

# MIMO-TDD システムにおける 同一チャネル干渉を補償する プリコーディング方式

宇美敦郎, 府川和彦, 須山 聡, 鈴木 博

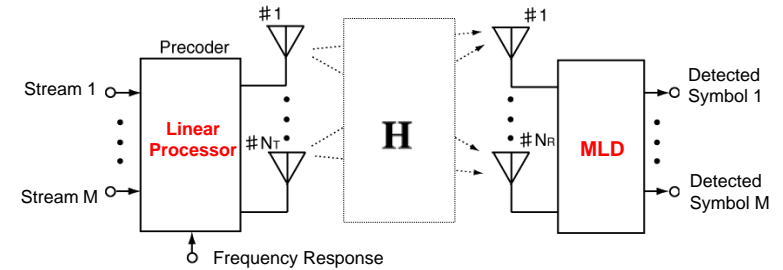
東京工業大学

浅井孝浩, 時 慧

NTT ドコモ

## 研究背景

MIMO-OFDM ... 高速・大容量無線通信を実現



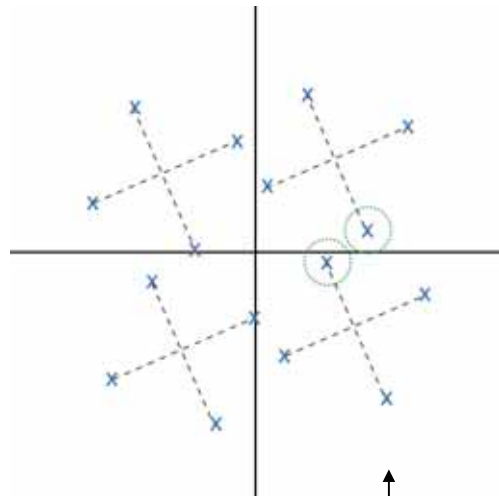
送信側に線形処理を施す送信プリコーディング技術

BER を最小化する最適伝送ができる

- ・線形受信を想定 : 最尤検出を行う際に BER を最小化できない
- ・非線形受信を想定 : 最尤検出を前提として BER を最小化できる (雑音のみを考慮)

問題点 : 干渉波が存在するときは BER を最小化できない

## 従来のプリコーディングの動作



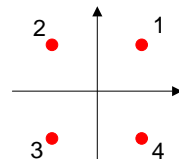
プリコーダの使用

BER 最小化伝送を実現  
(雑音のみを考慮)

雑音を考慮して受信レプリカ信号間の  
ユークリッド距離を広げることが可能

QPSK  
送信ストリーム数 M = 2

受信レプリカ信号  
(ストリーム1, ストリーム2)



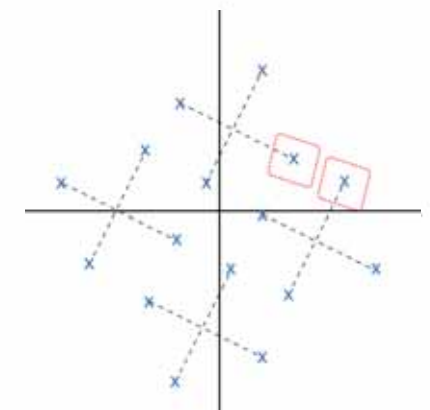
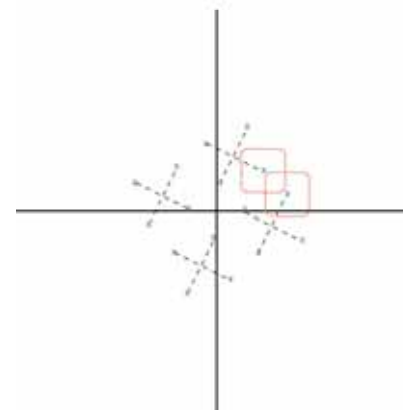
## 提案方式のプリコーディングの動作

干渉を考慮した最尤検出と  
プリコーダを使用

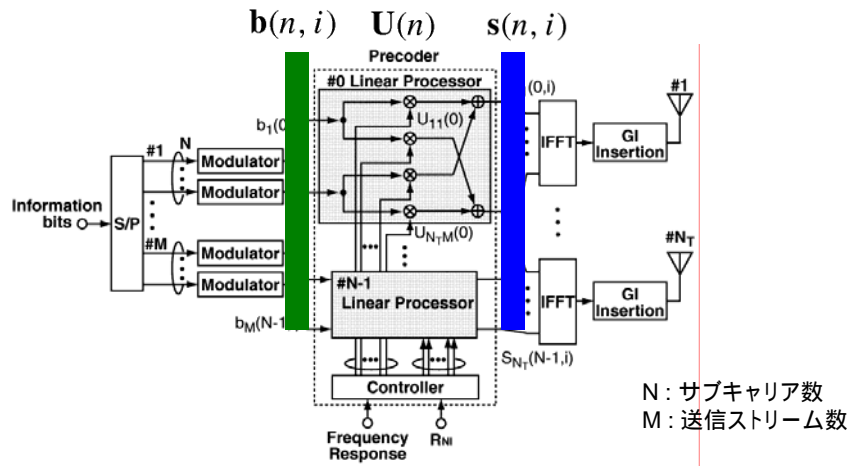
BER 最小化伝送を実現  
(干渉も考慮)

受信アンテナ 1  
干渉波の影響が大きいとき

受信アンテナ 2  
干渉波の影響が小さいとき



# MIMO-OFDM 送信機構成



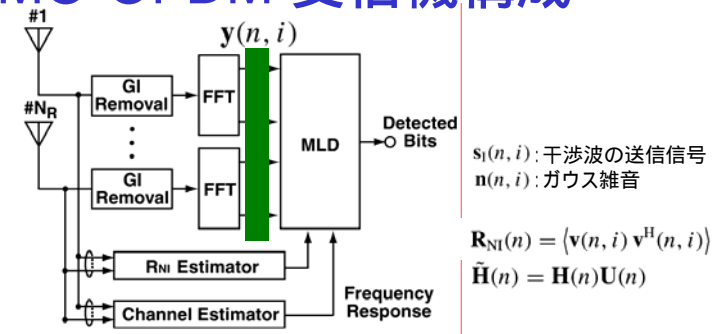
$$\mathbf{s}(n, i) = \mathbf{U}(n) \mathbf{b}(n, i)$$

第 n サブキャリア, 第 i シンボルにおける  $N_T$  次元の送信信号ベクトル

$\mathbf{b}(n, i)$ : M 次元の変調信号ベクトル  
 $\mathbf{U}(n)$ :  $N_T \times M$  のプリコーダの重み行列

N: サブキャリア数  
 M: 送信ストリーム数

# MIMO-OFDM 受信機構成



$\mathbf{s}_1(n, i)$ : 干渉波の送信信号  
 $\mathbf{n}(n, i)$ : ガウス雑音

$$\mathbf{R}_{Nl}(n) = \langle \mathbf{v}(n, i) \mathbf{v}^H(n, i) \rangle$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(n) = \mathbf{H}(n) \mathbf{U}(n)$$

第 n サブキャリア, 第 i シンボルにおける  $N_R$  次元の受信信号ベクトル

$$\mathbf{y}(n, i) = \mathbf{H}(n) \mathbf{U}(n) \mathbf{b}(n, i) + \mathbf{H}_1(n) \mathbf{s}_1(n, i) + \mathbf{n}(n, i)$$

$$= \tilde{\mathbf{H}}(n) \mathbf{b}(n, i) + \mathbf{v}(n, i)$$

干渉波のチャンネル応答行列

尤度関数:

$$P[\mathbf{y}(n, i) | \tilde{\mathbf{H}}(n), \mathbf{b}(n, i)] = \frac{1}{\pi^{N_R} \det \mathbf{R}_{Nl}(n)} \times \exp \left[ -(\mathbf{y}(n, i) - \tilde{\mathbf{H}}(n) \mathbf{b}(n, i))^H \mathbf{R}_{Nl}^{-1}(n) (\mathbf{y}(n, i) - \tilde{\mathbf{H}}(n) \mathbf{b}(n, i)) \right]$$

白色化フィルタリング

# 最小ビット誤り率規範

ビット誤り率:  $P_e$

$$P_e \leq \sum_{\mathbf{b}(i)} P[\mathbf{b}(i)] \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} \frac{N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)]}{N_b} P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}]$$

$J(\mathbf{U})$  (評価関数)

$N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)]$ :  $\mathbf{b}(i)$  を  $\mathbf{c}(i)$  と誤るときの誤りビット数

$N_b$ : 総送信ビット数

$P[\mathbf{b}(i)]$ : 送信確率 (等確率とする)

$P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}]$ : ペアーワイズ誤り確率

最急降下法:

$$\mathbf{U}(p) = \mathbf{U}(p-1) - \mu \frac{\partial J(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}^*} \Big|_{\mathbf{U}(p-1)}$$

$\mathbf{U}$ : プリコーダの重み行列  
 $\mu$ : ステップサイズ  
 $p$ : 繰り返し回数

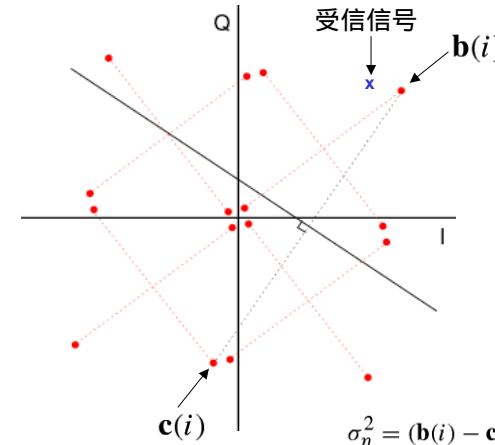
送信電力の拘束条件: 全サブキャリアにおける平均送信電力一定

$$\sum_{n=1}^N \text{tr}(\mathbf{U}(n) \mathbf{U}(n)^H) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{m=1}^M |U_{km}(n)|^2 = 1$$

# ペアーワイズ誤り

ペアーワイズ誤り確率:  $P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}]$

最尤検出の際に実際の送信信号  $\mathbf{b}(i)$  の尤度が  $\mathbf{c}(i)$  の尤度より小さくなる確率



$$\left| \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b}(i) \right]^H \mathbf{R}_{Nl}^{-1} \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b}(i) \right] \right| > \left| \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{c}(i) \right]^H \mathbf{R}_{Nl}^{-1} \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{c}(i) \right] \right|$$

$$P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}] = \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}}$$

Chernoff バウンド

$$P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}] \leq \exp \left( -\frac{\sigma_{\eta}^2}{4} \right)$$

$$\sigma_{\eta}^2 = (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{Nl}^{-1} \langle \mathbf{n}(i) \mathbf{n}^H(i) \rangle \mathbf{R}_{Nl}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))$$

# H と H<sub>I</sub> の推定

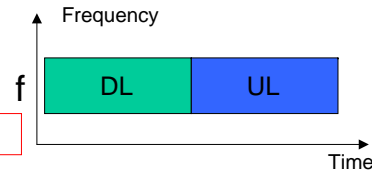
TDD・・・ Time Division Duplex

UL : Uplink  
DL : Downlink

伝送路が等しい : 相反性

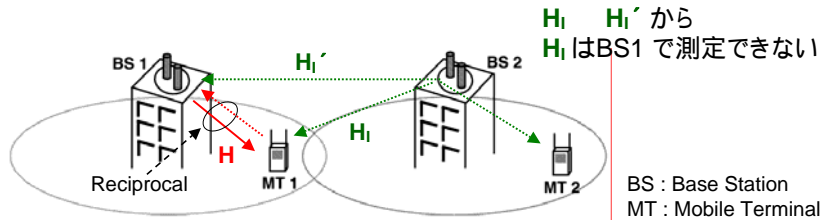
$$\mathbf{H}_{UL} = \mathbf{H}_{DL}$$

送信側でチャネル情報を推定できる



MIMO-TDDのマルチセル環境

H, H<sub>I</sub>, H<sub>I</sub>' : それぞれ相反性が成立



MTで干渉波の測定をしてBSに情報伝達

# 受信機における干渉の測定法

干渉と雑音成分の受信信号:

$$\mathbf{v}(n, i) = \mathbf{H}_I(n) \mathbf{s}_I(n, i) + \mathbf{n}(n, i)$$

$P_I$  : 干渉波の電力  
 $\sigma_n^2$  : 雑音電力  
 $\mathbf{I}$  : 単位行列

干渉と雑音成分の相関行列:

$$\mathbf{R}_{NI}(n) = \langle (\mathbf{H}_I(n) \mathbf{s}_I(n, i) + \mathbf{n}(n, i)) (\mathbf{H}_I(n) \mathbf{s}_I(n, i) + \mathbf{n}(n, i))^H \rangle$$

$$= \mathbf{H}_I(n) \mathbf{H}_I^H(n) P_I + \sigma_n^2 \mathbf{I}$$

(干渉波と雑音が無相関と仮定)

干渉と雑音成分の相関行列の測定方法:

1. 干渉と雑音の時間平均に基づく  $\mathbf{R}_{NI}$ :

$$\hat{\mathbf{R}}_{NI}(n) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} \mathbf{v}(n, i) \mathbf{v}^H(n, i)$$

(TDDで希望波を受信していないスロット)  
 $N_s$  : 測定したシンボル数

2. 干渉波のチャネル推定に基づく  $\mathbf{R}_{NI}$ :

受信機で干渉局のパイロット信号は既知として  $\hat{\mathbf{H}}_I(n)$  の推定を行う

$$\hat{\mathbf{R}}_{NI}(n) = \hat{\mathbf{H}}_I(n) \hat{\mathbf{H}}_I^H(n) P_I + \sigma_n^2 \mathbf{I}$$

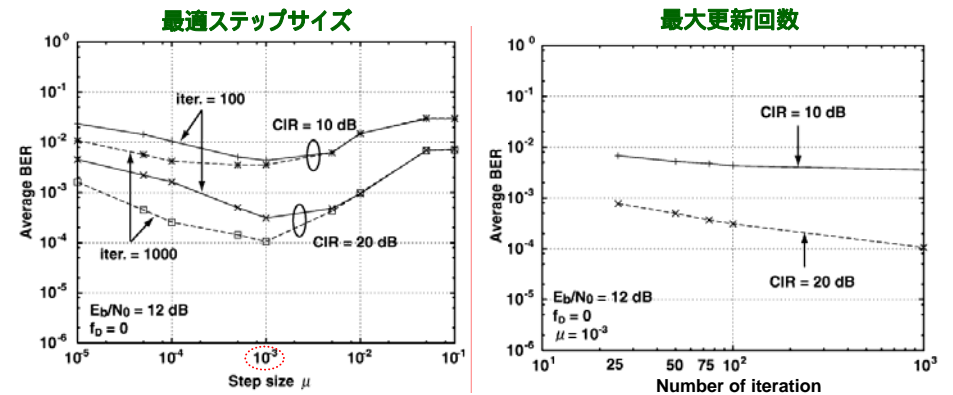
# 計算機シミュレーション条件

送信ストリーム数 $M$	2
送信アンテナ数 $N_T$	2
受信アンテナ数 $N_R$	2
干渉局数	1
干渉局の送信アンテナ数 $N_I$	2
パケット長	14 (パイロット: 4, データ: 10)
変調方式	QPSK
FFT ポイント数	64
有効サブキャリア数	52 (パイロット: 4, データ: 48)
伝送レート	24 Mbit/s
シンボル間隔	4.0 $\mu$ s
ガードインターバル長	0.8 $\mu$ s
最急降下法の最大更新回数	100, 1000
伝搬モデル	17 パス指数減衰モデル
最大ドップラー周波数 $f_D$	0 Hz

$\mathbf{R}_{NI}(n)$  : 送信側への情報伝達は理想的

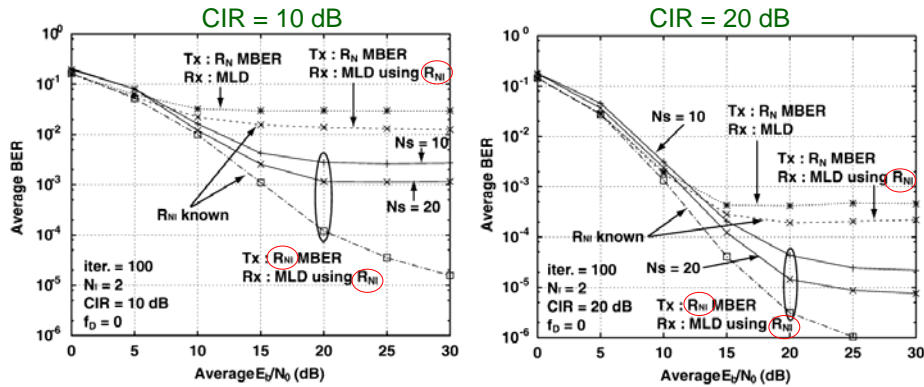
# 最適ステップサイズ

最急降下法のステップサイズと最大更新回数に対する平均 BER 特性 ( $\mathbf{R}_{NI}$  は既知とする)



最適ステップサイズ  $\mu = 10^{-3}$   
最大更新回数 100 回として行う

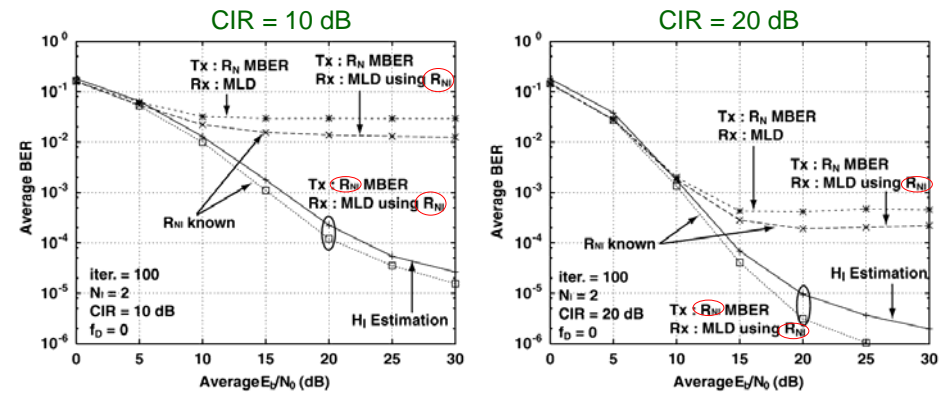
# 時間平均 $R_{NI}$ による平均 BER 特性



$R_{NI}$  MBER : 提案手法のプリコード設計  
 MLD using  $R_{NI}$  : 受信機で  $R_{NI}$  を用いた MLD  
 $R_N$  MBER : 雑音のみを考慮した最適伝送方式  
 MLD : 雑音のみを考慮した MLD

実線 : 希望波チャンネルはパイロット信号 4 シンボルで RLS アルゴリズムを用いて推定  
 点線 : 希望波チャンネルは送受信機で既知

# チャンネル推定 $R_{NI}$ による平均 BER 特性



$H_1$  Estimation : チャンネル推定  $R_{NI}$  による提案手法

干渉波チャンネルはパイロット信号 4 シンボルで RLS アルゴリズムを用いて推定

実線 : 希望波チャンネルはパイロット信号 4 シンボルで RLS アルゴリズムを用いて推定  
 点線 : 希望波チャンネルは送受信機で既知

## まとめ

### • 最尤検出を前提とした同一チャンネル干渉を補償する最小ビット誤り率規範の MIMO-OFDM プリコーディング

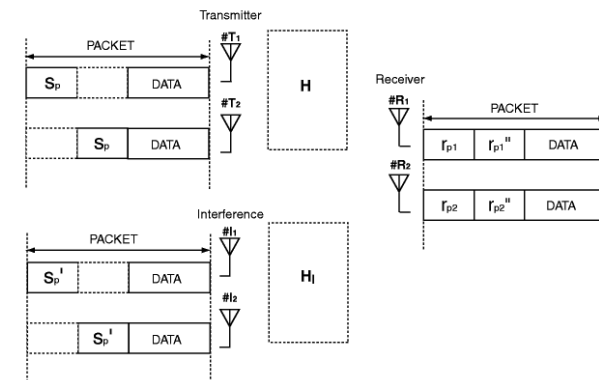
- 干渉情報を移動局で推定
- 推定した干渉情報を基地局に情報伝達
- Chernoff バウンドを用いた最小誤り率を規範とする
- 最急降下法を用いてプリコーディングの重み行列を決定

### • 計算機シミュレーション

送信ストリーム数 2, 送信アンテナ数 2, 受信アンテナ数 2, 干渉局数 1, 干渉アンテナ数 2, CIR = 10 dB における平均 BER 特性

- 干渉と雑音の相関行列が既知の特性は, フロアーが約  $10^{-5}$  まで改善 (従来は約  $10^{-2}$  でフロアーをひく)
- 干渉と雑音の相関行列を測定する場合, 既知とほぼ同じ特性

## チャンネル推定のモデル



$$r_p(n, i) = \mathbf{H}(n)s_p(n, i) + \mathbf{H}_1(n)s_p'(n, i) + \mathbf{n}(n, i)$$

$$\begin{aligned}
 r_{p1} &\rightarrow (\hat{\mathbf{H}})_{11}, (\hat{\mathbf{H}}_1)_{11} \\
 r_{p2} &\rightarrow (\hat{\mathbf{H}})_{12}, (\hat{\mathbf{H}}_1)_{12} \\
 r_{p1}'' &\rightarrow (\hat{\mathbf{H}})_{21}, (\hat{\mathbf{H}}_1)_{21} \\
 r_{p2}'' &\rightarrow (\hat{\mathbf{H}})_{22}, (\hat{\mathbf{H}}_1)_{22}
 \end{aligned}$$

$\hat{\mathbf{H}}(n), \hat{\mathbf{H}}_1(n)$  が推定できる

# 最急降下法

$$\mathbf{U}(p) = \mathbf{U}(p-1) - \mu \frac{\partial J(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}^*} \Big|_{\mathbf{U}(p-1)}$$

$$\frac{\partial J_{\mathbf{c}}(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}^*} = -\frac{\mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U}}{4} \Big|_{\sum_{\mathbf{b}(i)} \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)] \exp\left(-\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}\right) \mathbf{A}}$$

17

$$P_e \leq \sum_{\mathbf{b}(i)} P[\mathbf{b}(i)] \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} \frac{N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)]}{N_b} P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}] \\ \leq \frac{P[\mathbf{b}(i)]}{2N_b} \sum_{\mathbf{b}(i)} \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)] \exp\left(-\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}\right) \\ J(\mathbf{U}) \quad (\text{評価関数})$$

$$J_{\mathbf{c}}(\mathbf{U}) = \sum_{\mathbf{b}(i)} \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)] \exp\left(-\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}\right)$$



$$\frac{\partial J_{\mathbf{c}}(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}^*} = -\frac{1}{4} \sum_{\mathbf{b}(i)} \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)] \exp\left(-\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}\right) \frac{\partial \sigma_{\eta}^2}{\partial \mathbf{U}^*}$$

18

$$\sigma_{\eta}^2 = (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \mathbf{U}^H \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U} (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) \\ = \text{tr} \left[ (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \mathbf{U}^H \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U} \right] \\ = \text{tr} \left[ \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U} \mathbf{A} \mathbf{U}^H \right]$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H$$

$$\sigma_{\eta}^2 = \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{k'=1}^{N_T} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M (\mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H})_{kk'}(\mathbf{U})_{k'm'}(\mathbf{A})_{mm'} \mathbf{U}_{km}^* \mathbf{U}_{k'm}$$



$$\frac{\partial \sigma_{\eta}^2}{\partial U_{km}^*} = \sum_{k'=1}^{N_T} \sum_{m'=1}^M (\mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H})_{kk'}(\mathbf{U})_{k'm'}(\mathbf{A})_{m'm}$$

$$\frac{\partial \sigma_{\eta}^2}{\partial \mathbf{U}^*} = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U} \mathbf{A}$$

$$\frac{\partial J_{\mathbf{c}}(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}^*} = -\frac{\mathbf{H}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{U}}{4} \sum_{\mathbf{b}(i)} \sum_{\mathbf{c}(i) \neq \mathbf{b}(i)} N_e[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i)] \exp\left(-\frac{\sigma_{\eta}^2}{4}\right) \mathbf{A}$$

19

# ペアワイズ誤り確率

$$\left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b}(i) \right]^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{b}(i) \right] > \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{c}(i) \right]^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \left[ \mathbf{y}(i) - \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{c}(i) \right]$$

$$\iff \mathbf{v}^H(i) \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{v}(i) > \left( \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) + \mathbf{v}(i) \right)^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \left( \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) + \mathbf{v}(i) \right)$$

$$\left( \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) + \mathbf{v}(i) \right)^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \left( \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) + \mathbf{v}(i) \right) \\ = [\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)]^H \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} [\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)] \\ + \mathbf{v}^H(i) \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} [\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)] + [\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)]^H \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{v}(i) + \mathbf{v}^H(i) \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{v}(i)$$



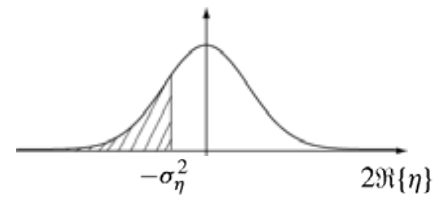
$$2\Re \left[ \frac{(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \mathbf{v}(i)}{\eta} \right] < -(\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \tilde{\mathbf{H}}^H \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))$$

20

$\eta$   $\rightarrow$  複素ガウス過程 平均: 0 分散:  $\sigma_\eta^2$

$$\begin{aligned} \sigma_\eta^2 &= (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \langle \mathbf{v}(i) \mathbf{v}^H(i) \rangle \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) \\ &= (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i))^H \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{R}_{\text{NI}}^{-1} \tilde{\mathbf{H}} (\mathbf{b}(i) - \mathbf{c}(i)) \end{aligned}$$

$2\Re(\eta)$   $\rightarrow$  正規分布 平均: 0 分散:  $4\sigma_\eta^2/2 = 2\sigma_\eta^2$



$$\begin{aligned} P[\mathbf{b}(i) \rightarrow \mathbf{c}(i) | \tilde{\mathbf{H}}] &= \frac{1}{\sqrt{4\pi\sigma_\eta^2}} \int_{-\infty}^{-\sigma_\eta^2} \exp\left(-\frac{x^2}{4\sigma_\eta^2}\right) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\pi\sigma_\eta^2}} \int_{\sigma_\eta^2/2\sigma_\eta}^{\infty} \exp(-y^2) \cdot (2\sigma_\eta) dy \quad y = -\frac{x}{2\sigma_\eta} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sigma_\eta/2}^{\infty} \exp(-y^2) dy \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\sigma_\eta^2}{4}} \end{aligned}$$