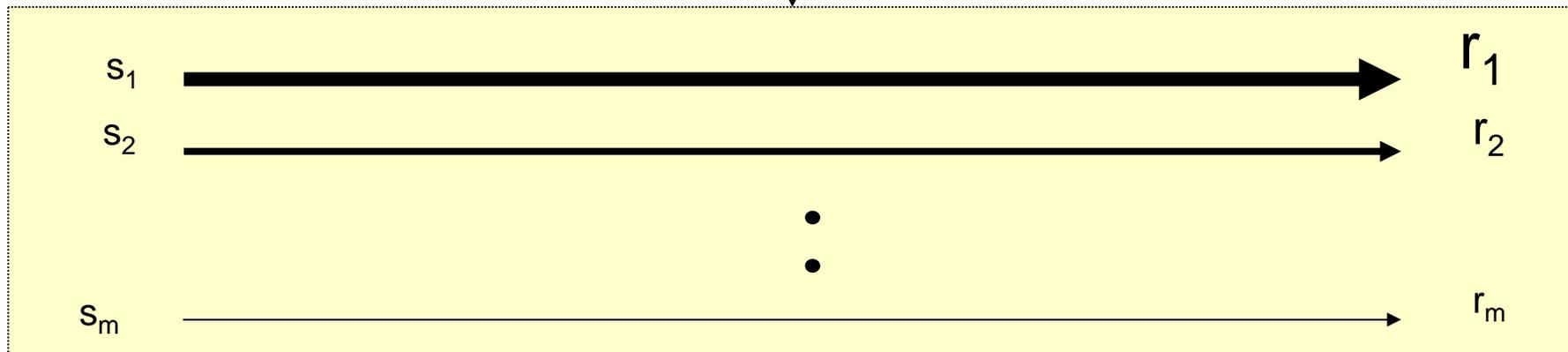




固有モード伝送



固有モード伝送





固有値の確率分布を理論的に求めるのは、
最も基本のレイリーフェージングでもかなり難しい

順序つき固有値の結合確率分布

$$p^{\text{ord}}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = c \exp\left(-\sum_{i=1}^m \lambda_i\right) \prod_{i=1}^m \lambda_i^{n-m} \prod_{j=i+1}^m (\lambda_i - \lambda_j)^2$$

c : 正規化ファクター

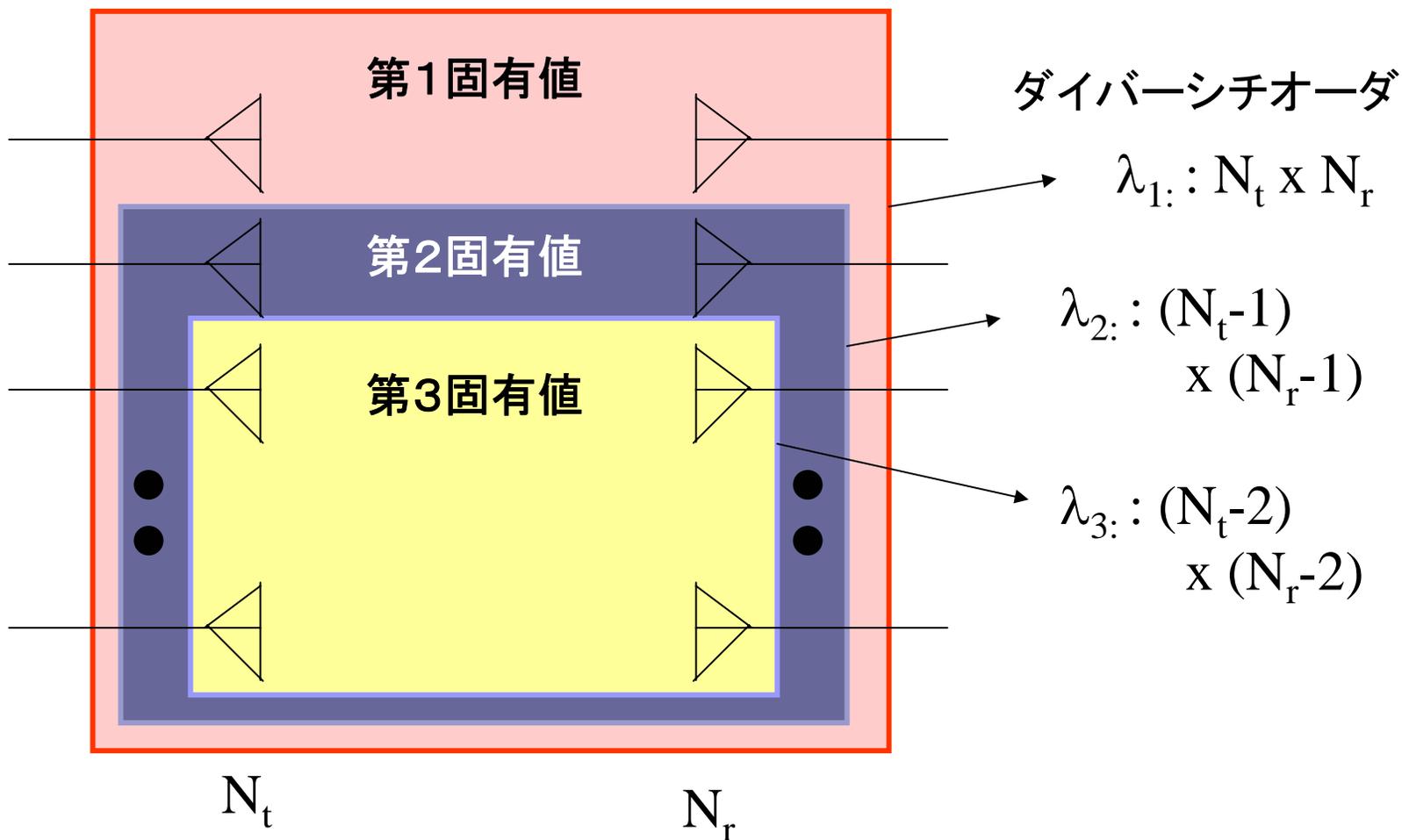
各固有値の確率分布

$$p_i^{\text{ord}}(\lambda_i) = \int_{\lambda_2}^{\infty} d\lambda_1 \cdots \int_{\lambda_i}^{\infty} d\lambda_{i-1} \int_0^{\lambda_i} d\lambda_{i+1} \cdots \int_0^{\lambda_{m-1}} d\lambda_m p^{\text{ord}}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$$

$$(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m)$$

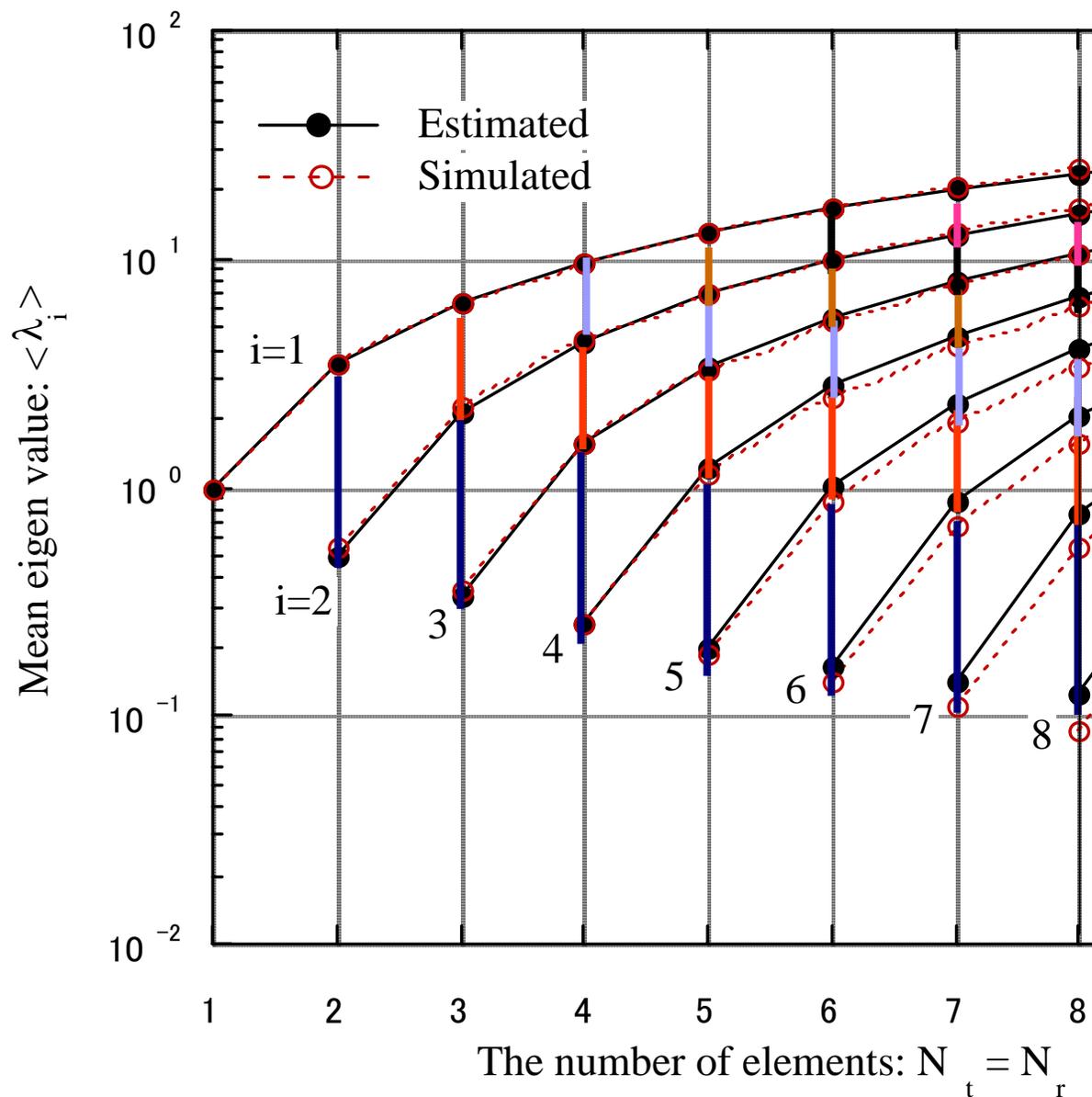


レイリーフェージング環境での固有値の確率分布の近似的理解





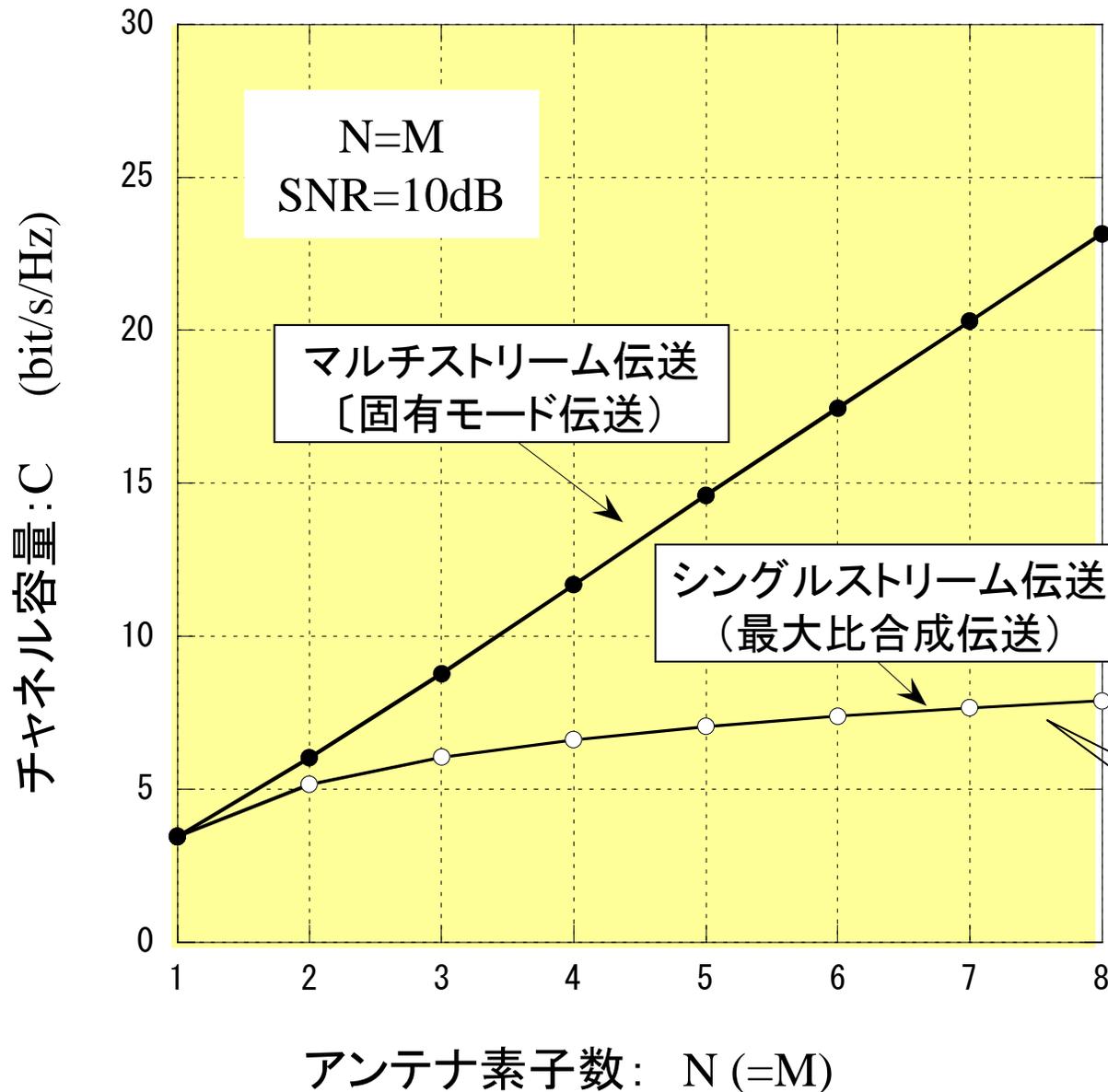
MIMO固有値の平均値に見られる面白い性質



$$\sum \lambda_i = MN$$



シングルストリーム伝送 vs マルチストリーム伝送



たくさんの情報を
送ることができる

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

確かに情報を送る
ことができる



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)



- **時空間ブロック符号化伝送: STBC**
(CSI: 受信側のみ)



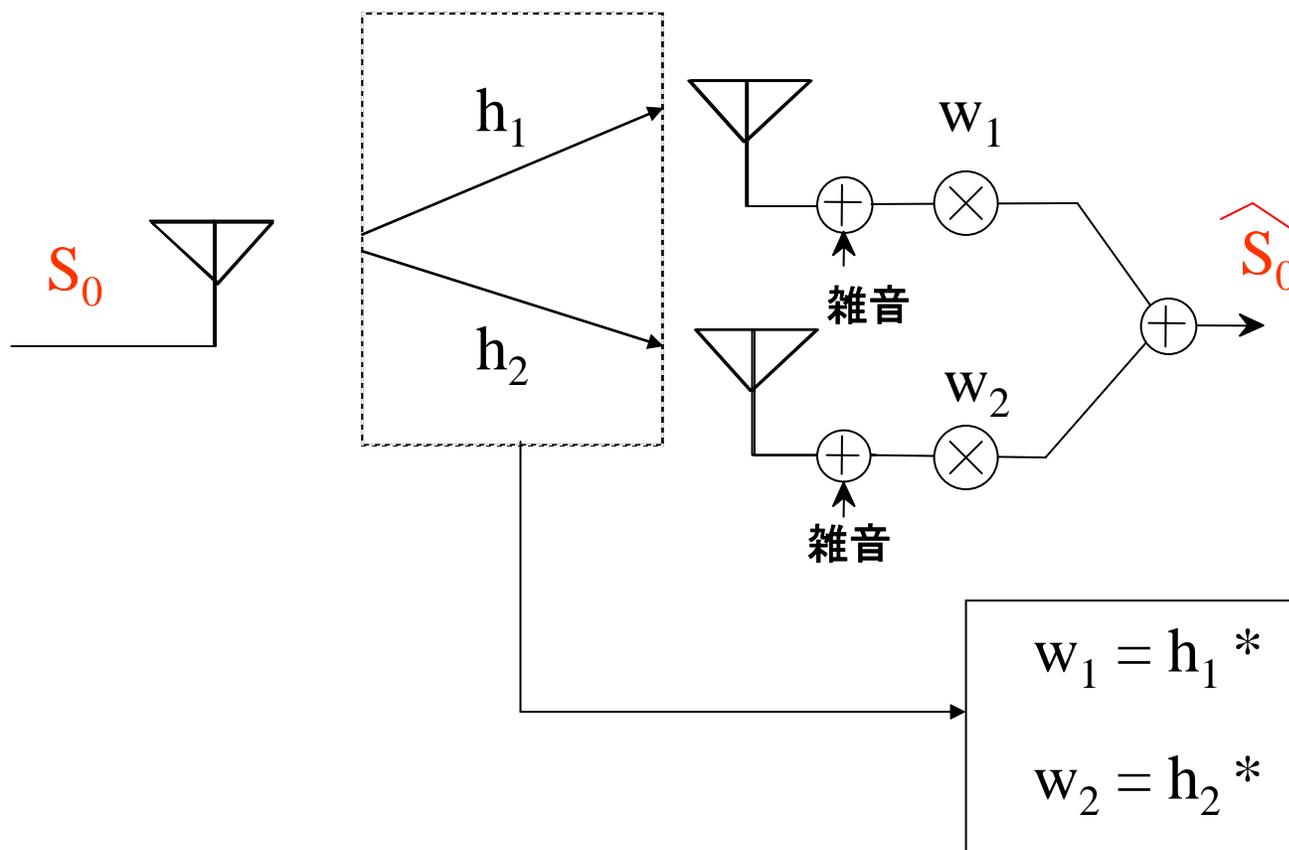
送信ダイバーシチの技術



MIMOに活用の場を広げた

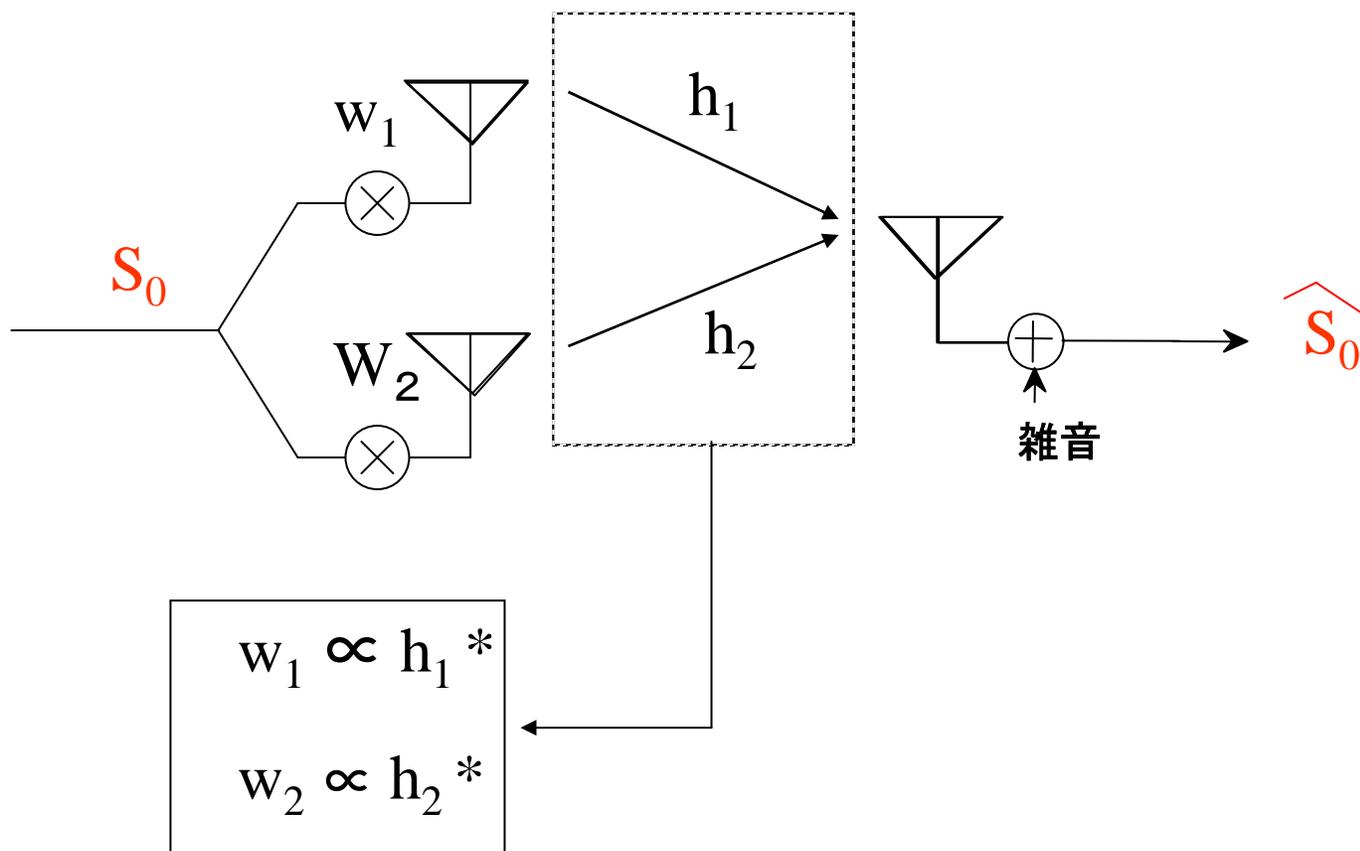


ダイバーシチ: 最大比合成受信



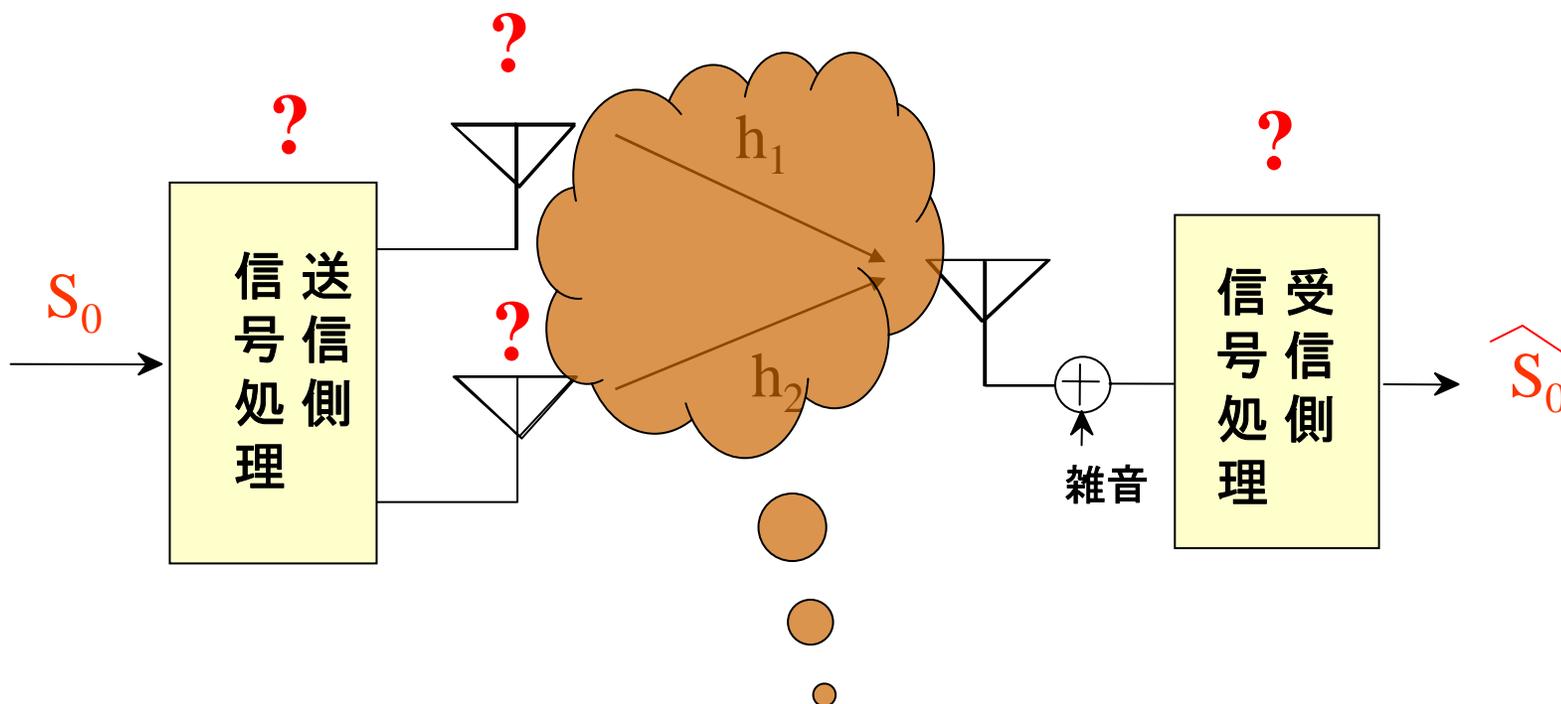


ダイバーシチ:最大比合成送信





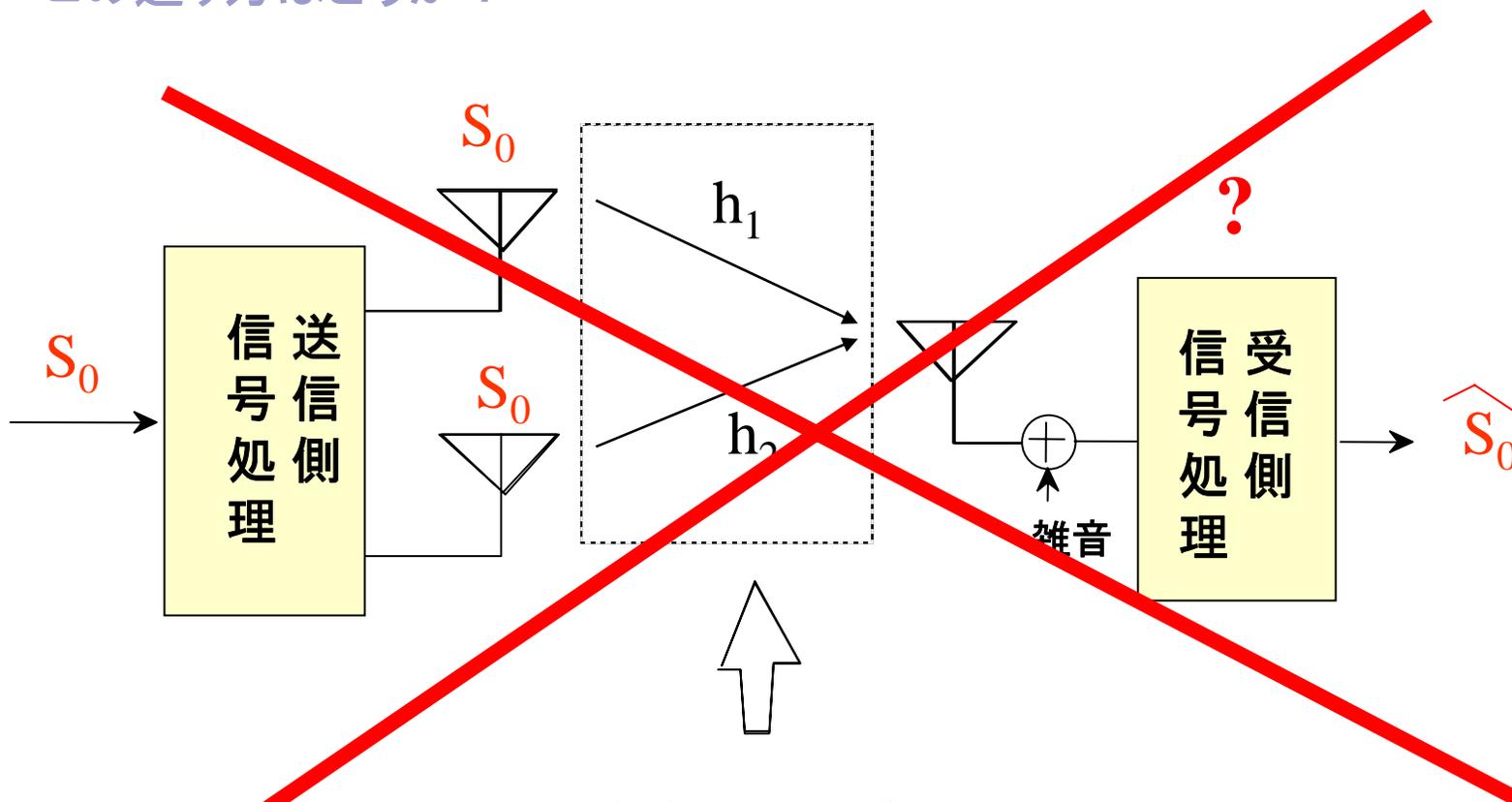
送信ダイバーシチ: 伝送路の特性を知らないときは?



送信側は伝送路の
特性を知らない

送信ダイバーシティ: 伝送路の特性を知らないときは?

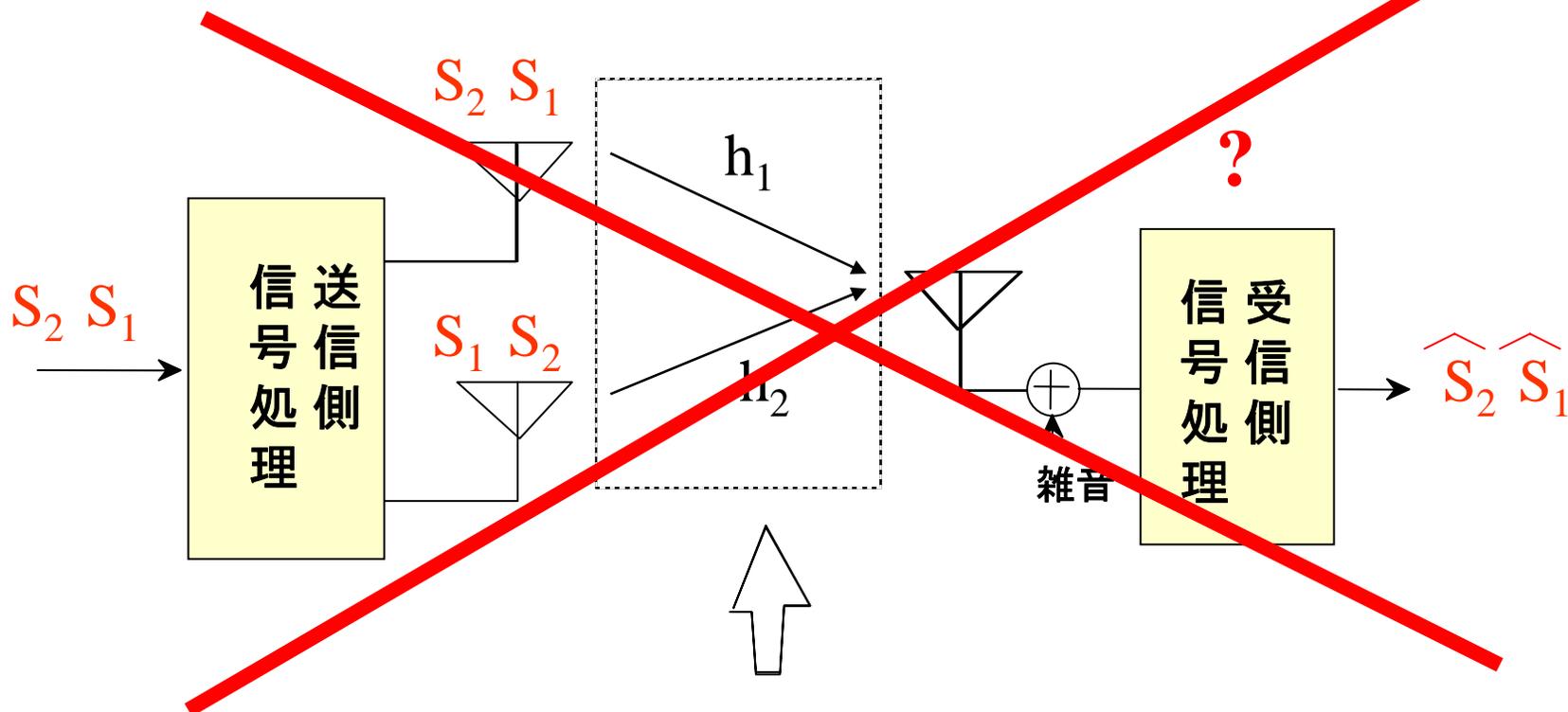
この送り方はどうか?



送信側は伝送路の
特性を知らない

送信ダイバーシティ: 伝送路の特性を知らないときは?

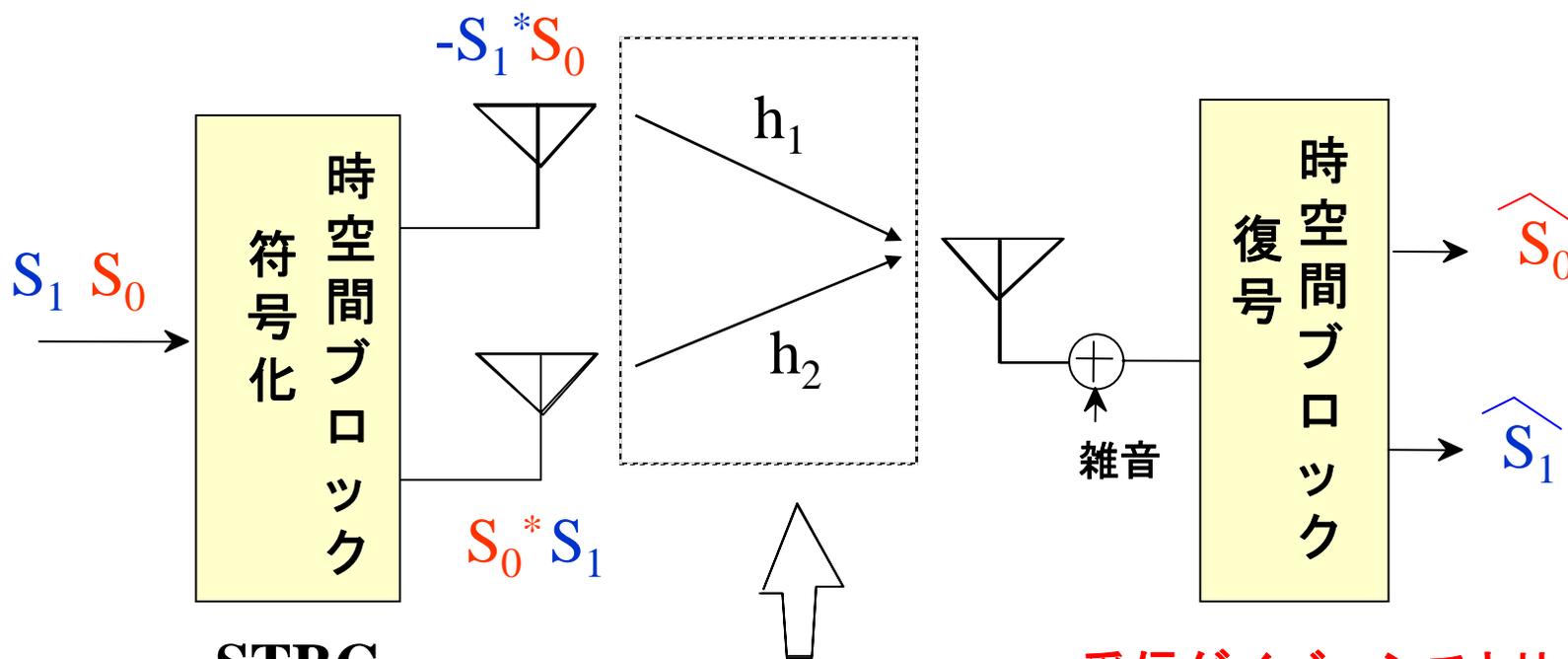
この送り方はどうか?



送信側は伝送路の
特性を知らない



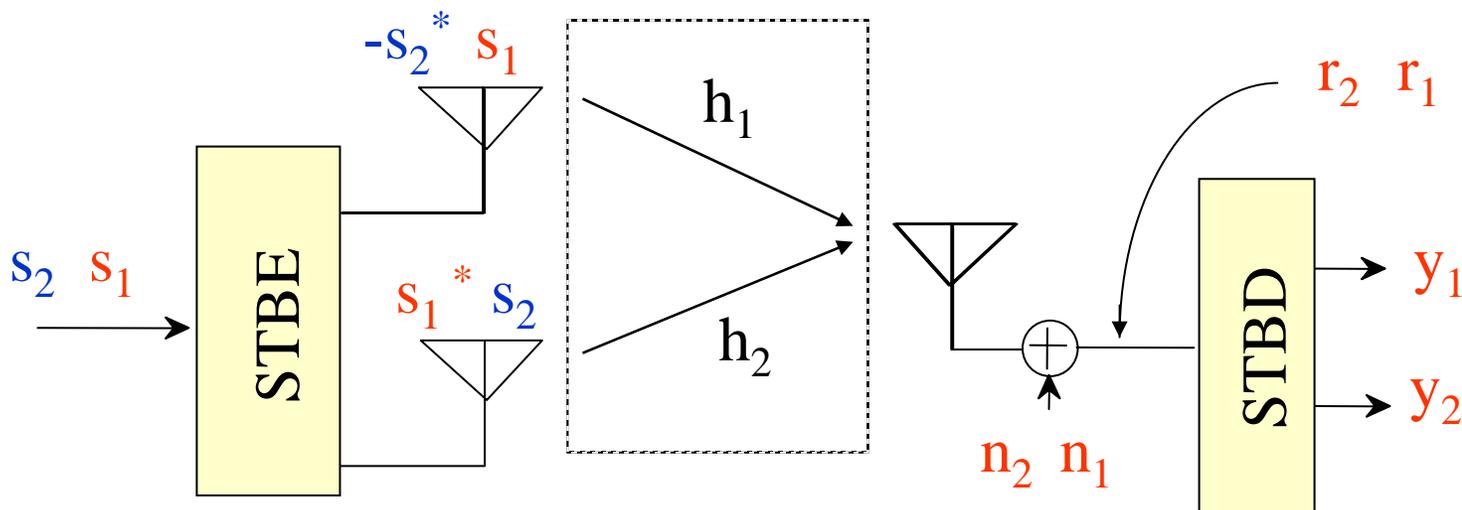
時空間ブロック符号化伝送 (Alamoutiの方法)



受信ダイバーシチと比べて、平均SNRが3dB劣化する。それを除けば、他の性能は同じ



送信ダイバーシチ: Alamoutiの方法がなぜうまくか？

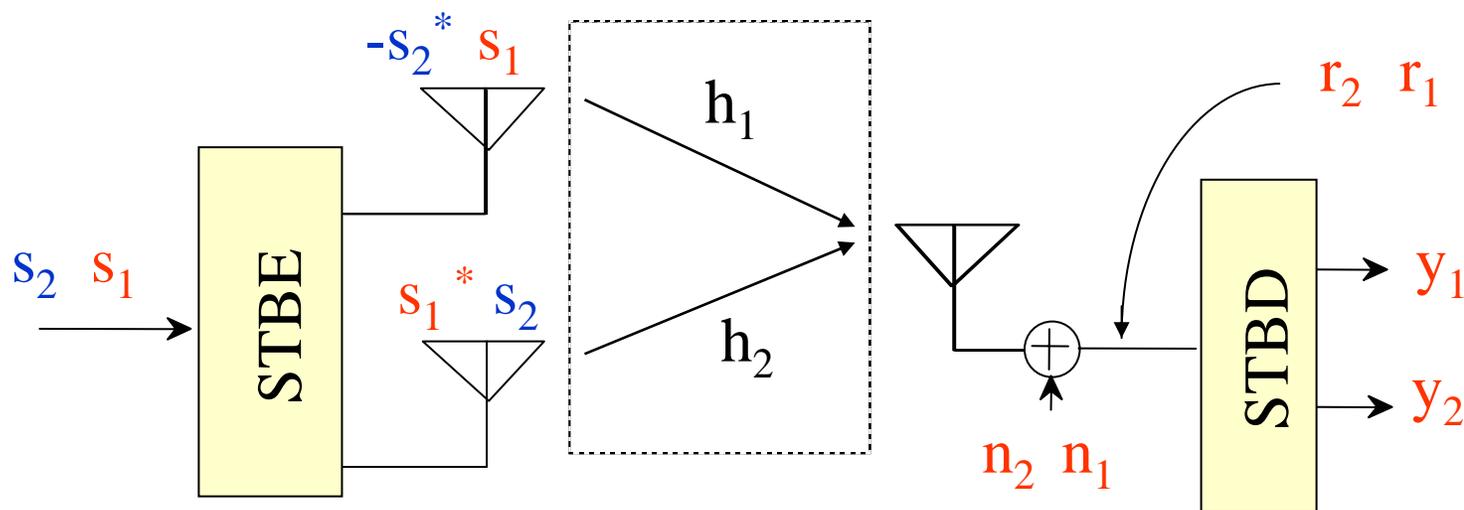


$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1$$

$$r_2 = h_2 s_1^* - h_1 s_2^* + n_2$$



送信ダイバーシチ: Alamoutiの方法がなぜうまくか？

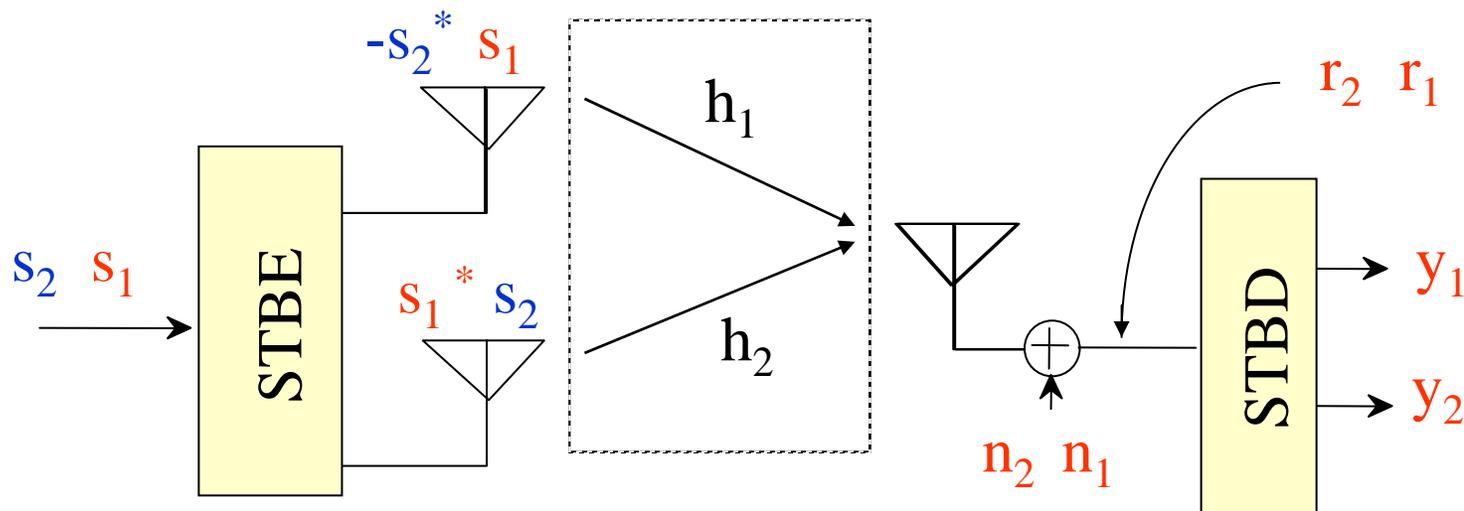


$$h_1^* r_1 = |h_1|^2 s_1 + h_1^* h_2 s_2 + h_1^* n_1$$

$$h_2 r_2^* = |h_2|^2 s_1 - h_1^* h_2 s_2 + h_2 n_2^*$$



送信ダイバーシチ: Alamoutiの方法がなぜうまくか？



[s_1 を最大比合成する演算が s_2 を0にする演算]

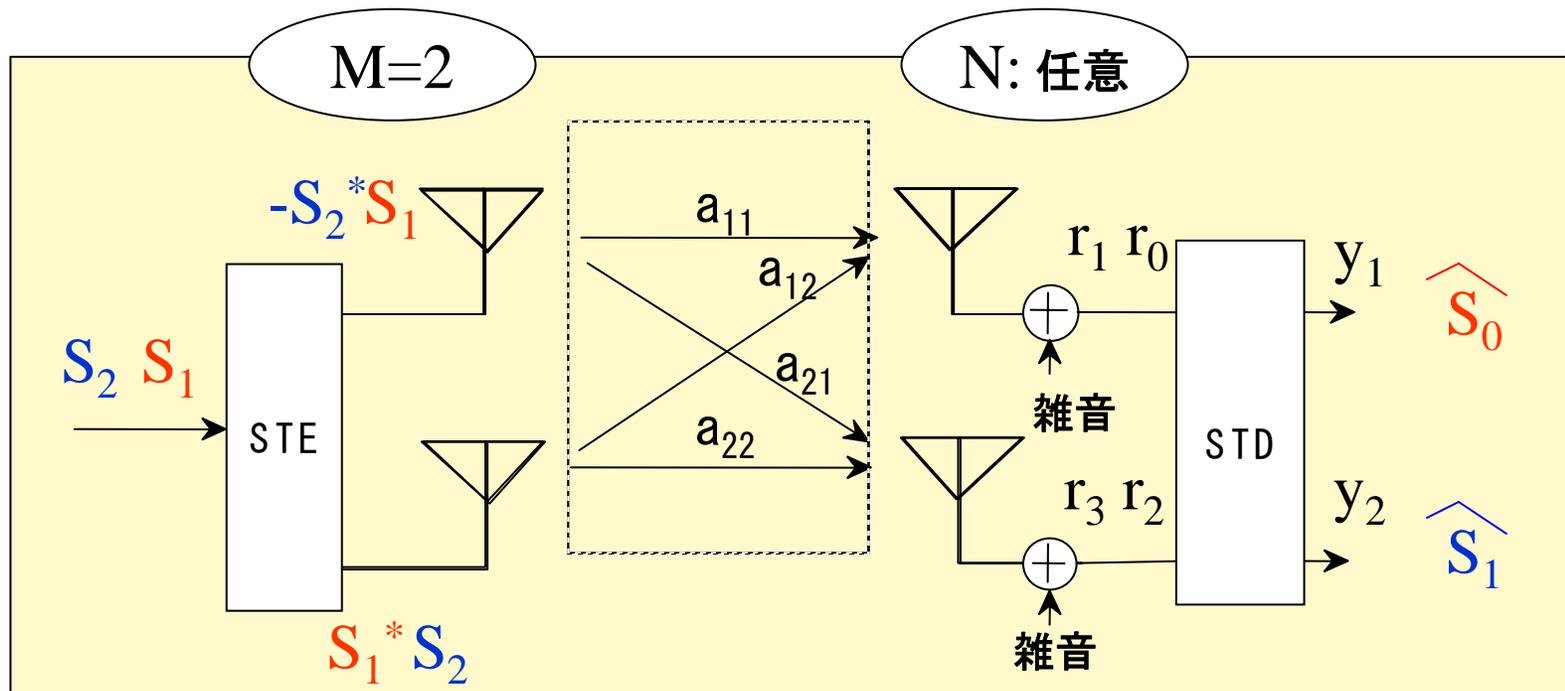
$$\begin{aligned}
 h_1^* r_1 &= |h_1|^2 s_1 + h_1^* h_2 s_2 + h_1^* n_1 \\
 +) \quad h_2 r_2^* &= |h_2|^2 s_1 - h_1^* h_2 s_2 + h_2 n_2^*
 \end{aligned}$$

(信号 s_1 の受信と s_2 の受信には直交関係)

$$y_1 = \left(|h_1|^2 + |h_2|^2 \right) s_1 + 0 s_2 + \text{noise}$$



STBCのMIMOへの応用



受信側4(=2x2)素子の最大比合成と同等のフェージング抑圧効果。ただし、平均電力で-3dBの劣化がある。



時空間符号化伝送は送信ダイバーシティの技術である。
MIMO に適用し、その実力を発揮する場を得た。



時空間ブロック符号 (STBC)

[切れないリンクを実現する技術] まとめ

- 1) フルレート (入力信号と受信信号で伝送レートが同じ) フルダイバーシチ ($M \times N$ MIMO のダイバーシチオーダだが $1 \times MN$ に同じ) の伝送は $M=2$ (Alamouti) の場合のみ (ただし伝送信号が複素量の場合)
- 2) フルレートまたはフルダイバーシチのどちらか一方を満たさない直交符号は種々のものがある
- 3) 完全直交ではないがそれに近いフルレート・フルダイバーシチを実現する符号 (準直交符号) も提案されている



チャンネル容量を増やす技術

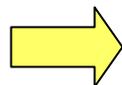
直交2偏波の利用
直交3偏波の利用



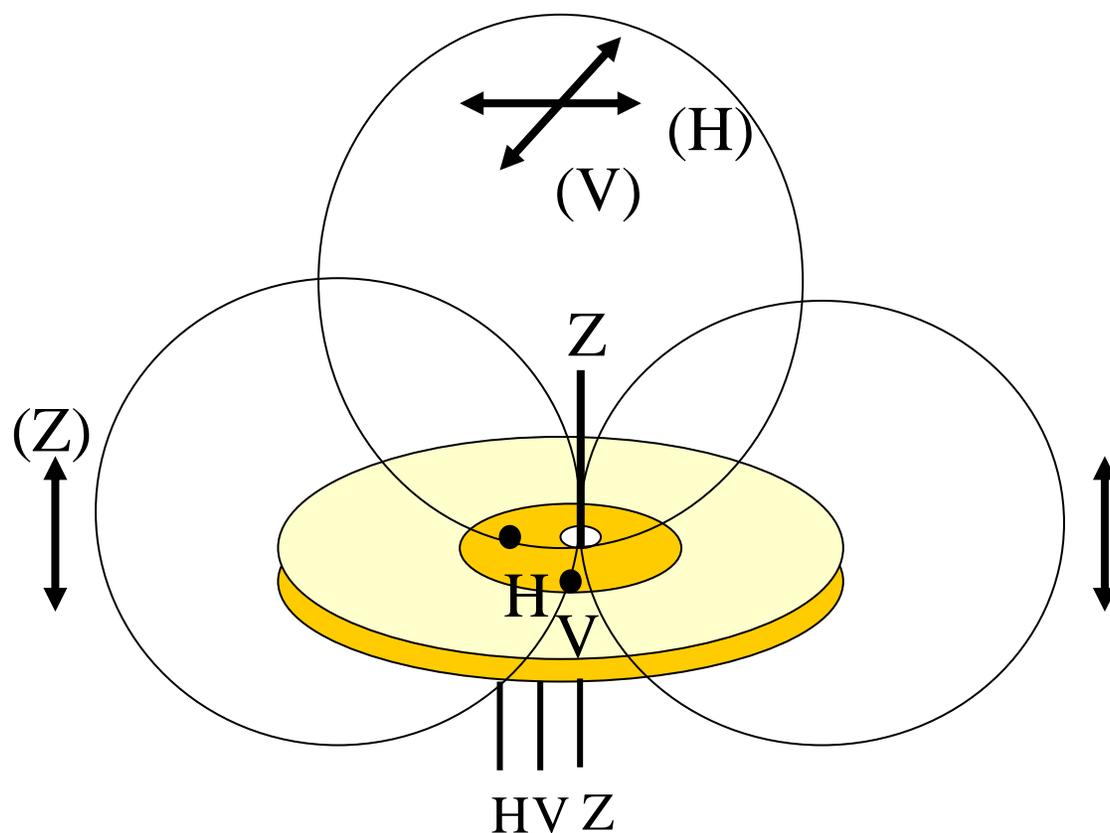
コンパクトMIMOアンテナ



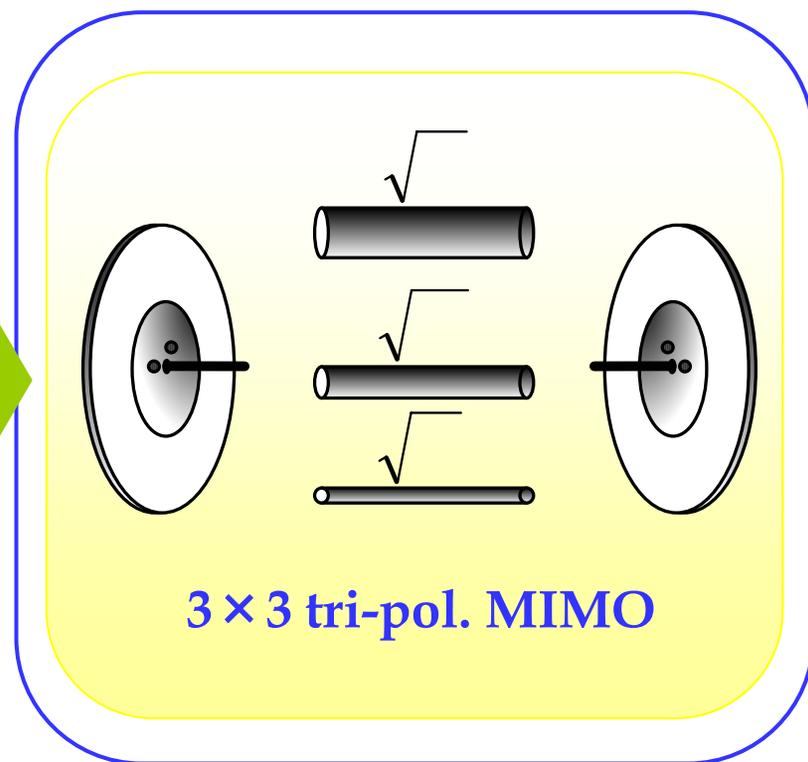
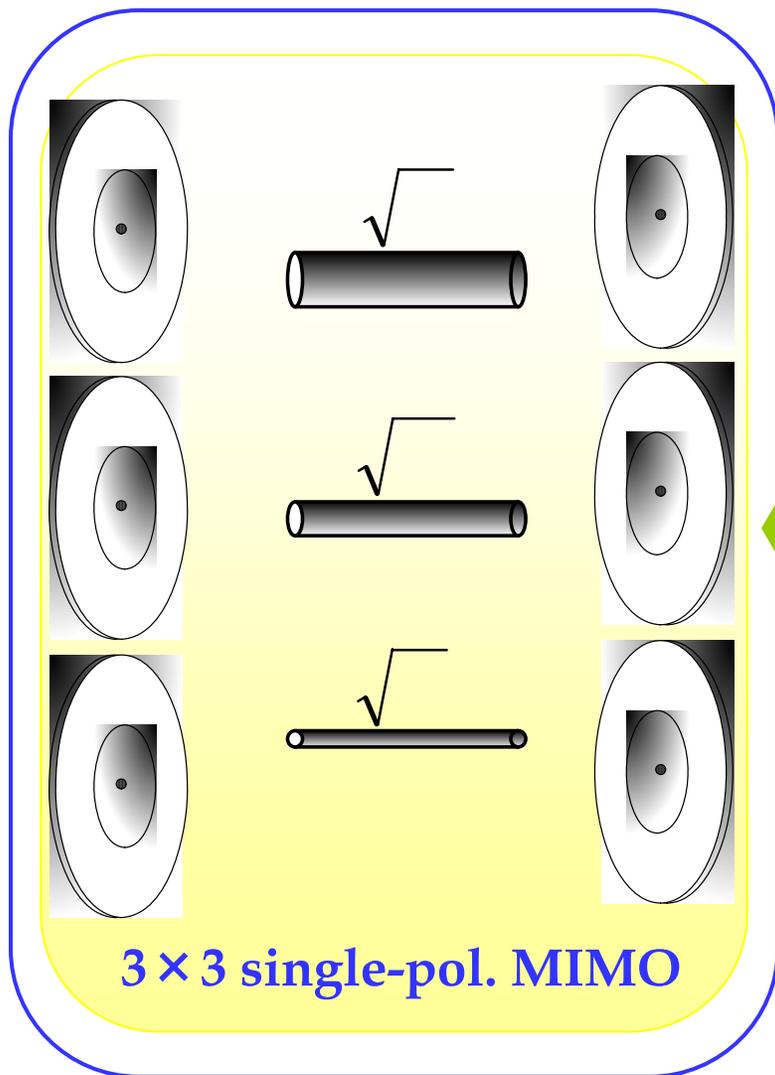
直交2偏波利用アンテナ



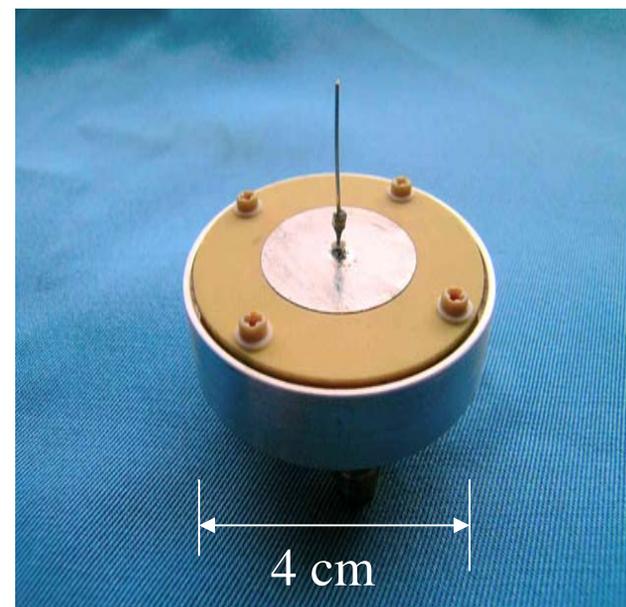
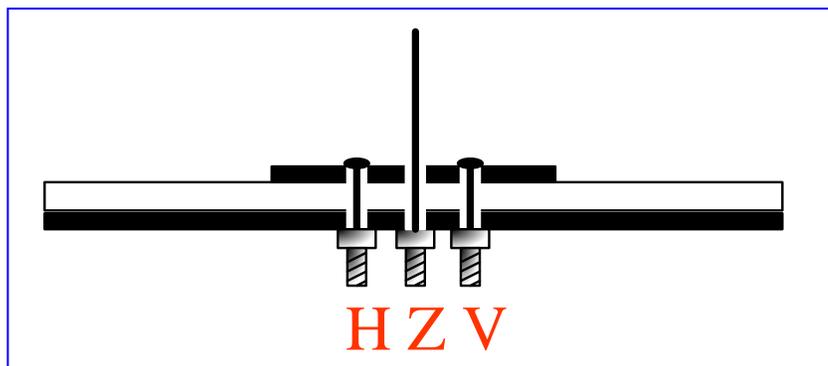
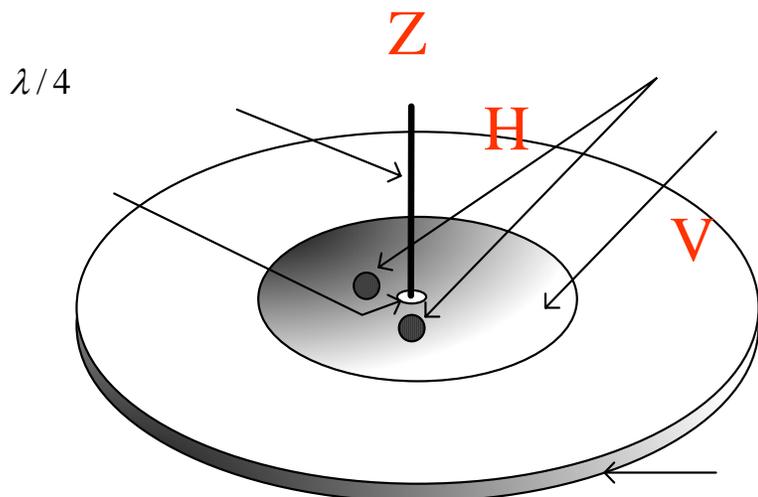
直交3偏波利用アンテナ



このアンテナは
一つで3つのブ
ランチを持つア
ンテナ
→ 小型化が
可能



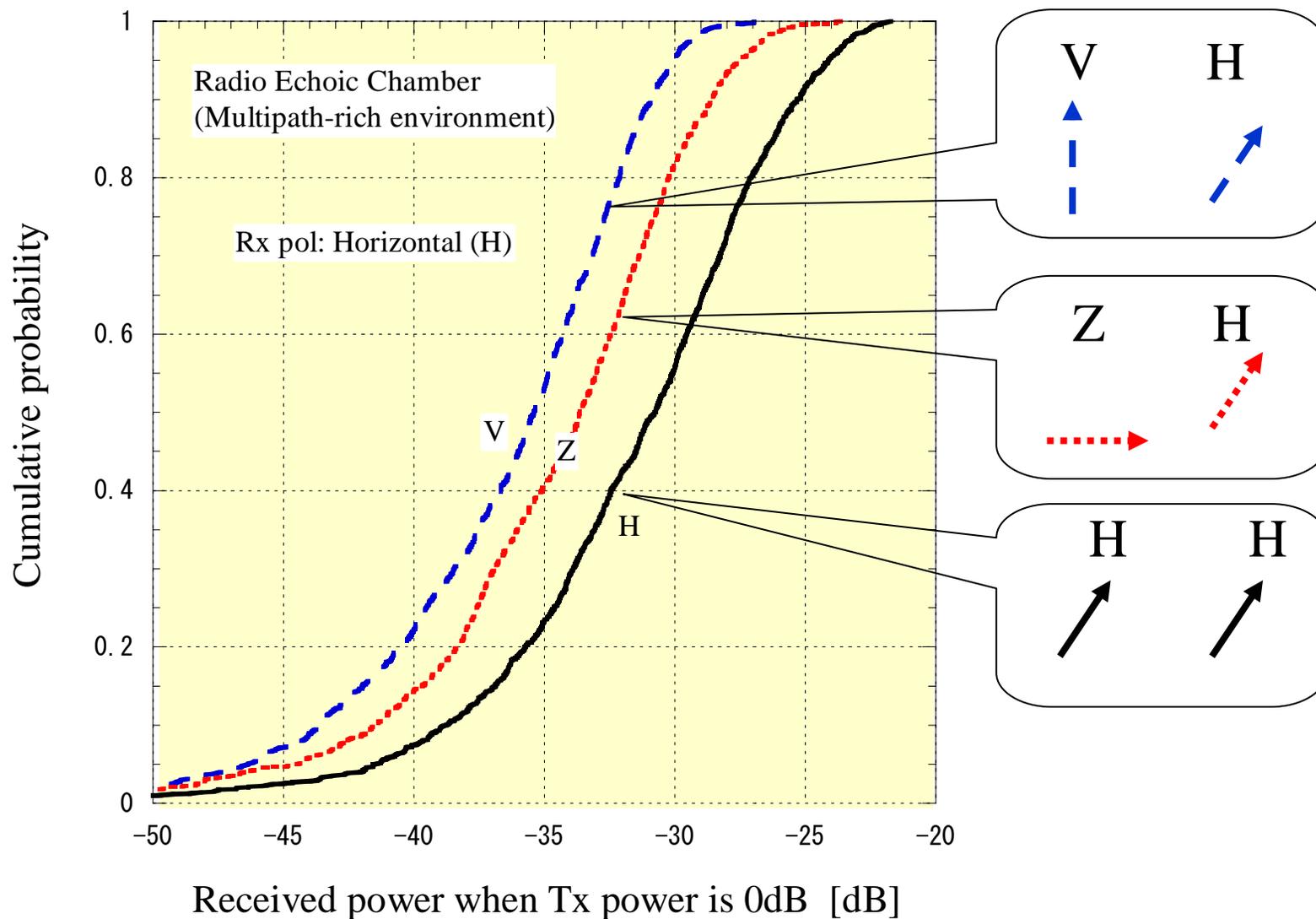
Antenna Element



(5 GHz)

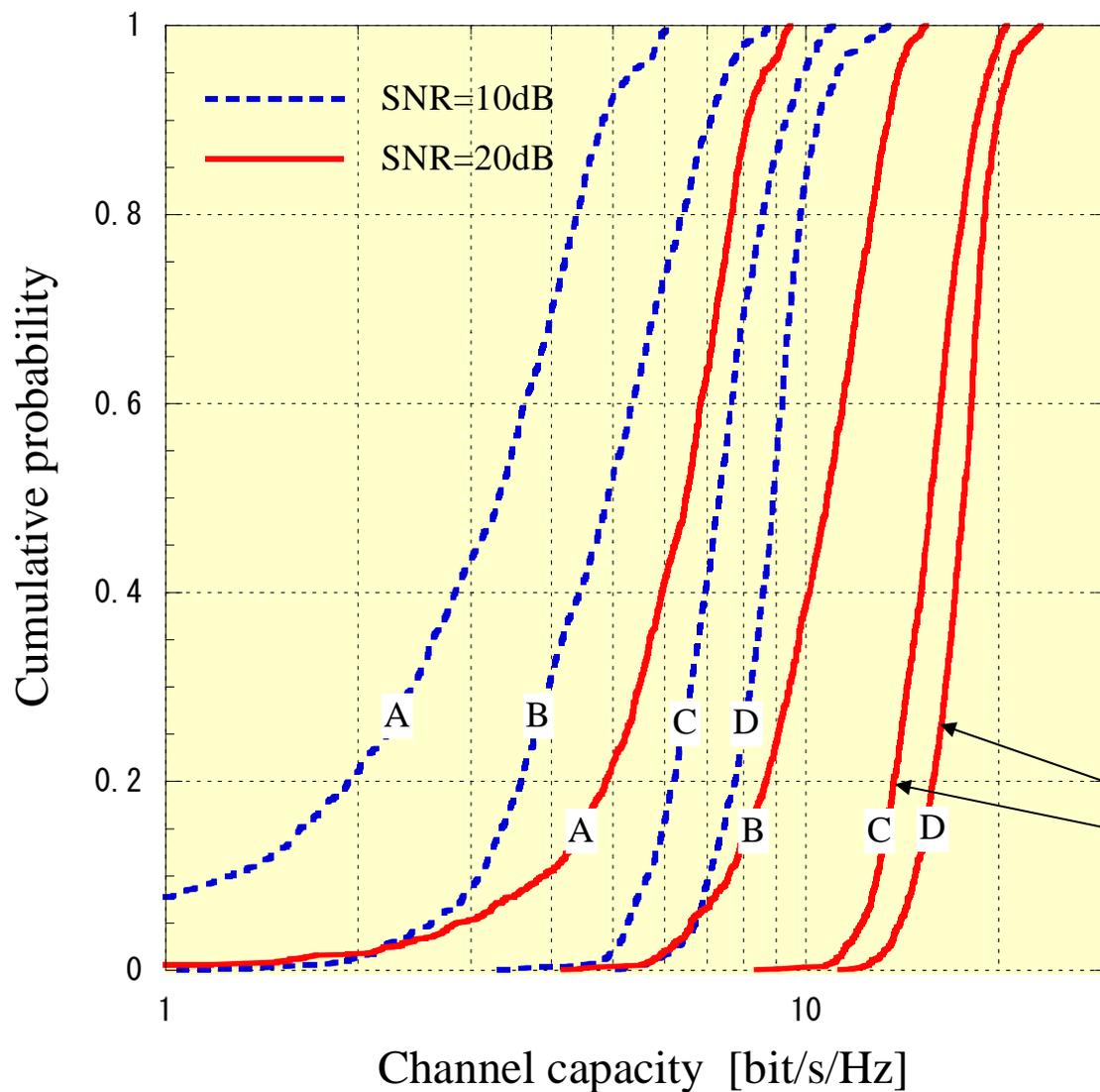


各偏波間 (H-H, V-H, and Z-H) の受信電力累積分布





CDF of Channel Capacity



A: 単一偏波 (1x1)

B: 直交偏波 (2x2)

C: 3偏波 (3x3)

D: 3素子アレー
(3x3)

3素子アレー
アンテナとの
差はかなり小
さい



MIMOの通信応用研究

無線LANから新サービスへ



MIMOは無線LANから実用化に

無線LANに備わっているMIMO適用の好条件

- 1) 高速・広帯域伝送に強いニーズ (○)
- 2) 利用される環境がマルチパスリッチ環境 (○)
(遅延スプレッドの値は比較的小さい) (△)
- 3) 利用される端末(パソコン等)に複数のアンテナを
設置できるようなスペースの余裕 (△)
- 4) 5GHz帯の電波が用いられ、アレーサイズの小型化が可能 (×)
- 5) 伝搬環境の時間的変化が遅く、高速追従性が不要 (×)

(○、△、× : セルラー環境の場合)

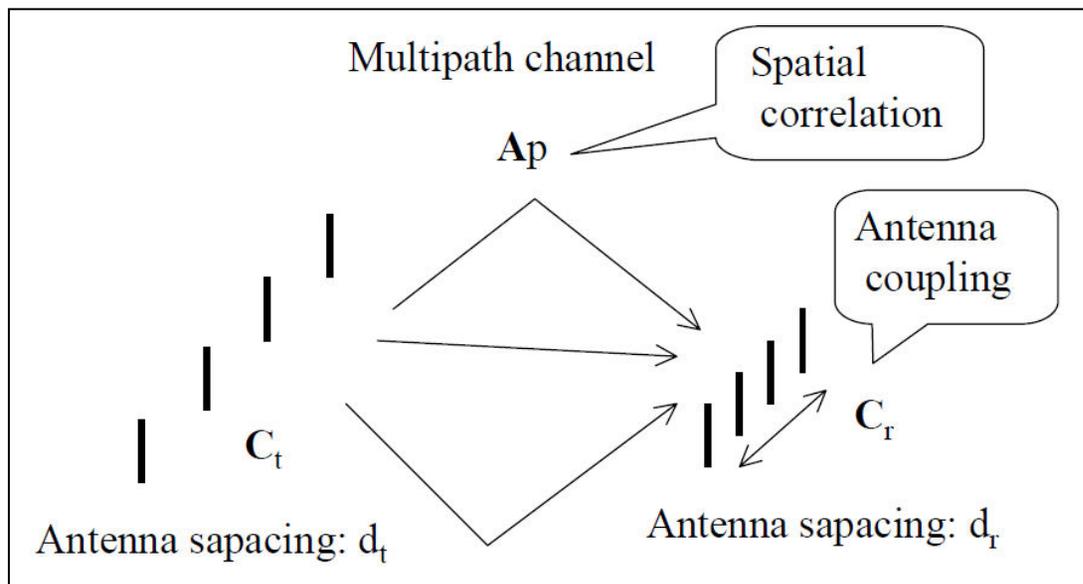


セルラー応用の課題

狭いスペースに複数アンテナを配置すると

- アンテナブランチ間でフェージングの相関が大きくなる
(並列伝送の力が弱くなる、ダイバーシチ効果が落ちる
:電波伝搬の問題)
- アンテナ間の相互結合(カップリング)の影響が大きくなる
(通信性能が劣化する? アンテナの問題)

アンテナ間隔が狭いことによる影響



$$A_e = C_r A_p C_t$$

A_e : MIMO実行チャネル特性

A_p : 伝搬チャネル特性

C_r : 受信側相互結合行列

C_t : 送信側相互結合行列

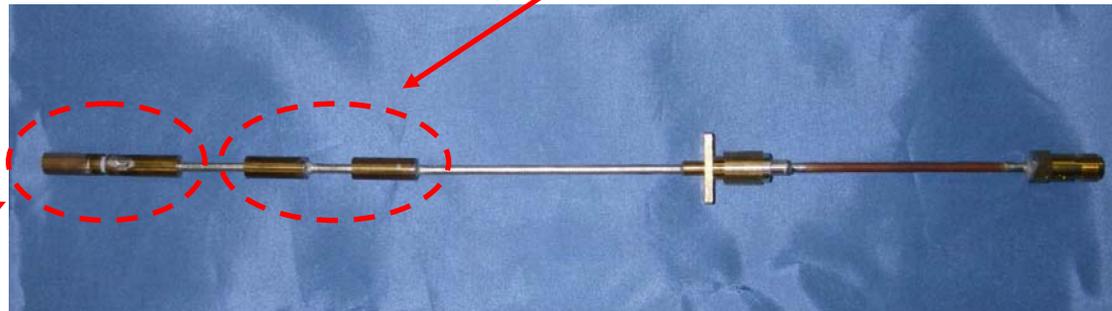
MIMOシステムにおいて、アンテナ間隔が狭いと、電波伝搬的にはブランチ間の相関(空間相関)として、アンテナ的には素子間の相互結合として影響が現れる。これらが伝送特性に与える影響は複合現象として現れる。

アンテナカップリング特性の影響

測定に使用したアンテナ

シュペルトップ(漏洩電流抑制)

素子



アンテナ内部写真

アンテナ型式:スリーブアンテナ

周波数:5.06GHz

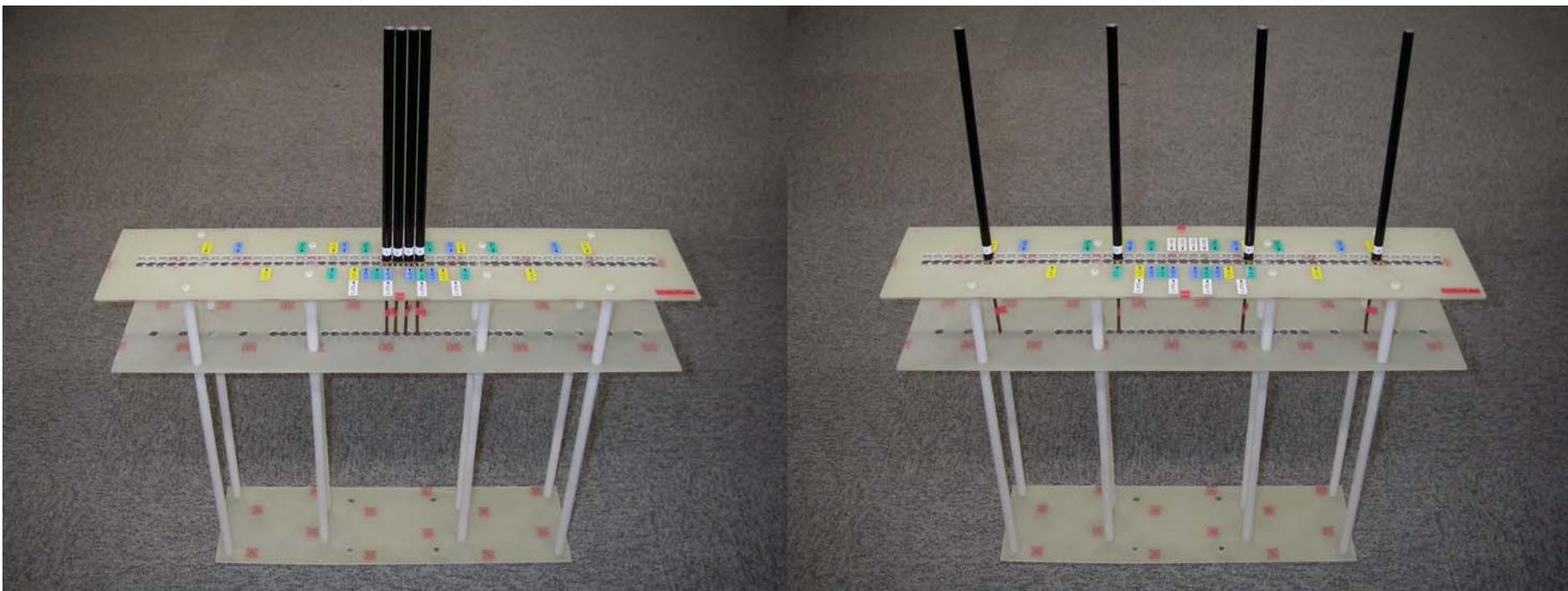
素子寸法:素子長 約33mm(0.56 λ)

直径 約5mm(0.08 λ)

アンテナカバー直径 約6.5mm(0.11 λ)

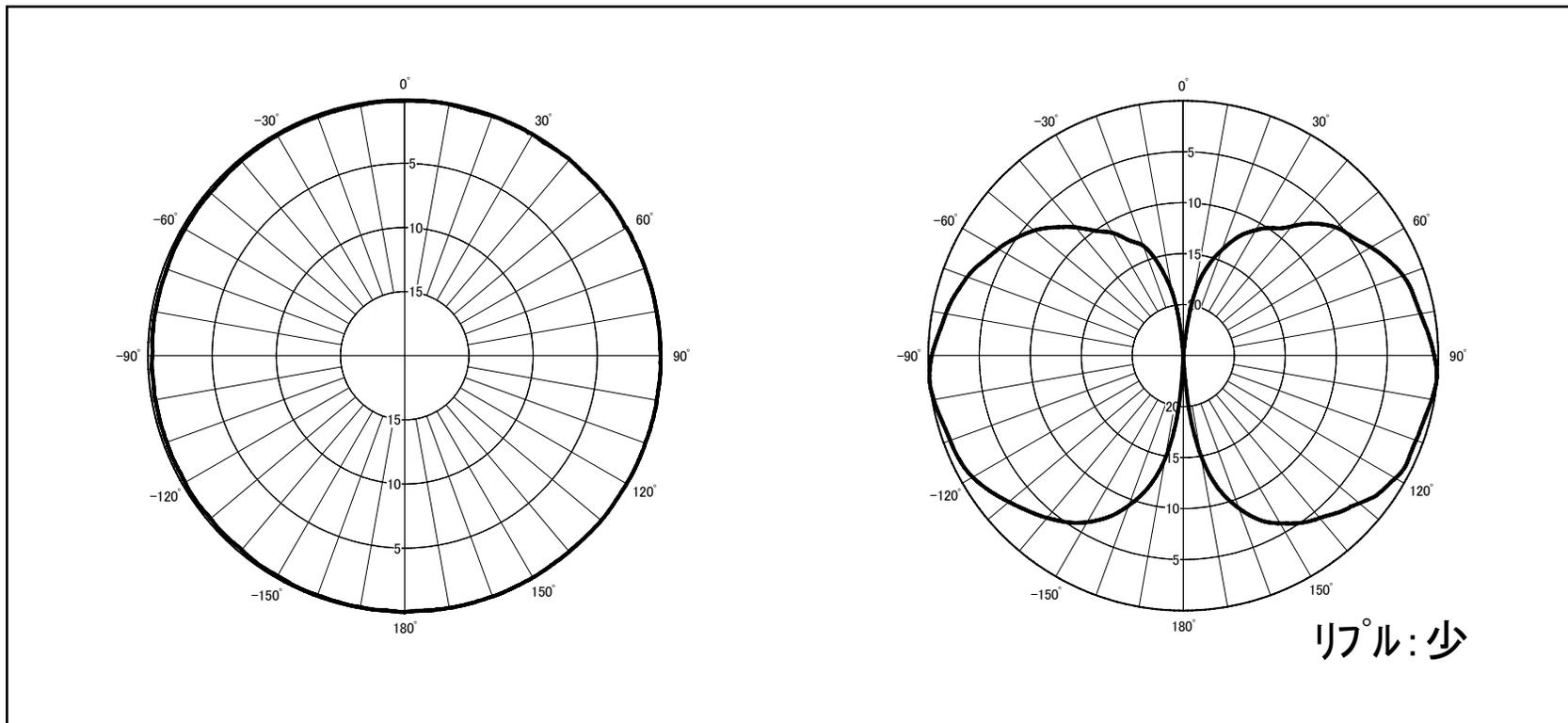
(大島他、AP研, 2007.11)

アンテナ配列時写真

素子間隔: 0.125λ 素子間隔: 1.5λ

(大島他、AP研, 2007.11)

スリーブアンテナ指向性

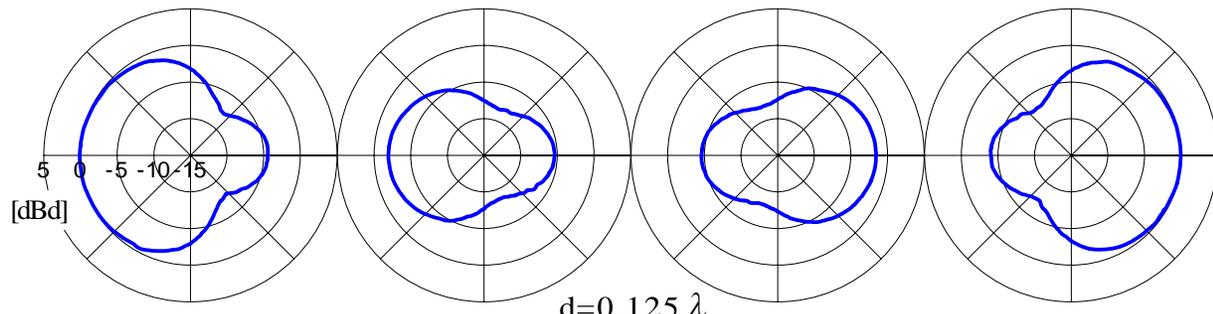


水平面内指向性

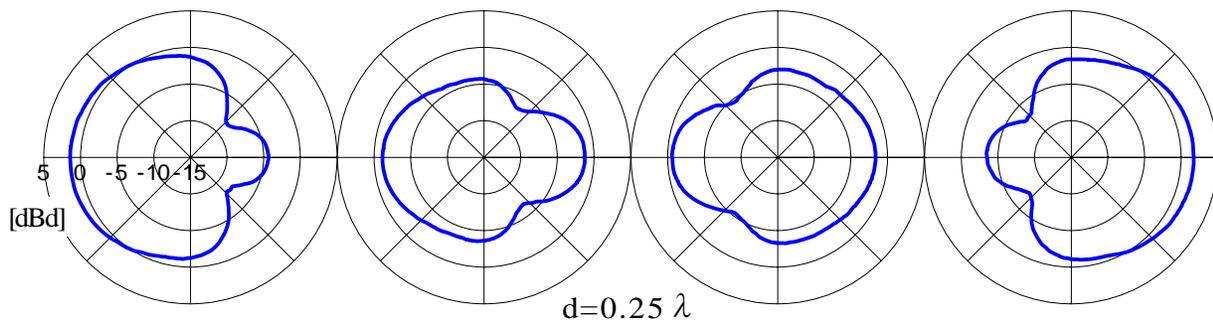
垂直面内指向性

(大島他、AP研, 2007.11)

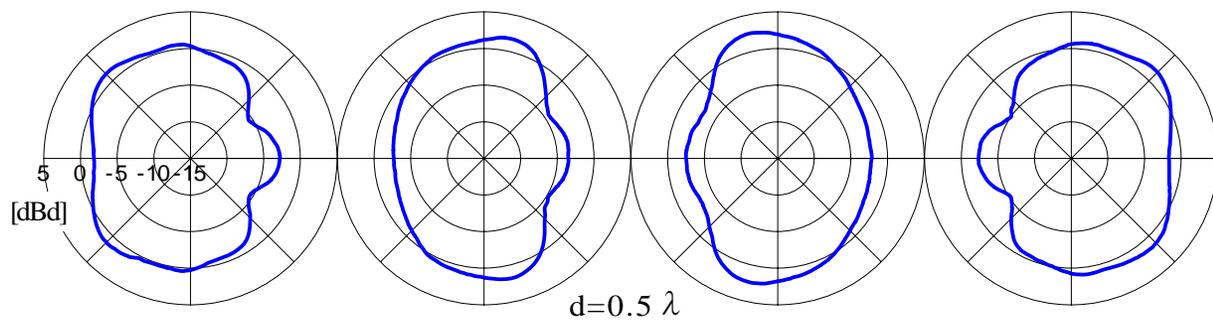
— F'



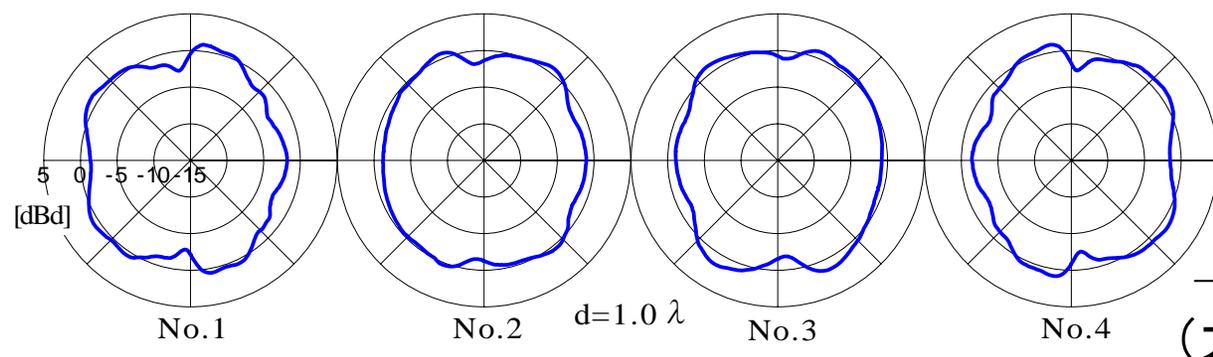
1/8 波長間隔



1/4 波長間隔

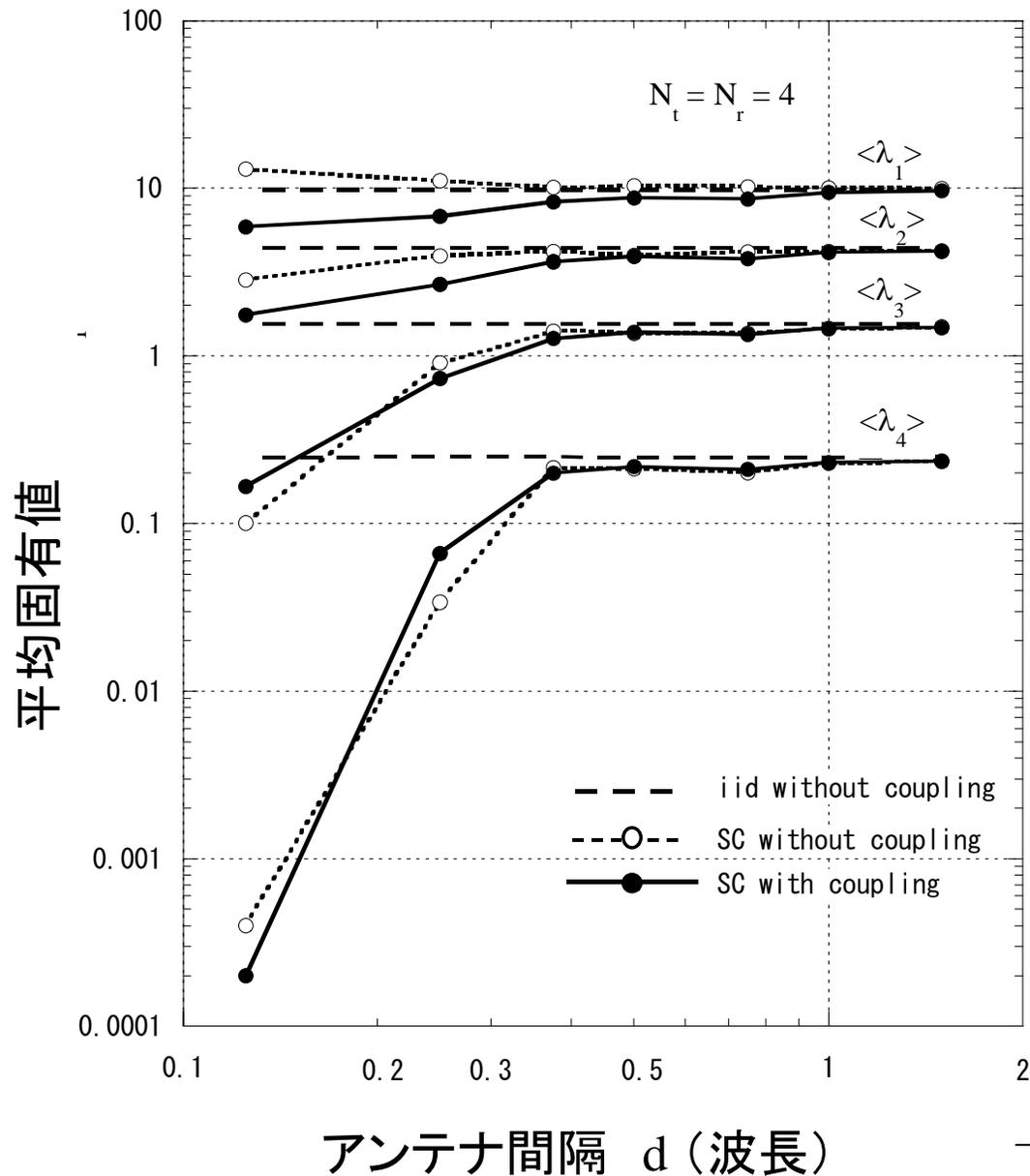


1/2 波長間隔



1 波長間隔

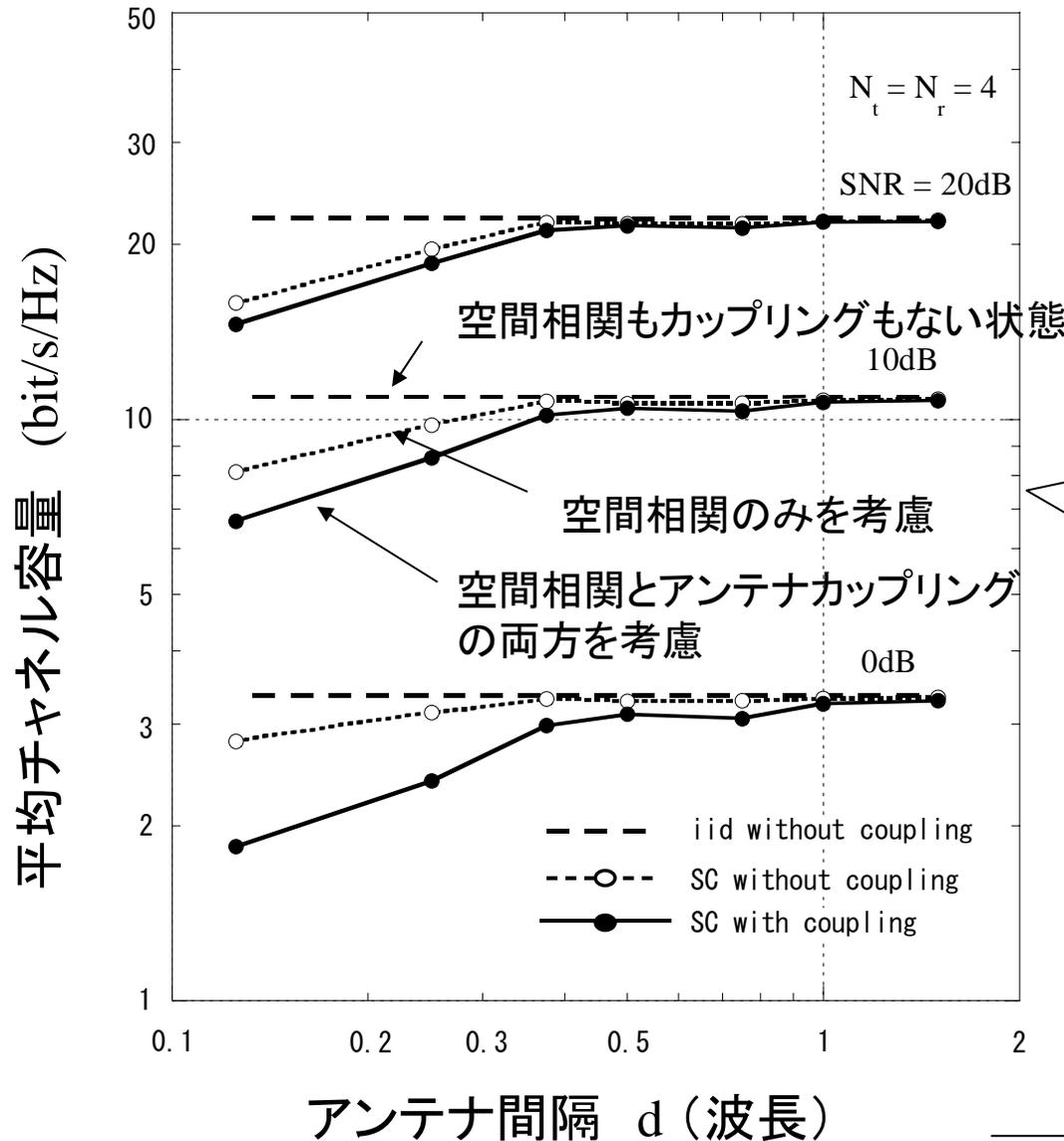
アンテナ間隔と平均固有値の関係



4x4 MIMO
 実結合行列を
 用いた平均固有
 値のアンテナ間隔
 依存性

アンテナ間隔と平均チャネル容量の関係

4x4 MIMO
 実結合行列を
 用いた平均チャネル
 容量のアンテナ
 間隔依存性



アンテナ間隔0.5波
 長程度までは特性
 の劣化は小さい

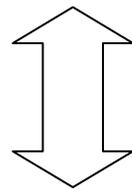
現在、このテーマは
 各機関で研究中



MIMOの適用分野

通信からレーダへ

通信の技術： チャネル特性の推定

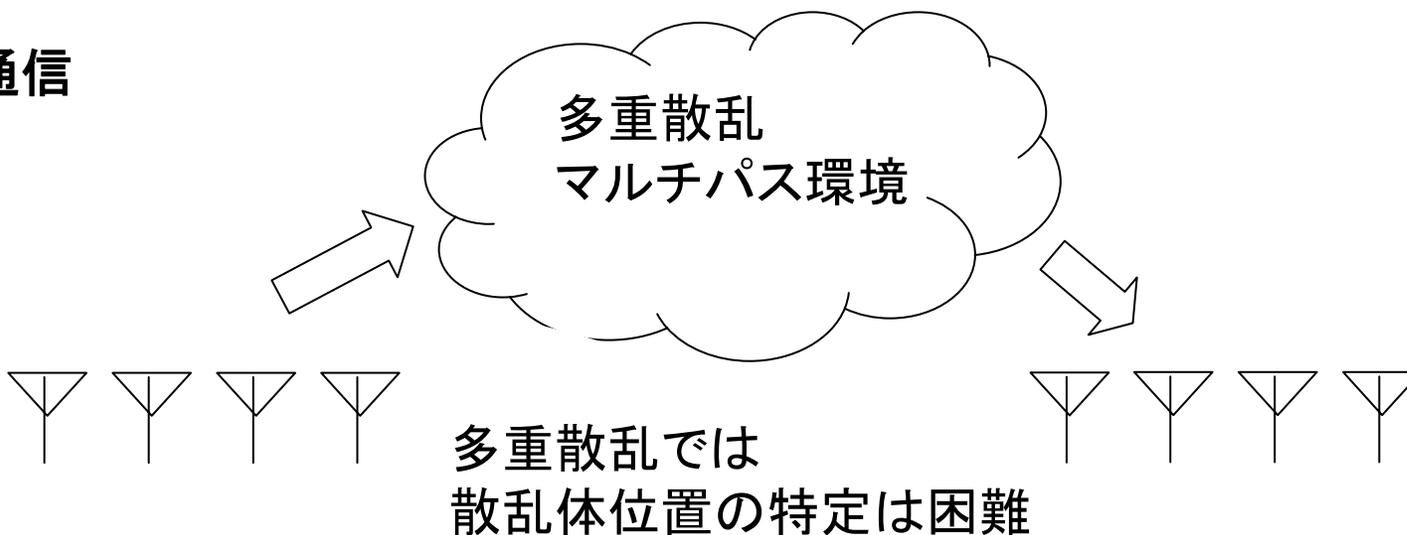


基本技術はほとんど同じ？

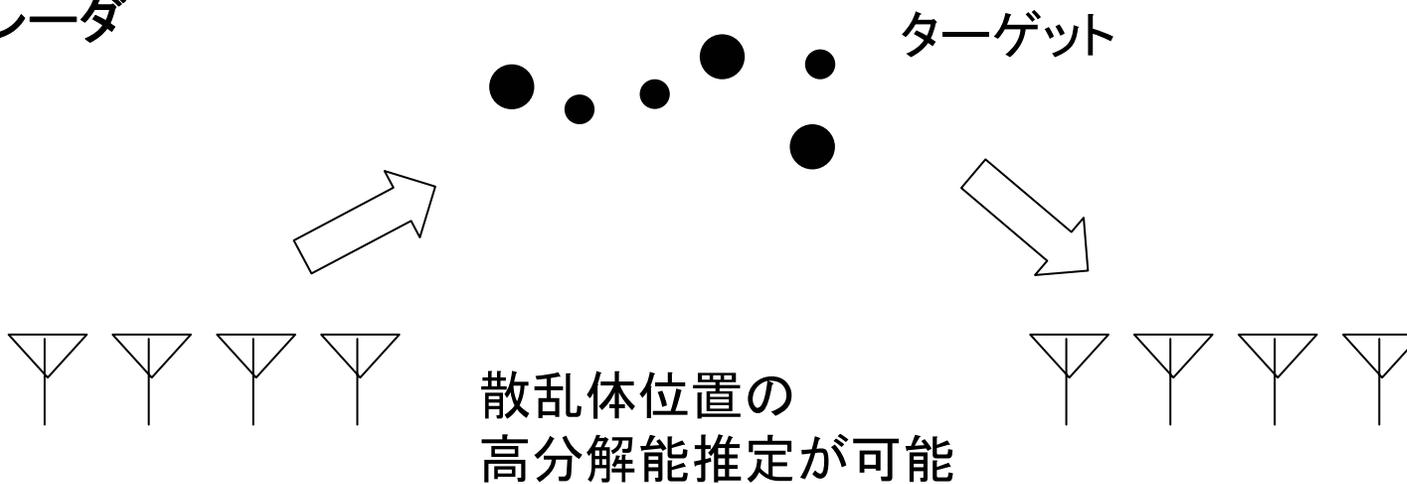
レーダの技術： ターゲット位置の推定



通信



レーダ





チャンネル相関行列: R_r and R_t

$$R_r \equiv AA^H$$

$$R_t \equiv A^H A$$

固有値 ($\lambda_i ; i = 1, 2, \dots m$) for R_r or R_t

固有ベクトル ($\mathbf{e}_{r,i} ; i = 1, 2, \dots m$) for R_r

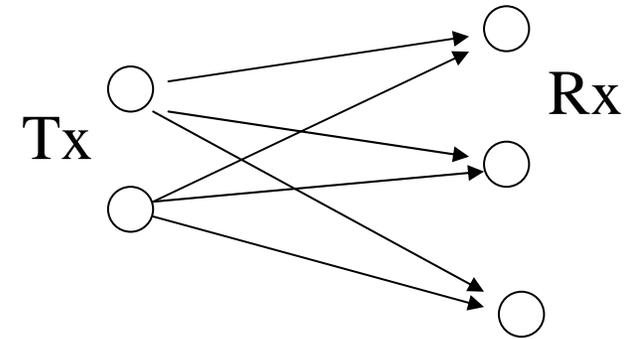
固有ベクトル ($\mathbf{e}_{t,i} ; i = 1, 2, \dots m$) for R_t



相関行列 R_t and R_r

3x2 MIMOの場合

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}$$



送信側
相関行列

$$R_t = A^H A$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & a_{31}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{32}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}^* a_{11} + a_{21}^* a_{21} + a_{31}^* a_{31} & a_{11}^* a_{12} + a_{21}^* a_{22} + a_{31}^* a_{32} \\ a_{12}^* a_{11} + a_{22}^* a_{21} + a_{32}^* a_{31} & a_{12}^* a_{12} + a_{22}^* a_{22} + a_{32}^* a_{32} \end{pmatrix}$$

受信側
相関行列

$$R_r = A A^H$$

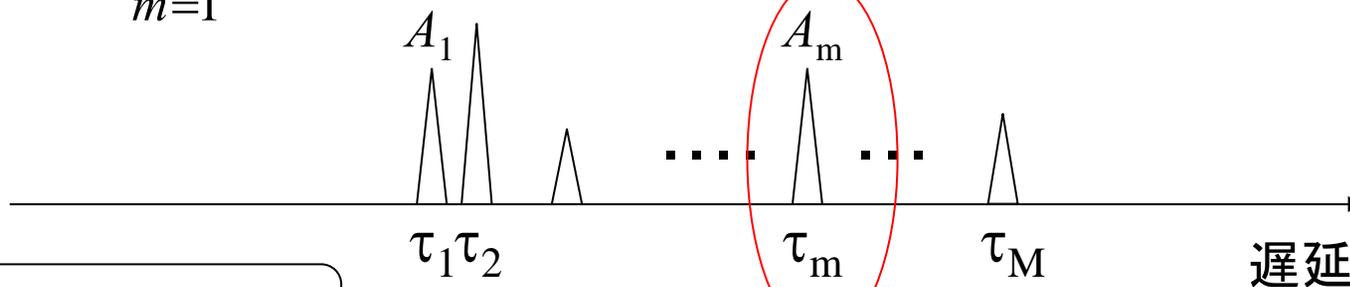
$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & a_{31}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{32}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} a_{11}^* + a_{12} a_{12}^* & a_{11} a_{21}^* + a_{12} a_{22}^* & a_{11} a_{31}^* + a_{12} a_{32}^* \\ a_{21} a_{11}^* + a_{22} a_{12}^* & a_{21} a_{21}^* + a_{22} a_{22}^* & a_{21} a_{31}^* + a_{22} a_{32}^* \\ a_{31} a_{11}^* + a_{32} a_{12}^* & a_{31} a_{21}^* + a_{32} a_{22}^* & a_{31} a_{31}^* + a_{32} a_{32}^* \end{pmatrix}$$



チャネル表現

$$H(\tau, \theta_t, \theta_r)$$

$$= \sum_{m=1}^M A_m \delta(\theta_t - \theta_{t,m}) \delta(\theta_r - \theta_{r,m}) \delta(\tau - \tau_m)$$



パラメータ値の特定

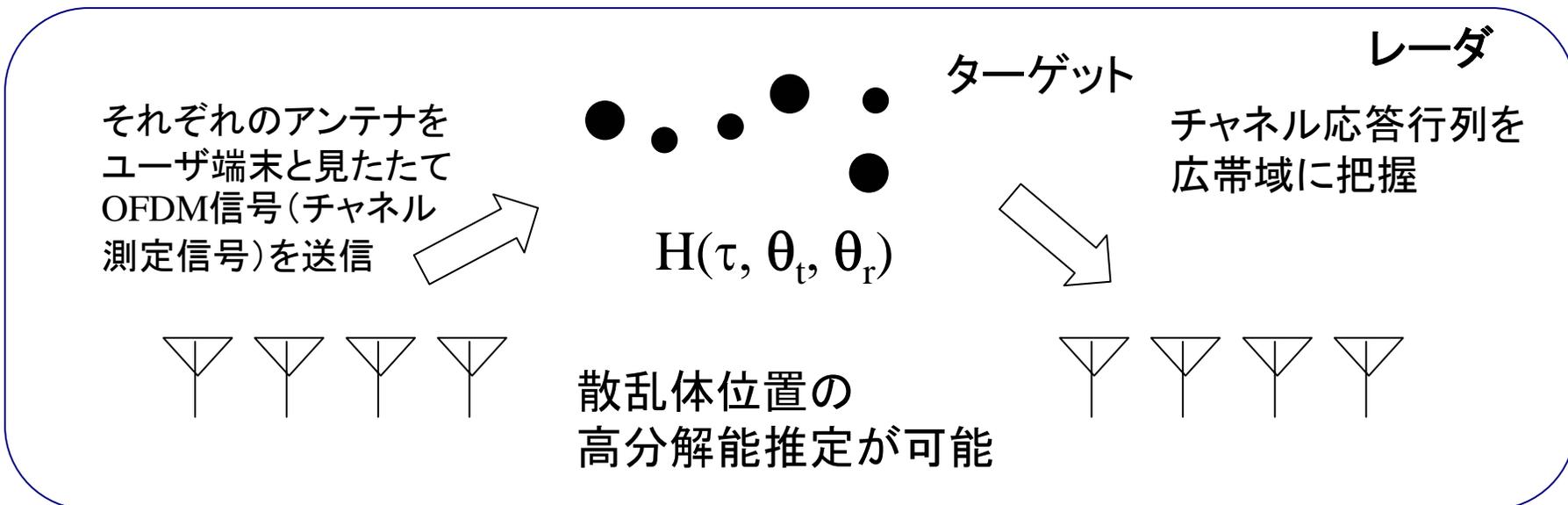
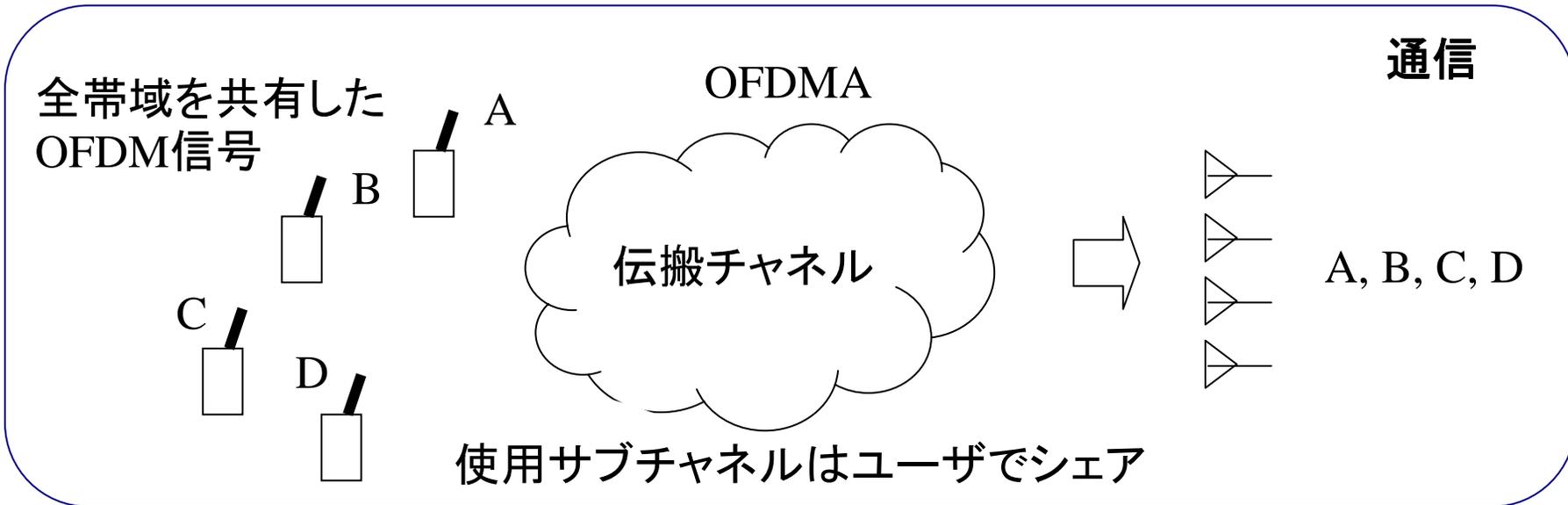
τ_m → 広帯域信号利用により推定

$\theta_{t,m}$ → $R_{t,m} (= A_m^H A_m)$ より推定 (MUSIC法等)

$\theta_{r,m}$ → $R_{r,m} (= A_m A_m^H)$ より推定 (MUSIC法等)



通信のOFDMA の仕組みをMIMOレーダに応用するのは面白い？





講演のまとめ

- MIMOには「ふしぎ」と感じる部分が多い
- 複合技術で深みがあり、講演者によって説明の仕方や視点が変わる
- 学生（特に大学院生）にはちょうど良い探検テーマが多い
- 通信分野では原理的なことは出揃ってきて、開発が主になってきている
- 応用分野は、無線LANからセルラー（アウトドア系）へ
- 通信の技術を電波応用（レーダ）に活かさないだろうか？



過剰な期待は禁物

されど *MIMO*