

2003信学ソ大
チュートリアル講演
MIMOアンテナシステム

MIMO情報伝送の基礎

唐沢 好男
(電気通信大学)

講演の概要

MIMOとは

MIMOチャネルの表現

情報伝送の方法

チャネル容量

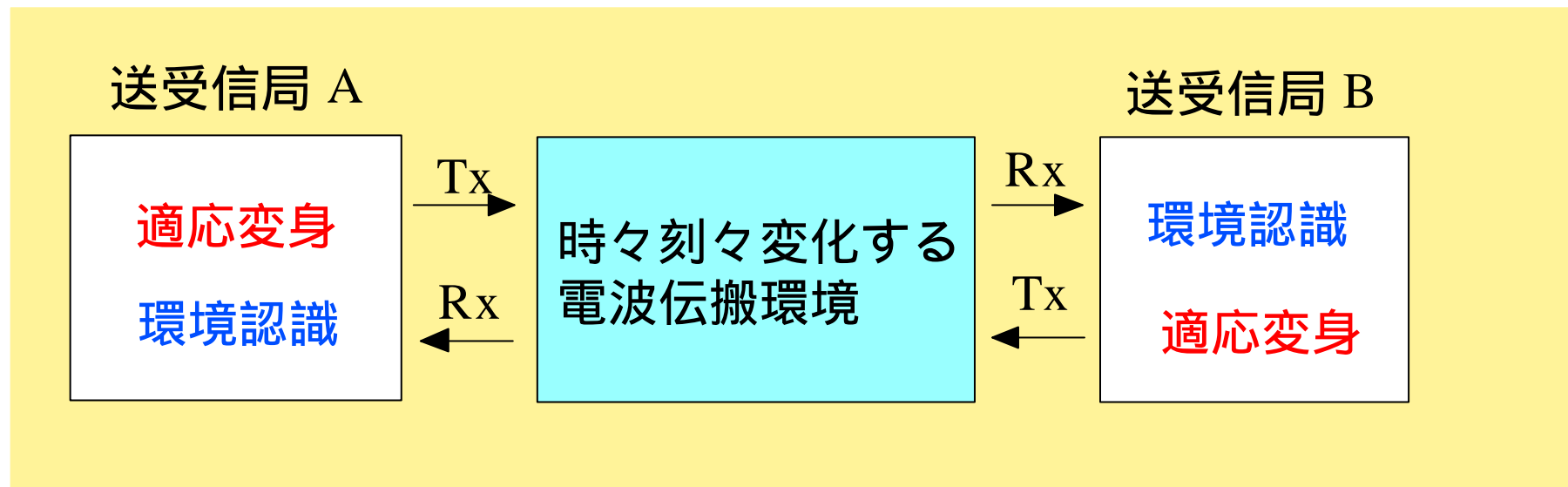
研究課題

まとめ

MIMOとは

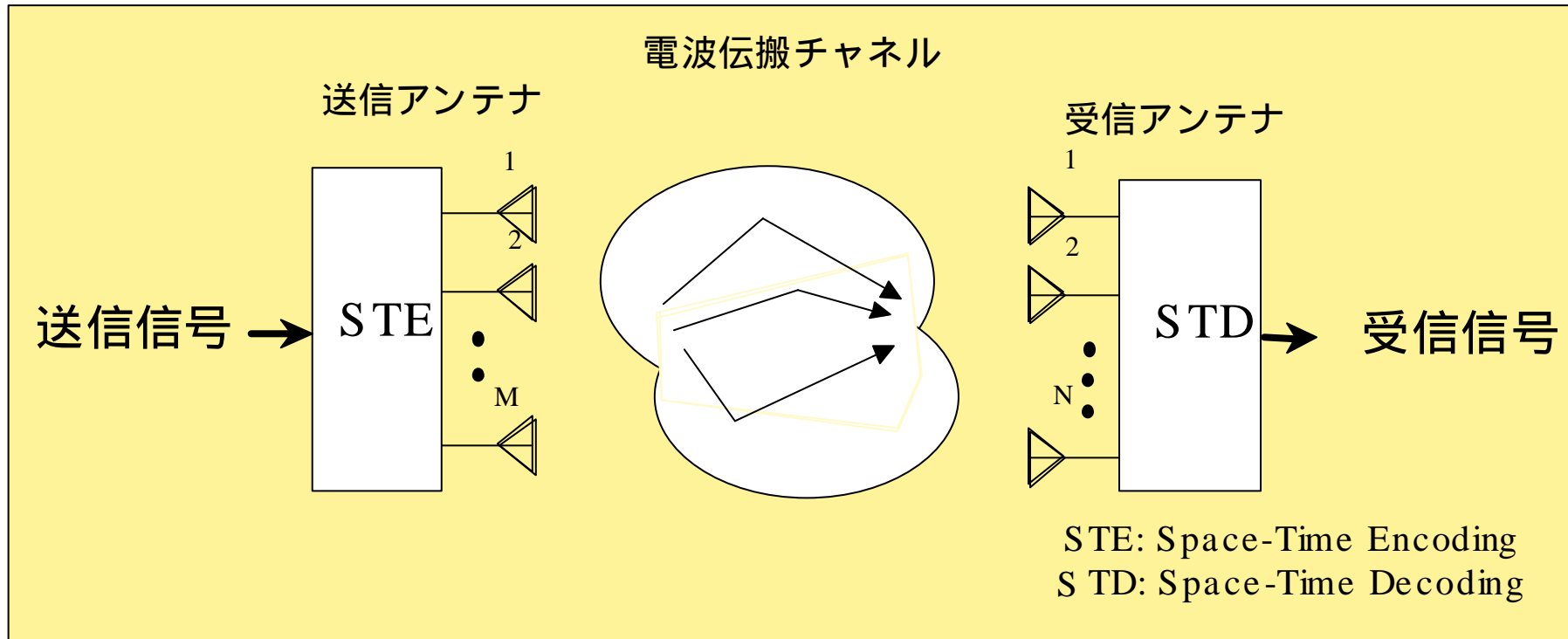
環境適応通信システムの中のアンテナ・伝搬

キーワード：ソフトウェア無線
ソフトウェアアンテナ
MIMO



【環境適応通信のコンセプト】

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output



MIMOは「単なる送受信アダプティブアレー」ではない

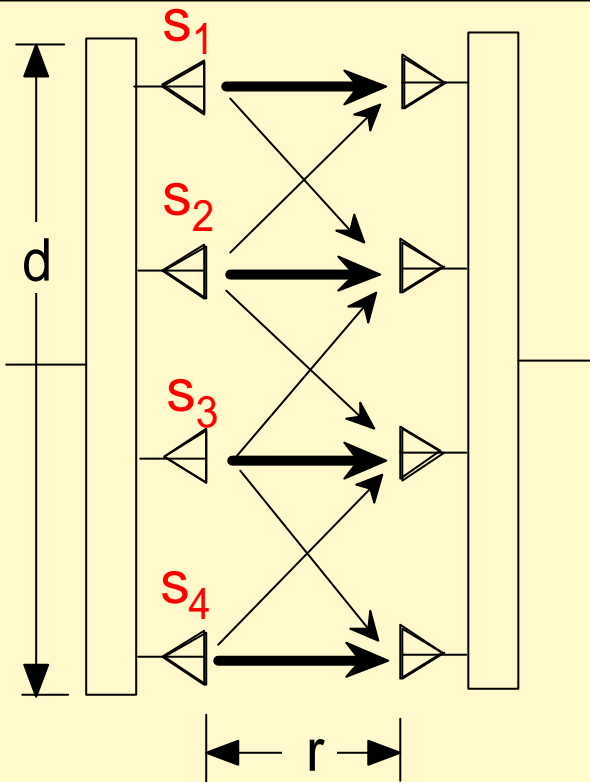
情報伝送能力：送信アンテナ利得 \times 受信アンテナ利得 \times 時空間符号化効果
(M) (N) (G)

多入出力ブランチは、必ずしもアレーアンテナである必要はない

アレーアンテナでいくつの独立な情報を送ることができるか？
電波伝搬の基本：自由空間伝搬

例 1 : $d \gg r$

$S_1 S_2 S_3 S_4$



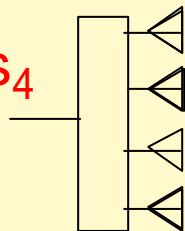
4つの情報を独立に送る能力がある
[= 固有パスが4本有る]



情報の送り方には
いろいろな方法が
考えられる

例 2 : $d \ll r$

$S_1 S_2 S_3 S_4$

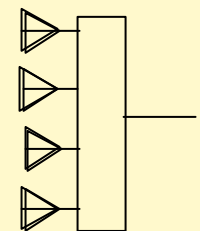


$S_1 S_2 S_3 S_4$

一つの情報しか送れない

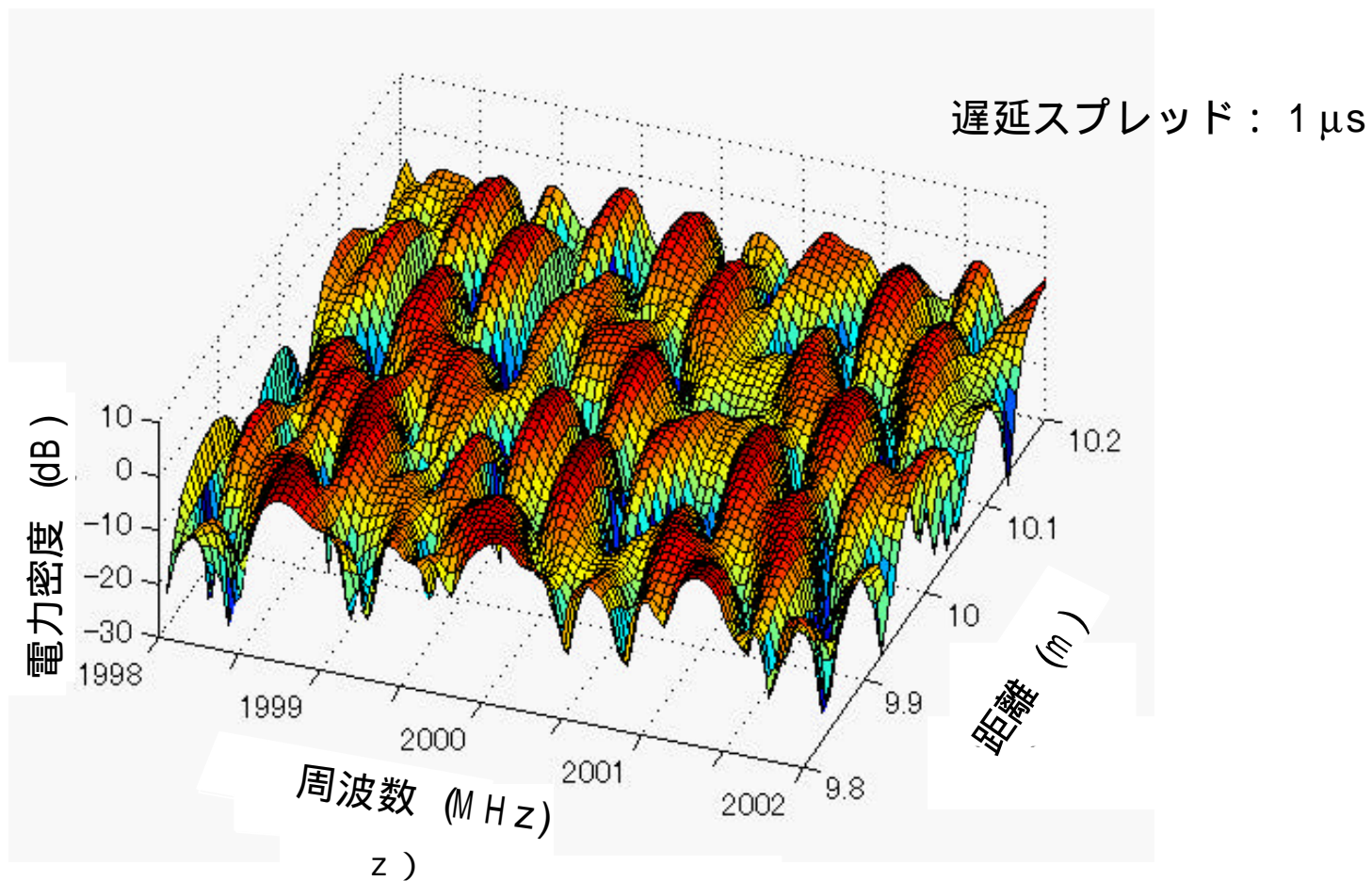
[= 固有パスは一つしか無い]

アンテナのビームを向けあうのが唯一



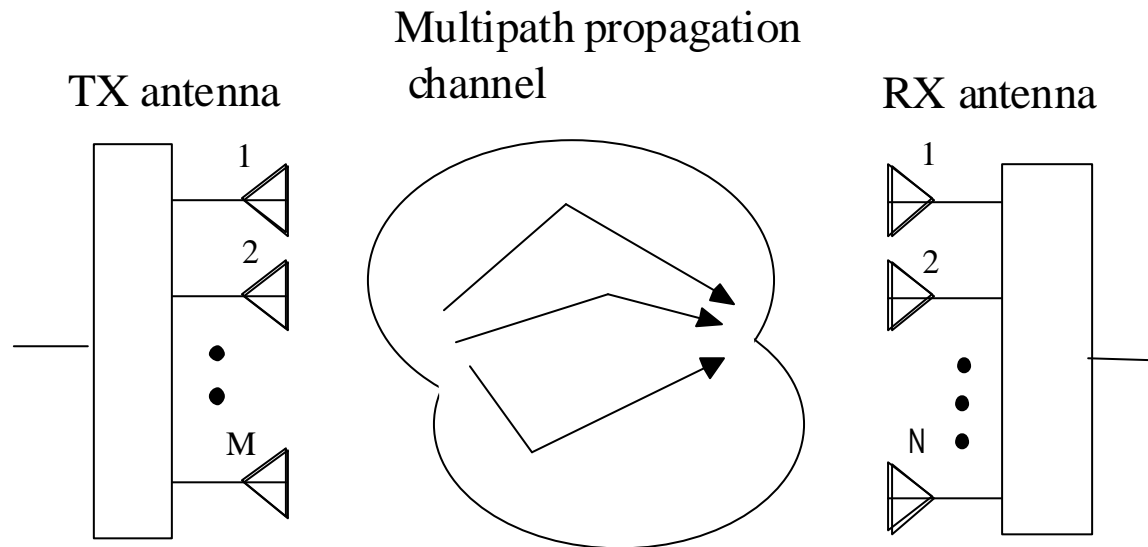
MIMOチャネルの表現

移動伝搬の性質：伝送路の周波数特性とその時間変動



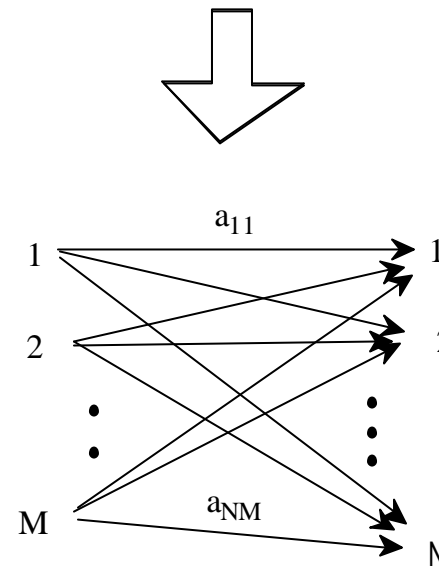
市街地を想定した伝搬チャネル特性（計算機シミュレーション）

MIMOチャネルの伝送路表現 (狭帯域信号の伝送)



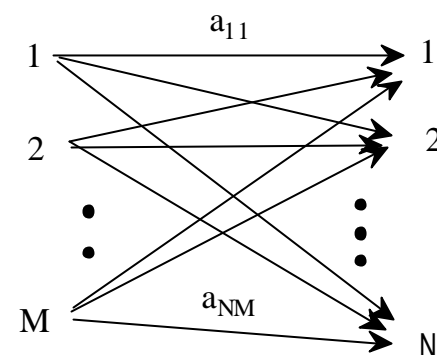
チャネル応答行列

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &\equiv [a_{nm}] \\
 &\equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2M} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NM} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



チャネル応答行列

$$A \equiv [a_{nm}] \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2M} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NM} \end{bmatrix}$$



相関行列

$A^H A$: $M \times M$ のエルミート行列

AA^H : $N \times N$ のエルミート行列

固有値

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{M_0}$: 相関行列 $A^H A$ 、 AA^H に対して共通

固有ベクトル

$\mathbf{e}_{t,i}$: 相関行列 $A^H A$ の固有値 λ_i に属する固有ベクトル

$\mathbf{e}_{r,i}$: 相関行列 AA^H の固有値 λ_i に属する固有ベクトル

MIMOチャネルの伝送路表現
(SVD: Singular Value
Decomposition)

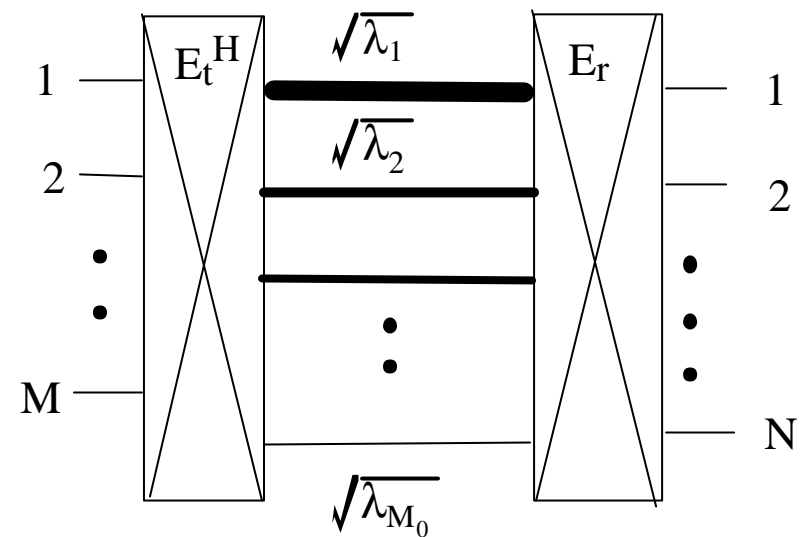
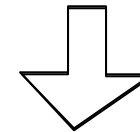
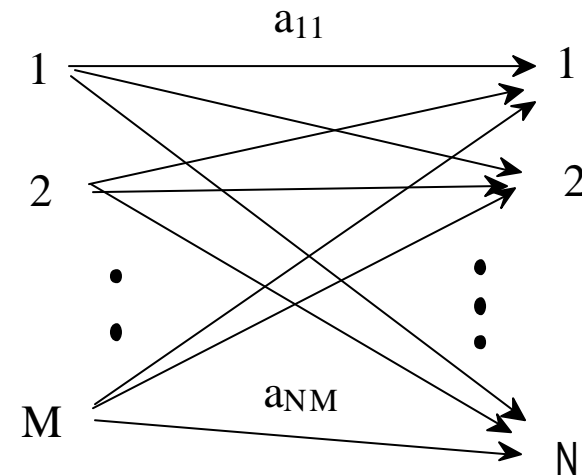
$$\mathbf{A} = \mathbf{E}_r \mathbf{D} \mathbf{E}_t^H = \sum_{i=1}^{M_0} \sqrt{\lambda_i} \mathbf{e}_{r,i} \mathbf{e}_{t,i}^H$$

$$M_0 \equiv \min(M, N)$$

$$\mathbf{D} \equiv \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{\lambda_{M_0}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}_t \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{t,1} & \mathbf{e}_{t,2} & \cdots & \mathbf{e}_{t,M_0} \end{bmatrix}$$

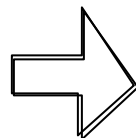
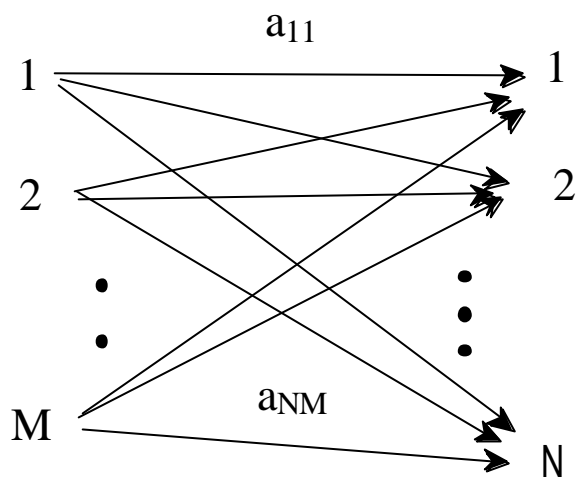
$$\mathbf{E}_r \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{r,1} & \mathbf{e}_{r,2} & \cdots & \mathbf{e}_{r,M_0} \end{bmatrix}$$



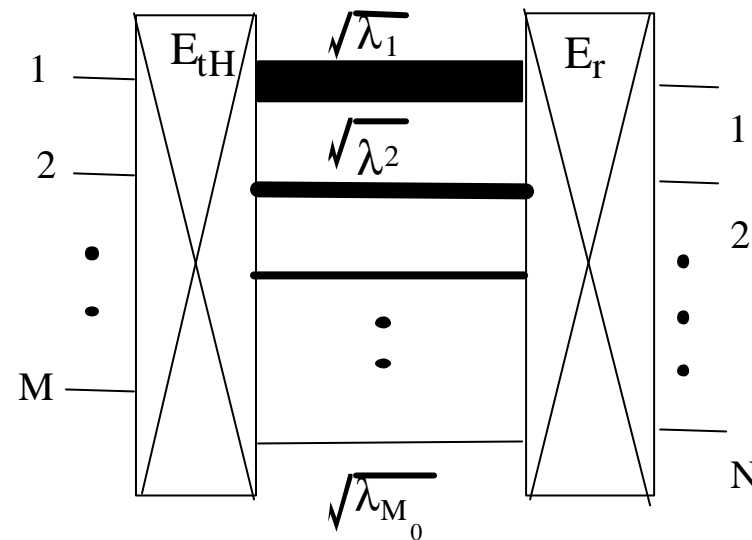
$$M_0 \equiv \min(M, N)$$

各パスの振幅が独立なレイリー分布に従う場合の固有値の統計的性質
(移動伝搬モデルの原点)

[MIMO チャンネル]



[等価回路]

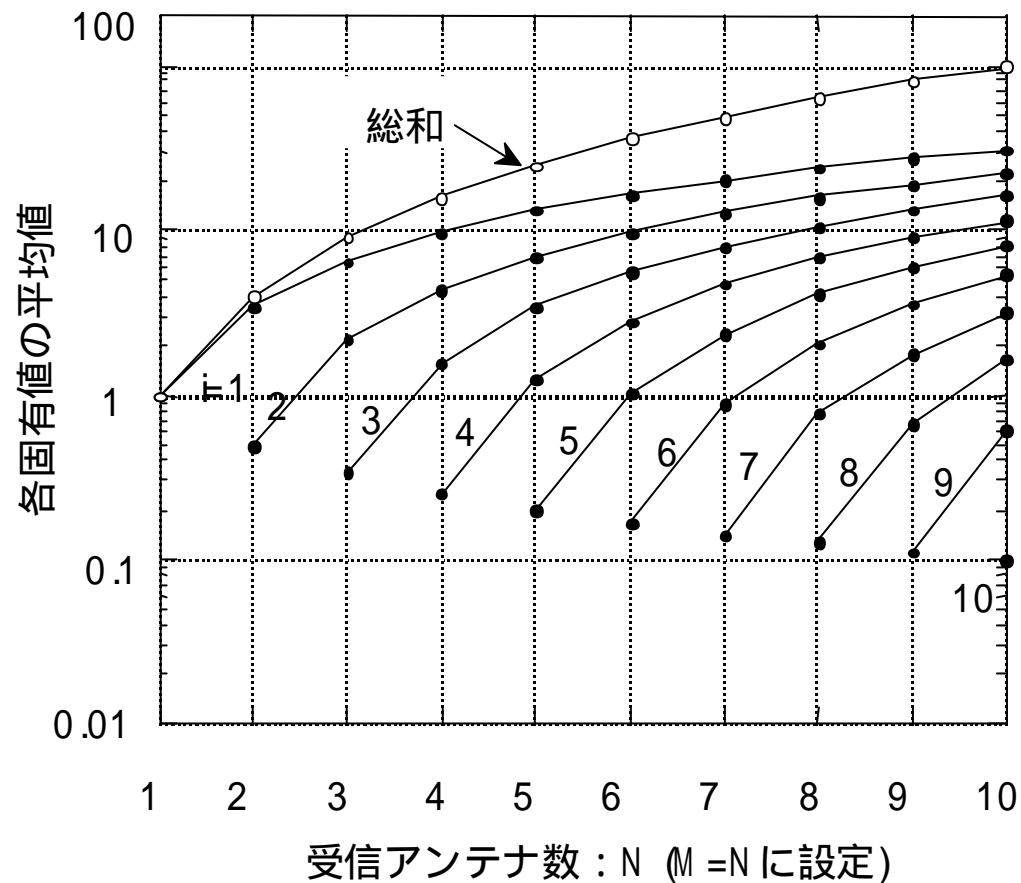


$|a_{nm}|$: レイリー分布 (i.i.d)

固有値 λ_i の平均値
PDF



MIMO (N x N) の固有値の平均値



レイリーフェージング
環境であることによっ
て決まる基本的な性質

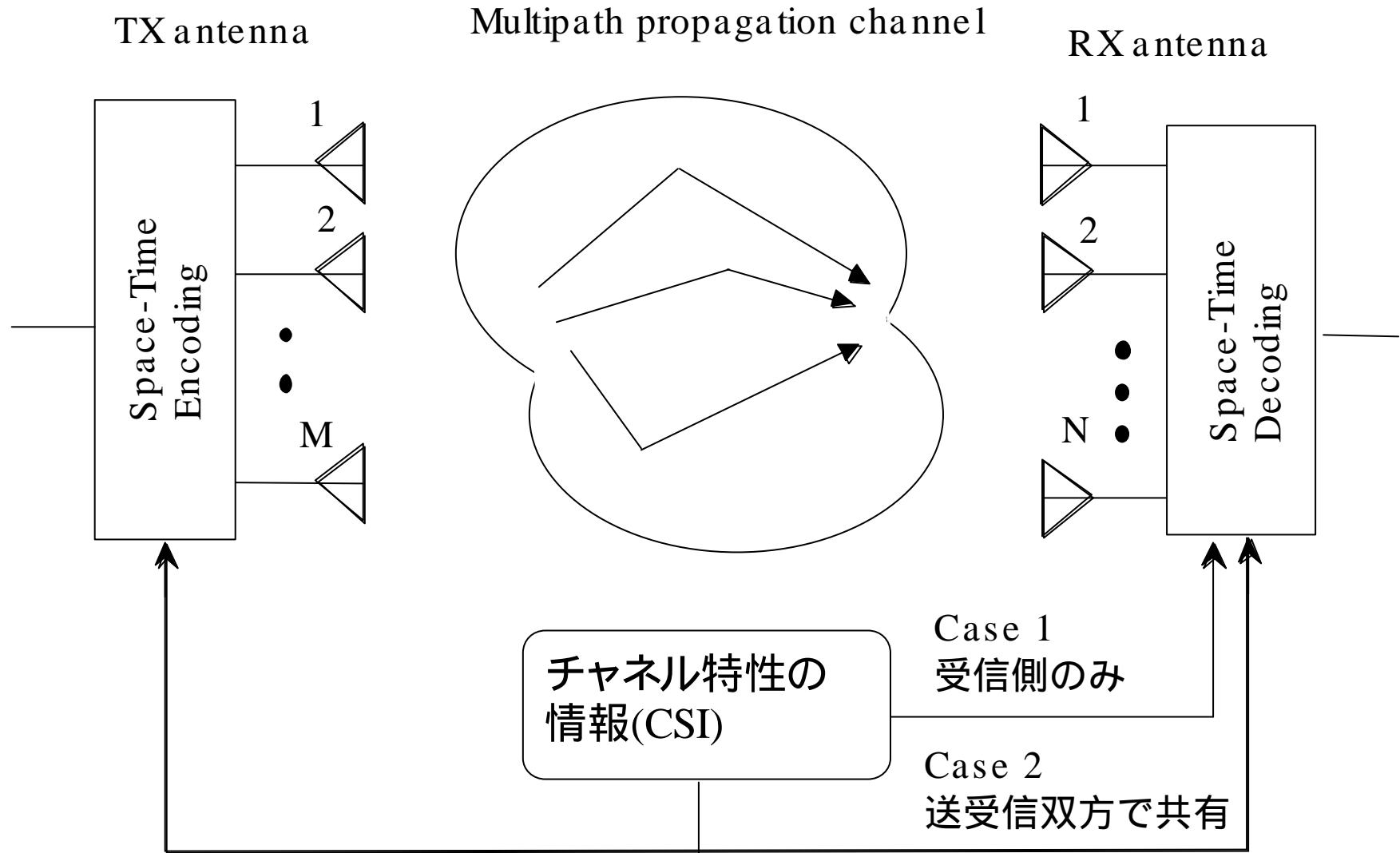
例

[2x2では裏街道が細い]

[Nが大きくなる程、
相対的に裏街道が太
くなる]

情報伝送の方法

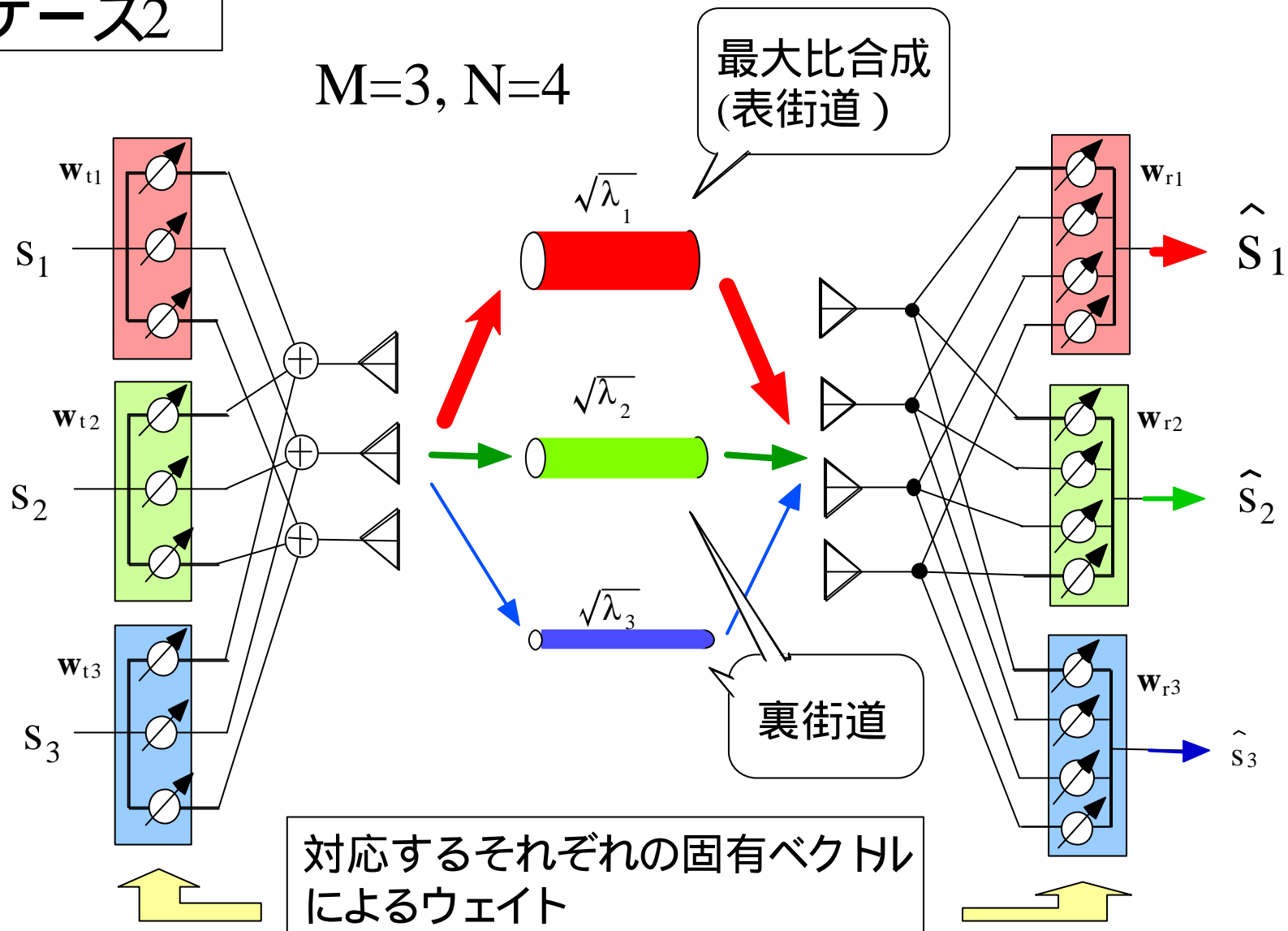
情報の送り方：2つのケース



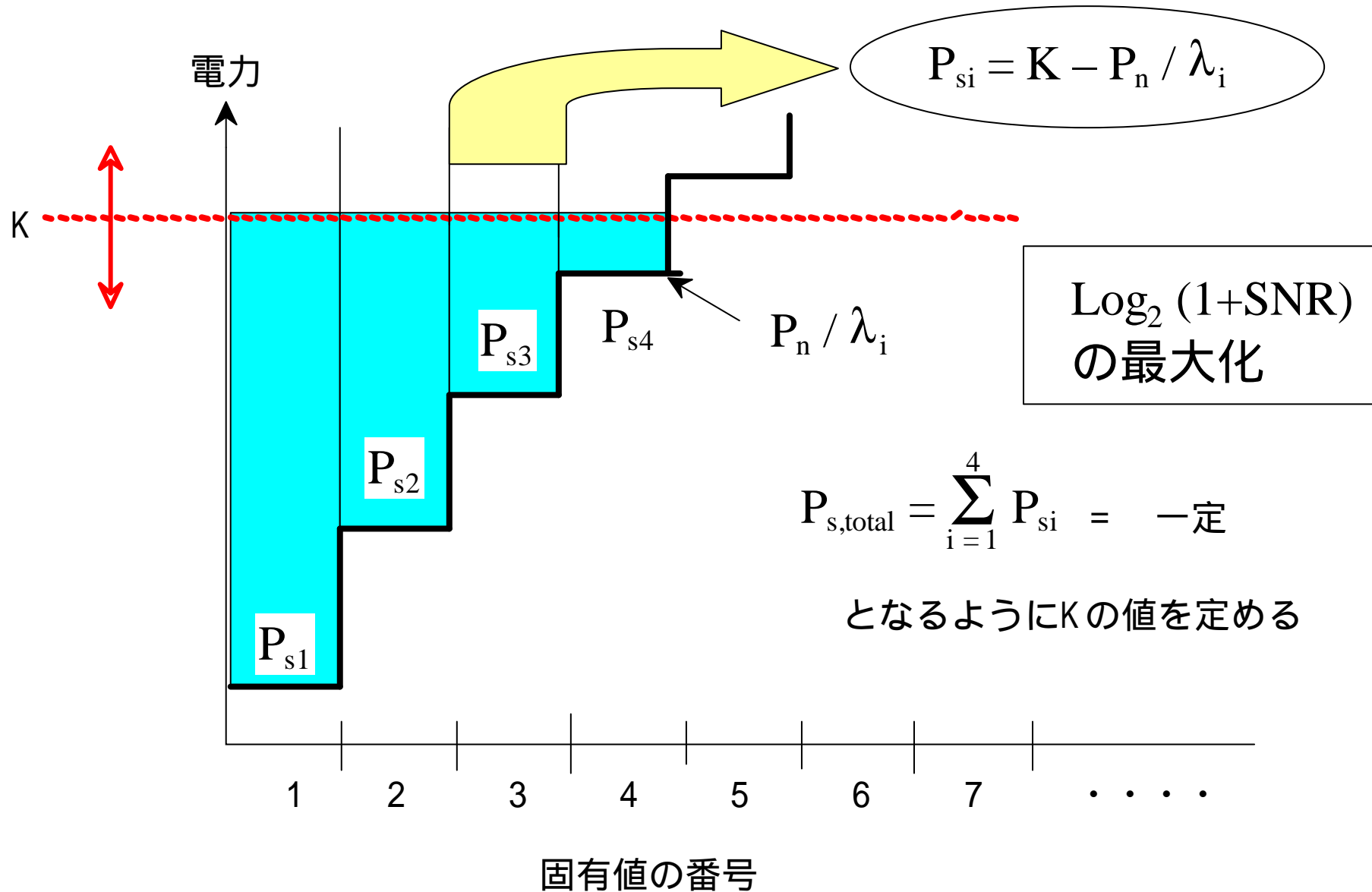
SVDを利用した信号の並列伝送 :固有モード伝送

ケース2

$M=3, N=4$

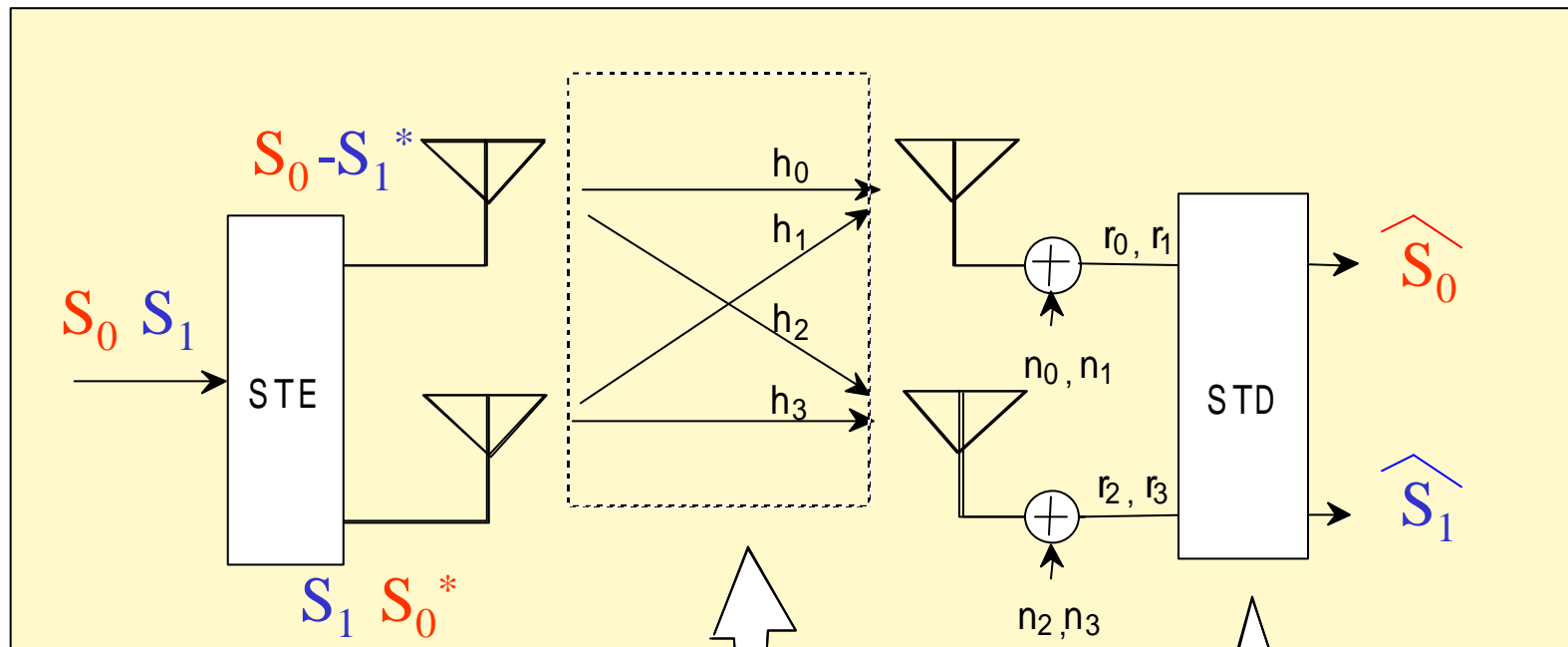


MIMO: Water fillingルールに基づく電力配分



MIMO(ケース1):時空間符号化の例 (Alamoutiの方法)

送信側で伝送路の状態を知らない状況において
1x4のSIMOと同等の最大比合成が実現できる



M=2はフルレート
フルダイバーシチを
実現できる唯一の方法

送信側は伝送路の
特性を知らない

$$\hat{S}_0 = h_0^* r_0 + h_1^* r_1 + h_2^* r_2 + h_3^* r_3$$

$$\hat{S}_1 = h_1^* r_0 - h_0^* r_1 + h_3^* r_2 - h_2^* r_3$$

チャンネル容量

チャンネル容量

Shannonの情報理論に基づく伝送ビットの上界

基本: SISO

$$C = \log_2(1 + \gamma) \text{ [bit/s/Hz]} \quad \gamma \equiv \text{SNR}$$

MIMO: Case 1 (送信側にCSI無し)

瞬時

$$C_{\text{case 1}} = \log_2 \left| \mathbf{I} + \frac{\gamma_0}{M} \mathbf{A} \mathbf{A}^H \right| = \sum_{i=1}^{M_0} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i \gamma_0}{M} \right)$$

平均

$$\langle C_{\text{case 1}} \rangle \leq \sum_{i=1}^{M_0} \log_2 \left(1 + \frac{\langle \lambda_i \rangle \gamma_0}{M} \right)$$

MIMO: Case 2 (送受信でCSI共有)

固有モード伝送/ WF電力分配

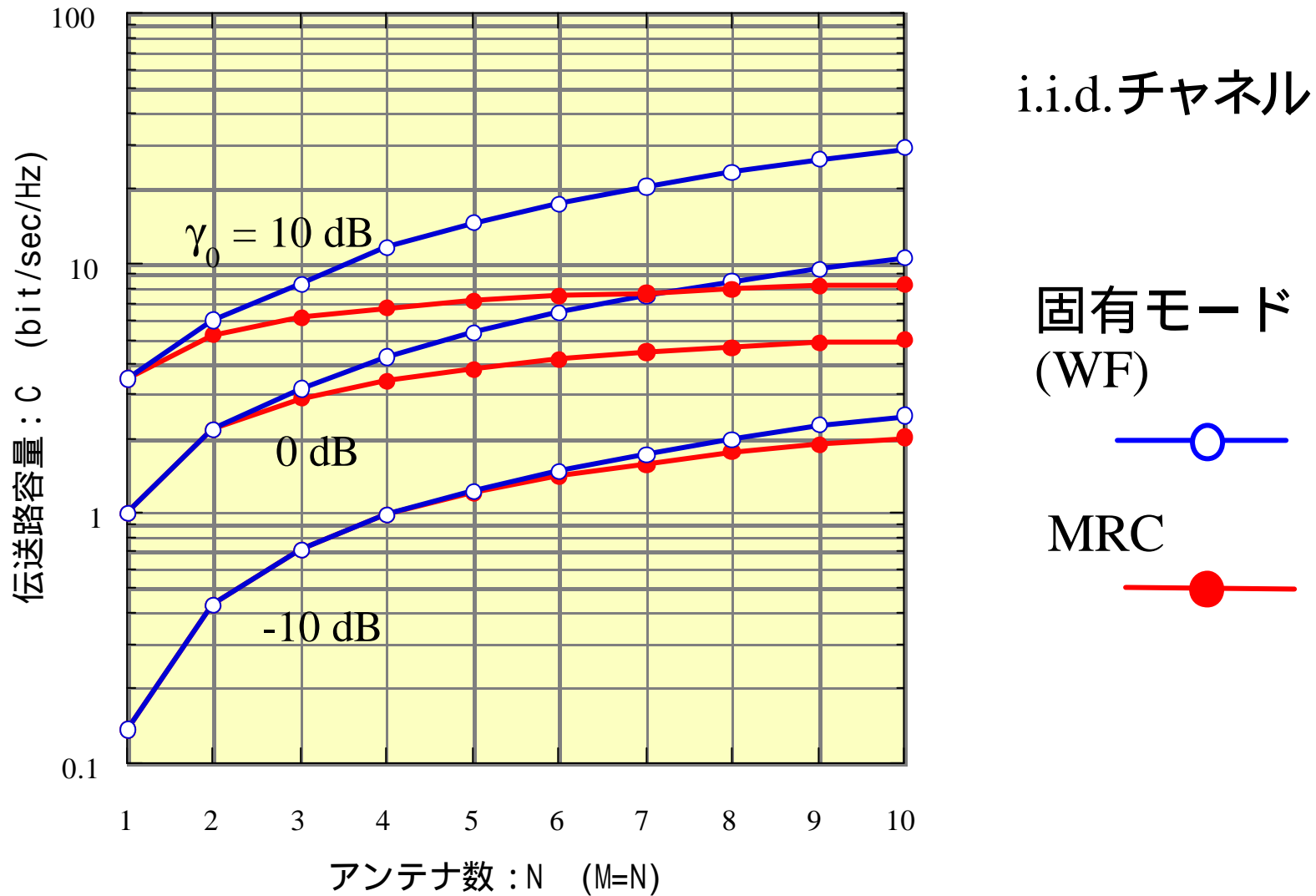
$$C_{WF} = \sum_{i=1}^{M_0} \log_2(1 + \lambda_i \gamma_i) \quad \sum_{i=1}^{M_0} \gamma_i = \gamma_0 \quad (\text{WF配分})$$

最大比合成伝送

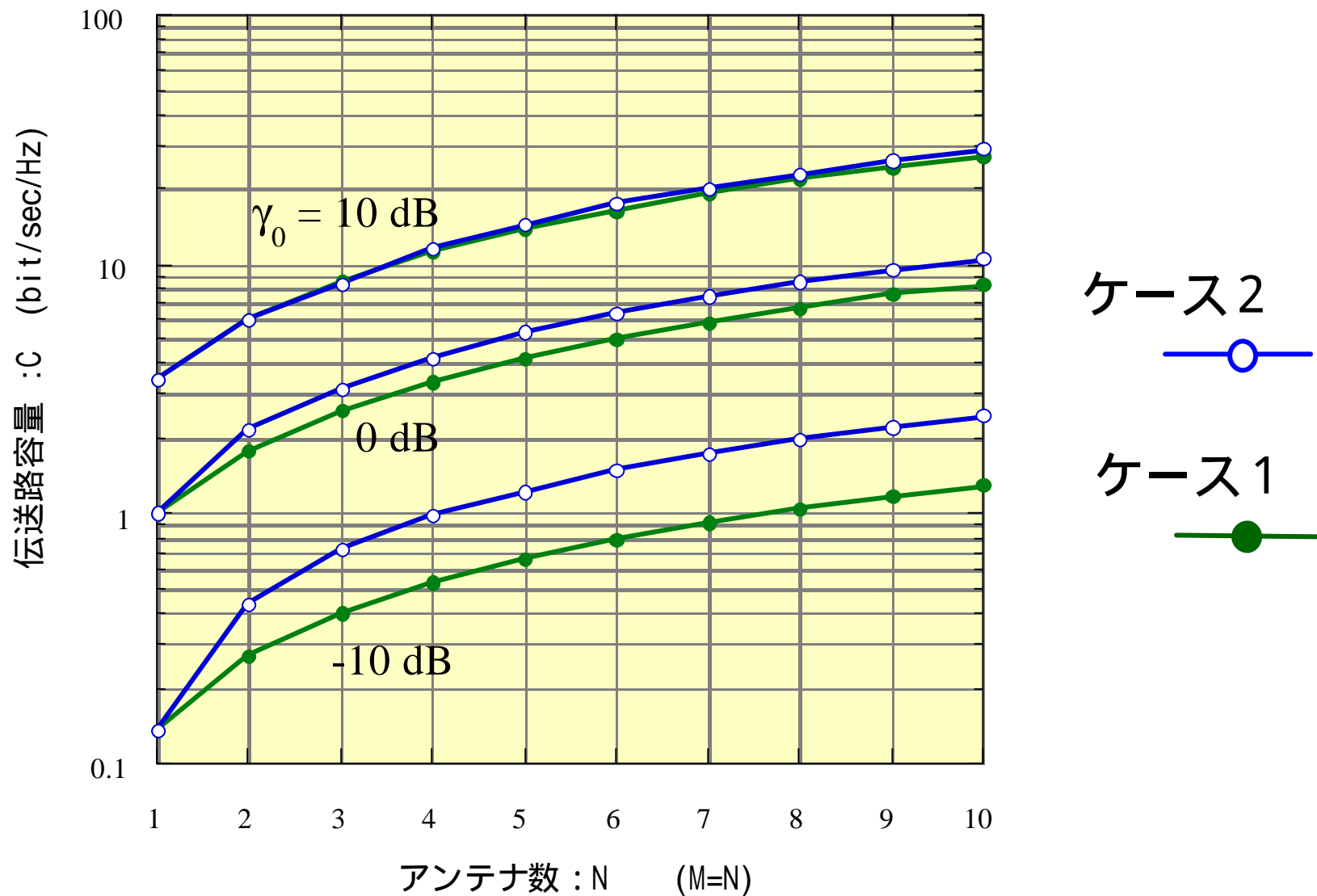
$$C_{MRC} = \log_2(1 + \lambda_1 \gamma_0)$$

[平均容量の上限 :同様に固有値の平均値を用いて計算]

チャンネル容量比較 (ケース2 : WF vs MRC)



チャンネル容量比較 : ケース1 vs ケース2(WF)

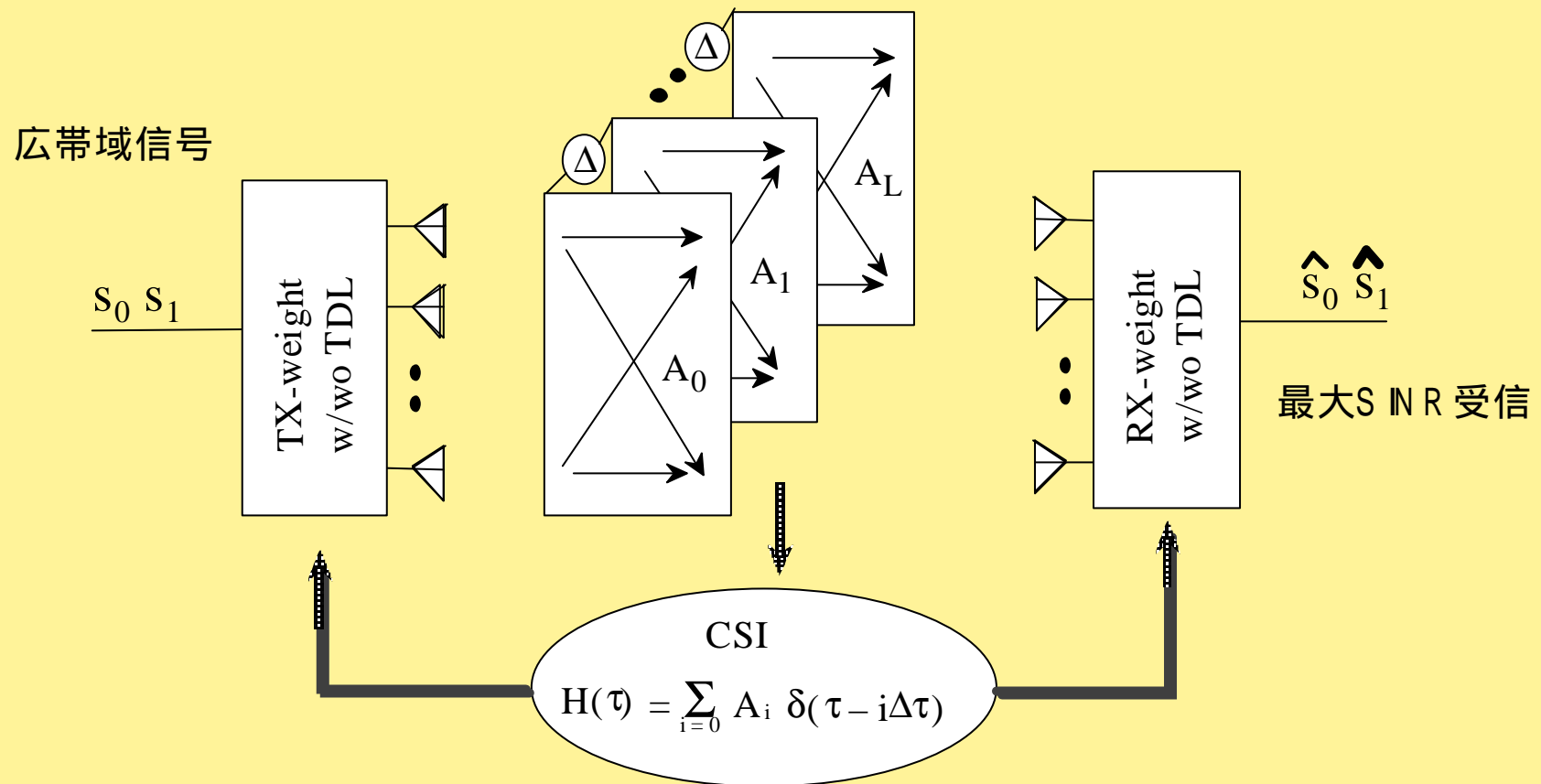


研究課題

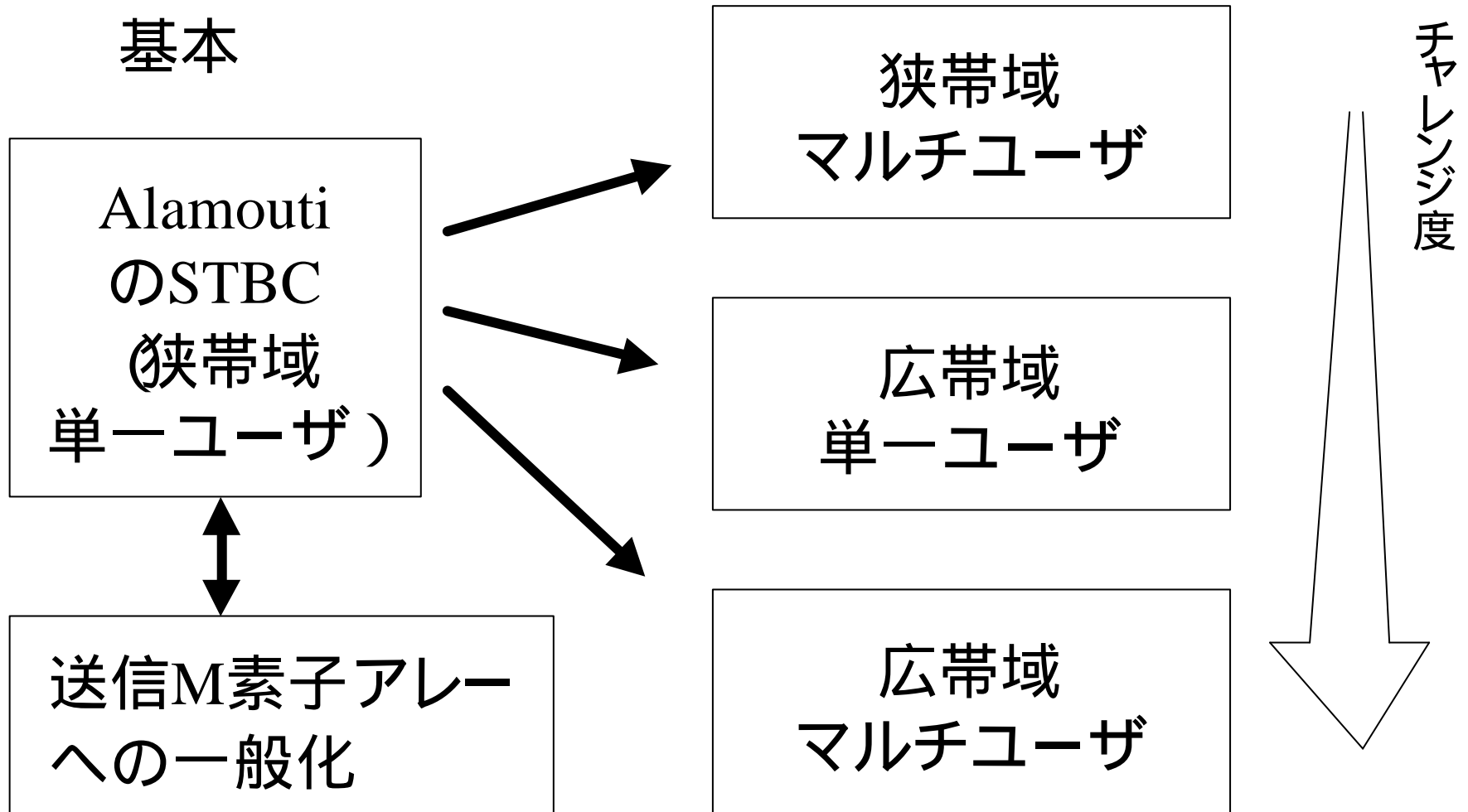
(研究が現在進行形のもの)

研究課題 : 広帯域信号のビームフォーミング伝送

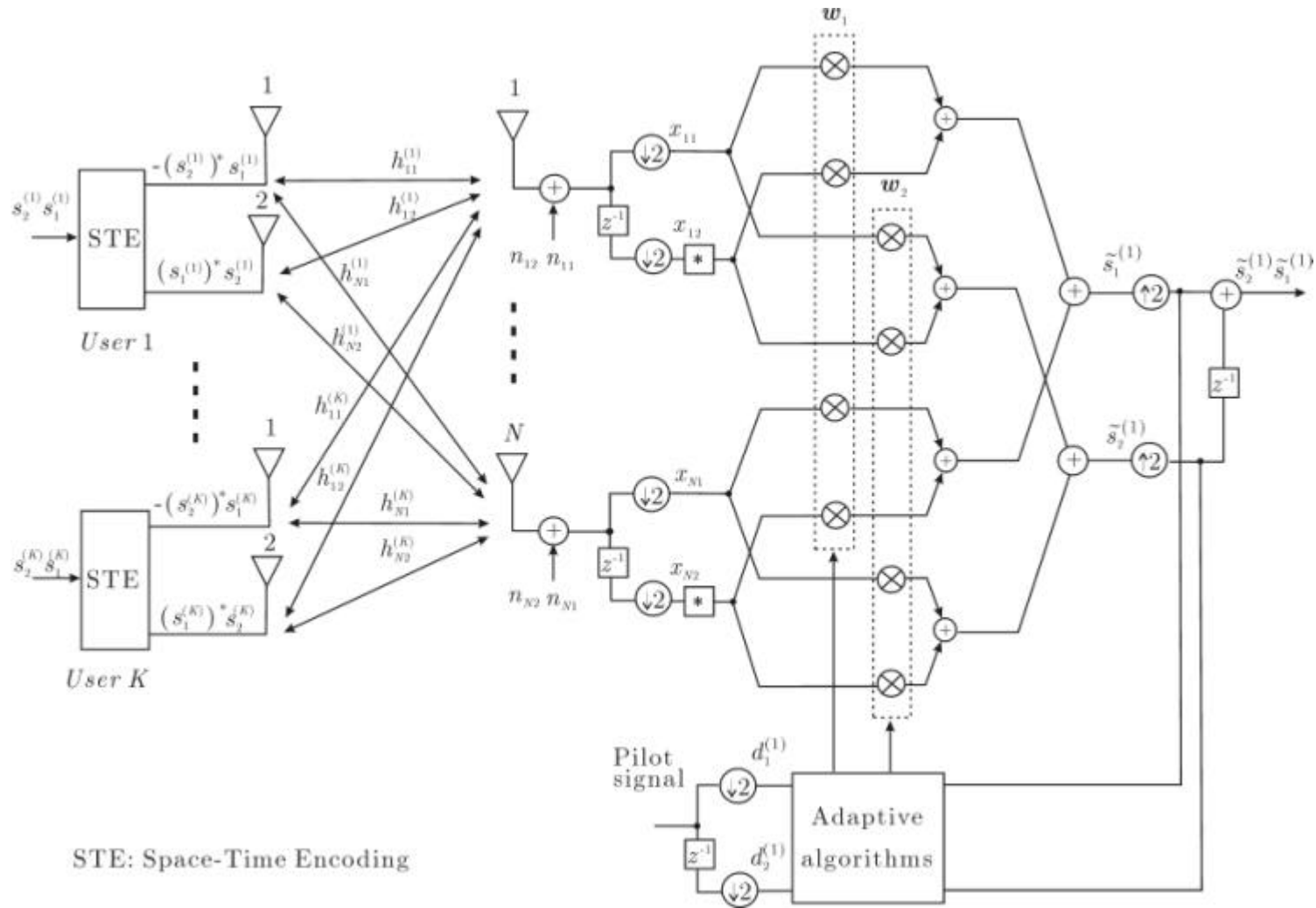
Frequency-Selective Multipath Fading Environment



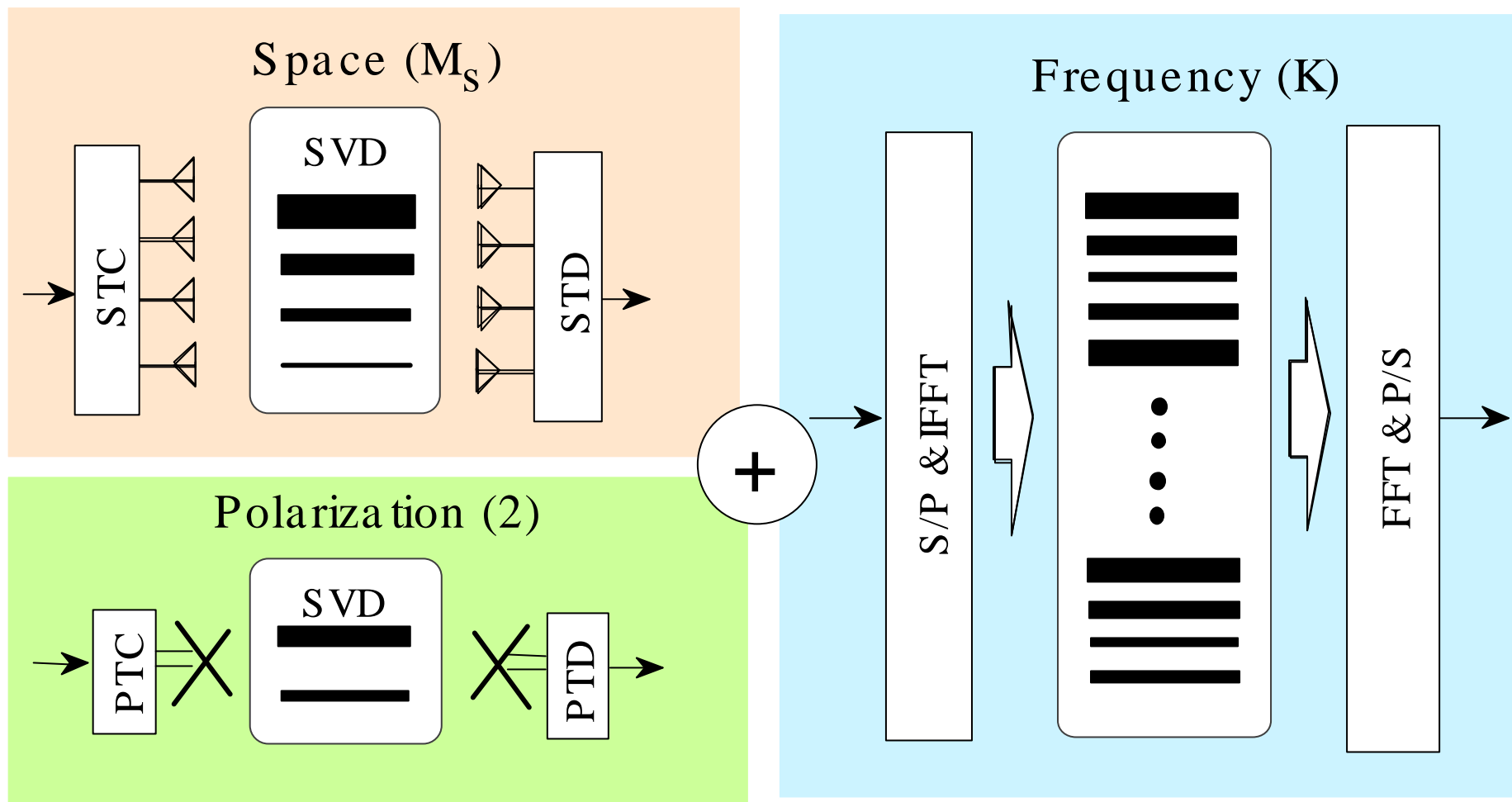
MIMO時空間符号化伝送の研究方向



Adaptive Beamforming for Multiuser STBC



多次元融合符号化変調のイメージ



上記3領域を融合すると $2KM_s$ 個の固有パスができる
これを有効に利用する

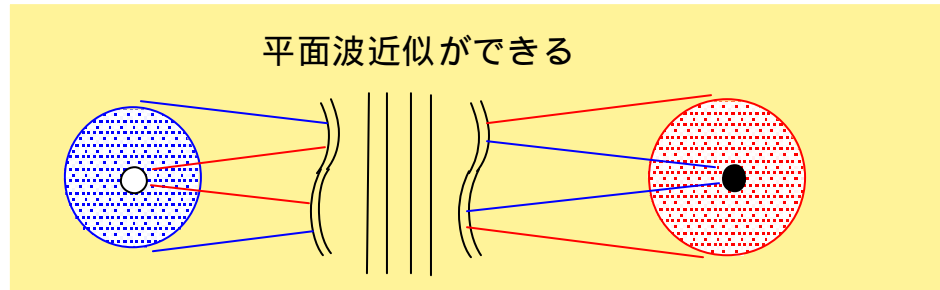
電波伝搬上の問題点

固有パスがひとつだけになってしまうケース

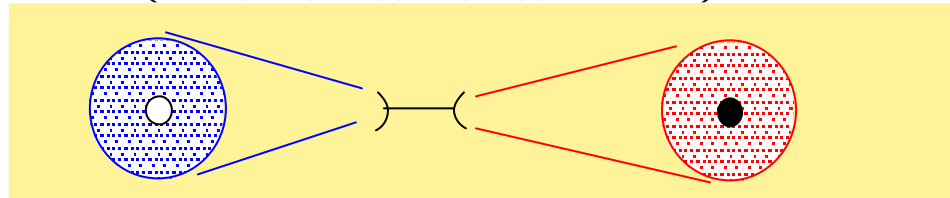
$$A \approx \sqrt{\lambda} \mathbf{e}_{r,1} \mathbf{e}_{t,1}^H$$

最大比合成効果は有り

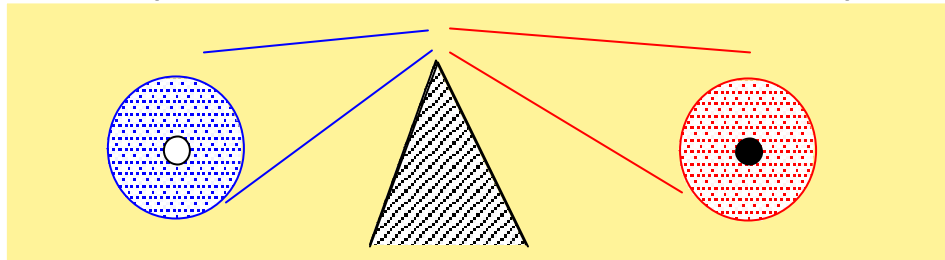
固有モード伝送 (並列伝送) ができない



(a) Model 3(a) :
双方から散乱エリアを見込む角度が小さい
(送受信点間距離が十分離れている)



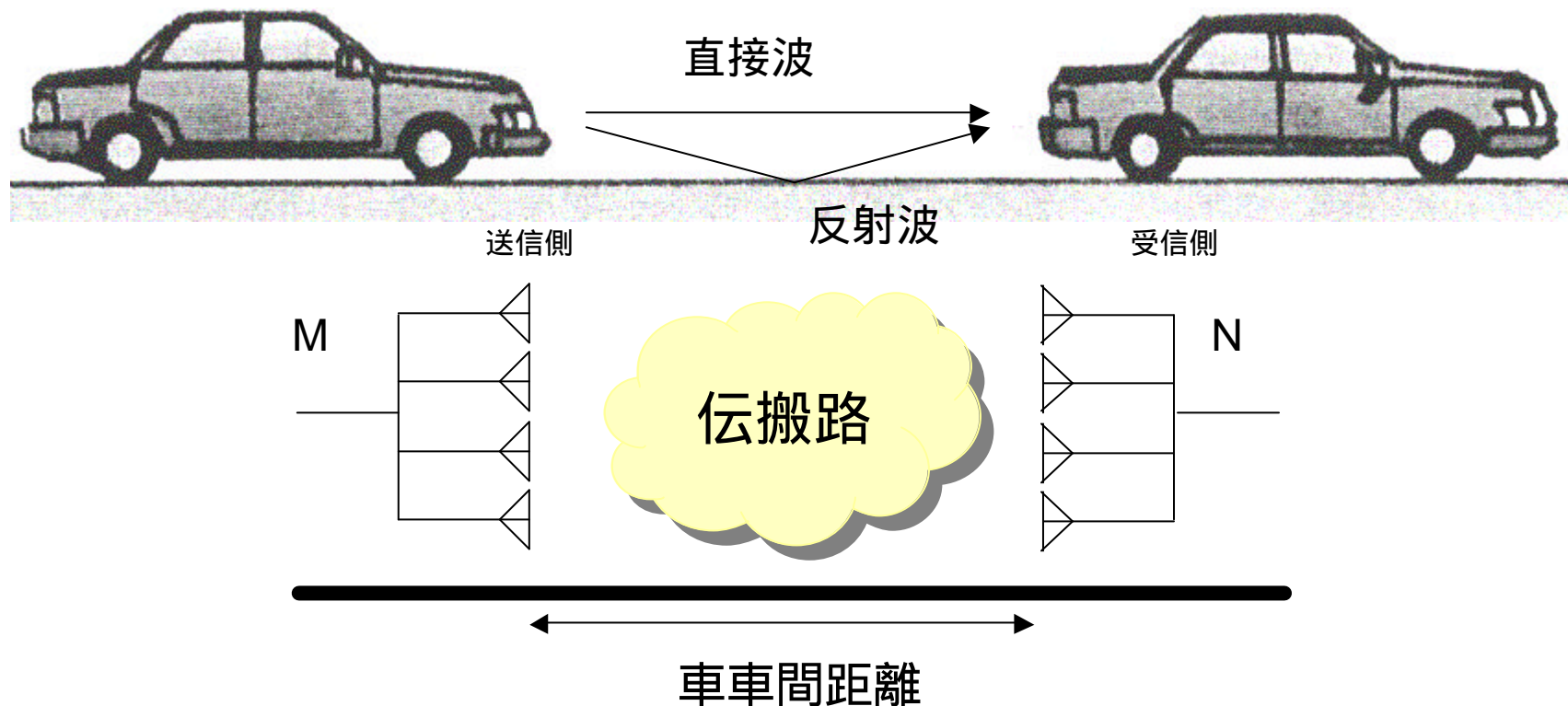
(b) Model 3(b) : 単一アンテナによる中継
(中継部分がキーホール、トンネル等も類似)



(c) Model 3(c) :
ビル影などで単一回折波が支配的になる伝搬環境

MIMO-MRC伝送における制御不安定問題

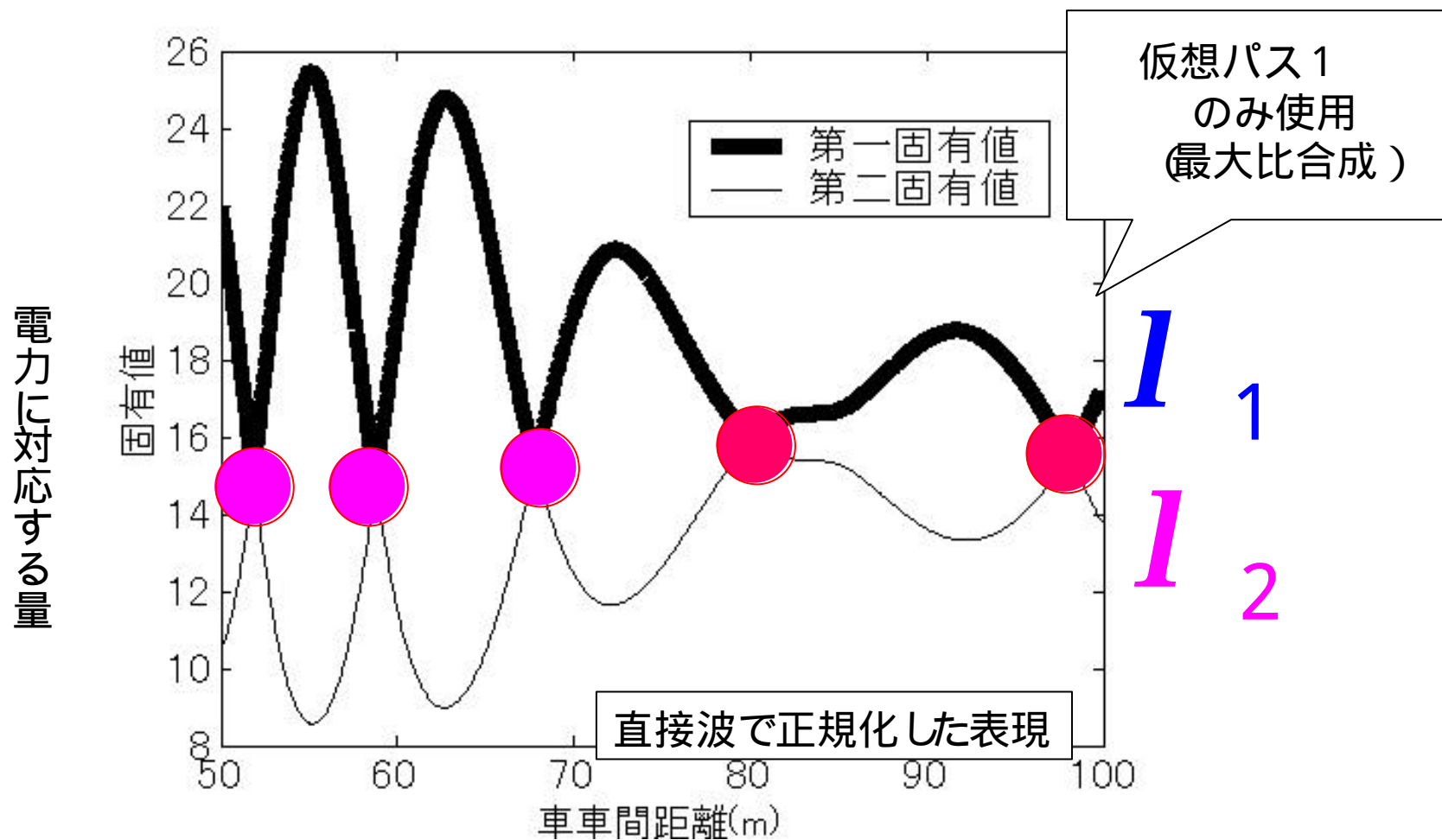
— ITS車車間通信の例 —



無線局の双方が、例えばTDD方式により、CSIを独立に
入手できるシステムにおけるビームフォーミング伝送
(送受信ウェイト制御型MRCダイバーシチ)

竹本他
2003
信学ソ大

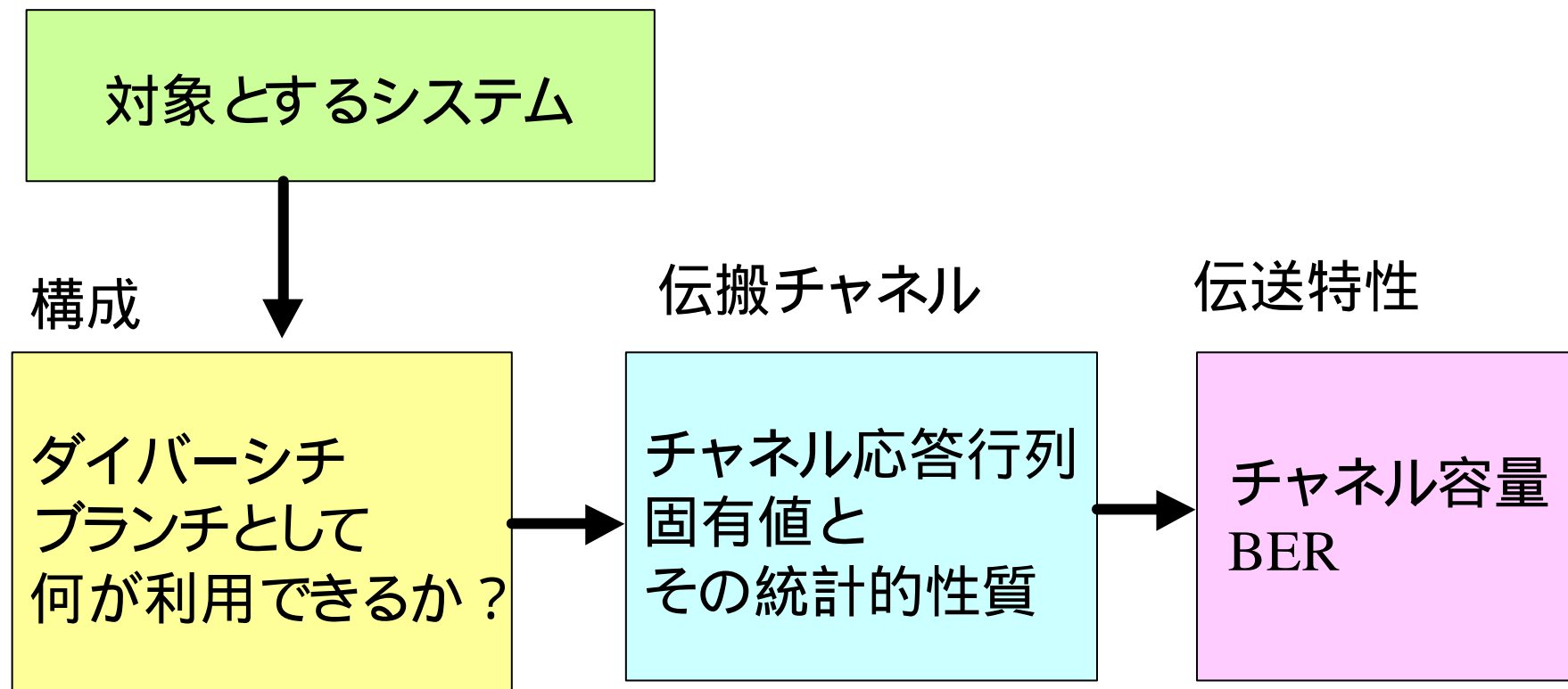
車車間伝搬路の固有値の距離に対する変化



印のところでビームフォーミング制御が不安定になる
レベル低下が生じる危険がある

まとめ

まとめ (1) :MIMOシステム設計のプロセスとポイント



ポイント:MIMOは高度なダイバーシチシステム
ブランチの決定 (構成)
固有値の性質把握 (伝搬)

まとめ (2) :MIMOの特長と研究課題

MIMOの特長

SNRを増加するだけではチャネル容量は対数的にしか増加しない (表街道利用の限界)

MIMO (アレー対向)により、仮想並列伝送路を構成し、チャネル容量をほぼアンテナ対向数に比例して増加させることができる (裏街道も利用することの効果)

研究課題

伝搬チャネルモデリング (MIMOの効果は伝搬で決まる)
多次元領域符号化伝送 (空間・時間・偏波・周波数・
変調多値数・・・)
(広帯域)マルチユーザシステム応用