AWCC

電気通信大学

アンテナ･伝播研究会(2014.05.29)

PSAM QO-STBC アダプティブアレー - その理論的根拠 -

唐沢 好男 Tiako Juimo Walter

電気通信大学(UEC Tokyo)

先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター(AWCC)

発表の内容

1） PSAM QO-STBC アダプティブアレー

2） 受信ウェイトの理論的根拠

４×１　1ストリーム伝送

８×２　2ストリーム伝送

3） 分散アンテナシステム(DAS)への応用

MIMOにおいては、

大規模化（Massive MIMO）

分散アンテナ（基地局連携）

が志向されているが、規模が大きくなると制御も大規模になり、高速フェージング（ファーストフェージング）が、制御の物理限界を引き起こすことになる。

→ 高速フェージングに耐性を有するアレー信号処理技術が重要になる

PSAM QO-STBC アダプティブアレー

Quasi-Orthogonal Space-Time Block Coding
準直交時空間ブロック符号化

Pilot Symbol Assisted Modulation
（パイロット信号組込型変調）

STBC進化の系譜

STBC
Full rate
Full diversity
(N=2, Alamouti)

N≥3

フルダイバーシチを維持

O-STBC
Full diversity
But not full rate
(N≥3)

QO-STBC
Full-rate
But not full diversity
(N=4, Jafarkhani)

フルレートを維持

Full Diversityに近づける

QO-STBC-CR
Full-rate
Full diversity
(N=4, Yuen et al.)

CSI不要

D-STBC
(no CSI @ Rx side)
(N=2, Tarokh et al.)

QO-STBC
信号表現(1)

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{hS} + \boldsymbol{n}$$

時間

アンテナ

$$\boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* & -s_3^* & s_4 \\ s_2 & s_1^* & -s_4^* & -s_3 \\ s_3 & -s_4^* & s_1^* & -s_2 \\ s_4 & s_3^* & s_2^* & s_1 \end{pmatrix}$$

4本のアンテナから
4つのシンボル情報を
4の時間をかけて送る

$$\boldsymbol{r} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{h} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{n} = \begin{pmatrix} n_1 & n_2 & n_3 & n_4 \end{pmatrix}$$

QO-STBC
信号表現(2)

$$\boldsymbol{r}_e = \boldsymbol{H}_e \boldsymbol{s} + \boldsymbol{n}_e$$

前スライドの式を送信信号を右のベクトルで表すと、伝搬チャネルが行列表現に書き換えられる。(表現は変わっているが、表していることは、全く同じである)

$$\boldsymbol{r}_e = (r_1 \quad r_2^* \quad r_3^* \quad r_4)^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{s} = (s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4)^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2^* & -h_1^* & h_4^* & -h_3^* \\ h_3^* & h_4^* & -h_1^* & -h_2^* \\ h_4 & -h_3 & -h_2 & h_1 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{n}_e = (n_1 \quad n_2^* \quad n_3^* \quad n_4)^{\mathrm{T}}$$

受信信号処理

$$\boldsymbol{r}_e = \boldsymbol{H}_e \boldsymbol{s} + \boldsymbol{n}_e$$

$$\tilde{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{W}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{r}_e = \boldsymbol{W}^{\mathrm{H}} \left(\boldsymbol{H}_e \boldsymbol{s} + \boldsymbol{n}_e \right)$$

$$\boldsymbol{H}_e^{\mathrm{H}} \boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & A & -\alpha & 0 \\ 0 & -\alpha & A & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & A \end{pmatrix}$$

$$A = |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2$$

$$\alpha = h_1 h_4^* + h_1^* h_4 - h_2 h_3^* - h_2^* h_3$$

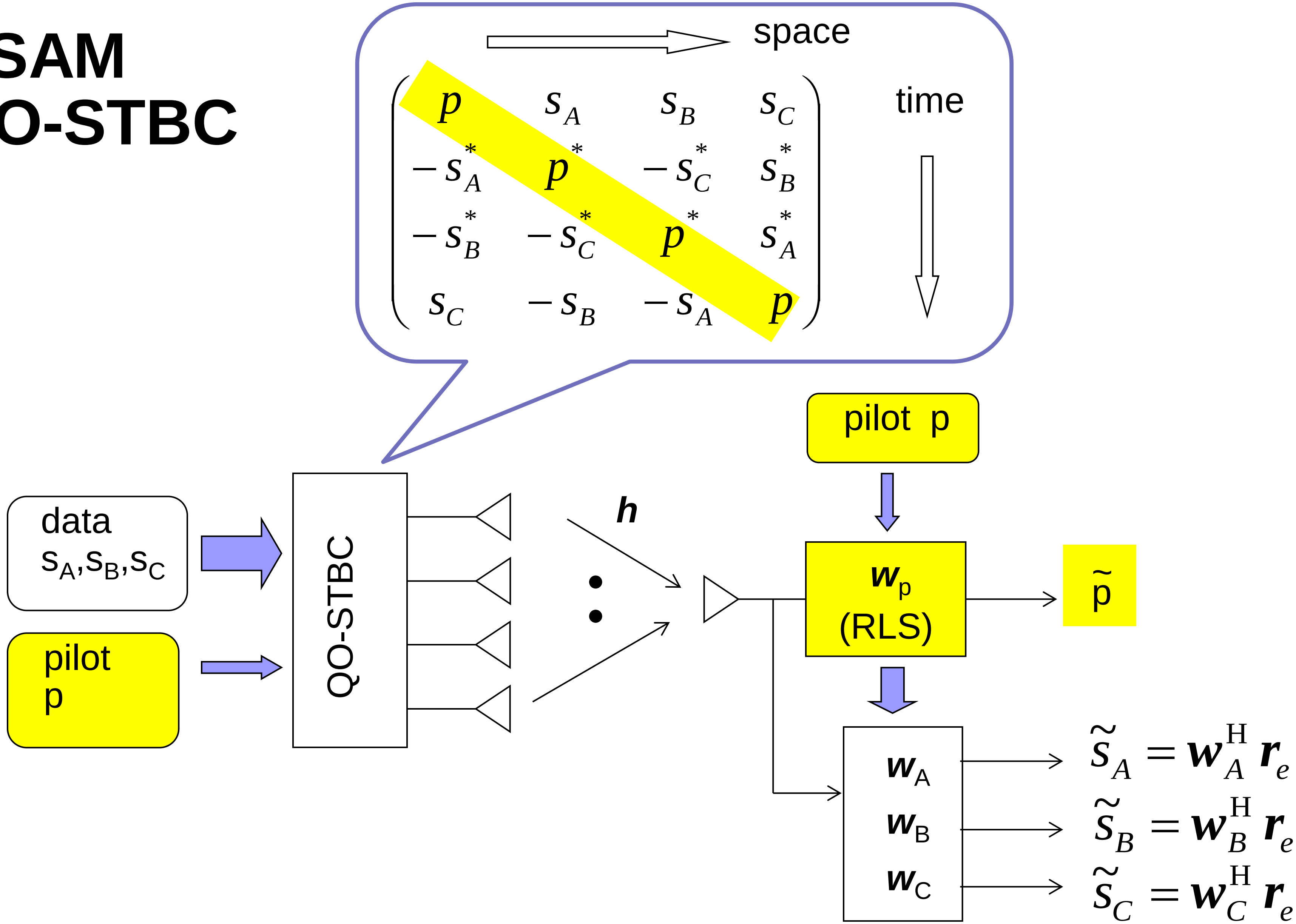
ウェイトの決め方において

$$\boldsymbol{W} \left(\equiv \boldsymbol{W}_1 \right) = \boldsymbol{H}_e$$ ⇐ 準直交のため、完全分離できず

$$\boldsymbol{W} \left(\equiv \boldsymbol{W}_2 \right) = \left(\boldsymbol{H}_e^{-1} \right)^{\mathrm{H}}$$ ⇐ 準直交のため、成分間非線形

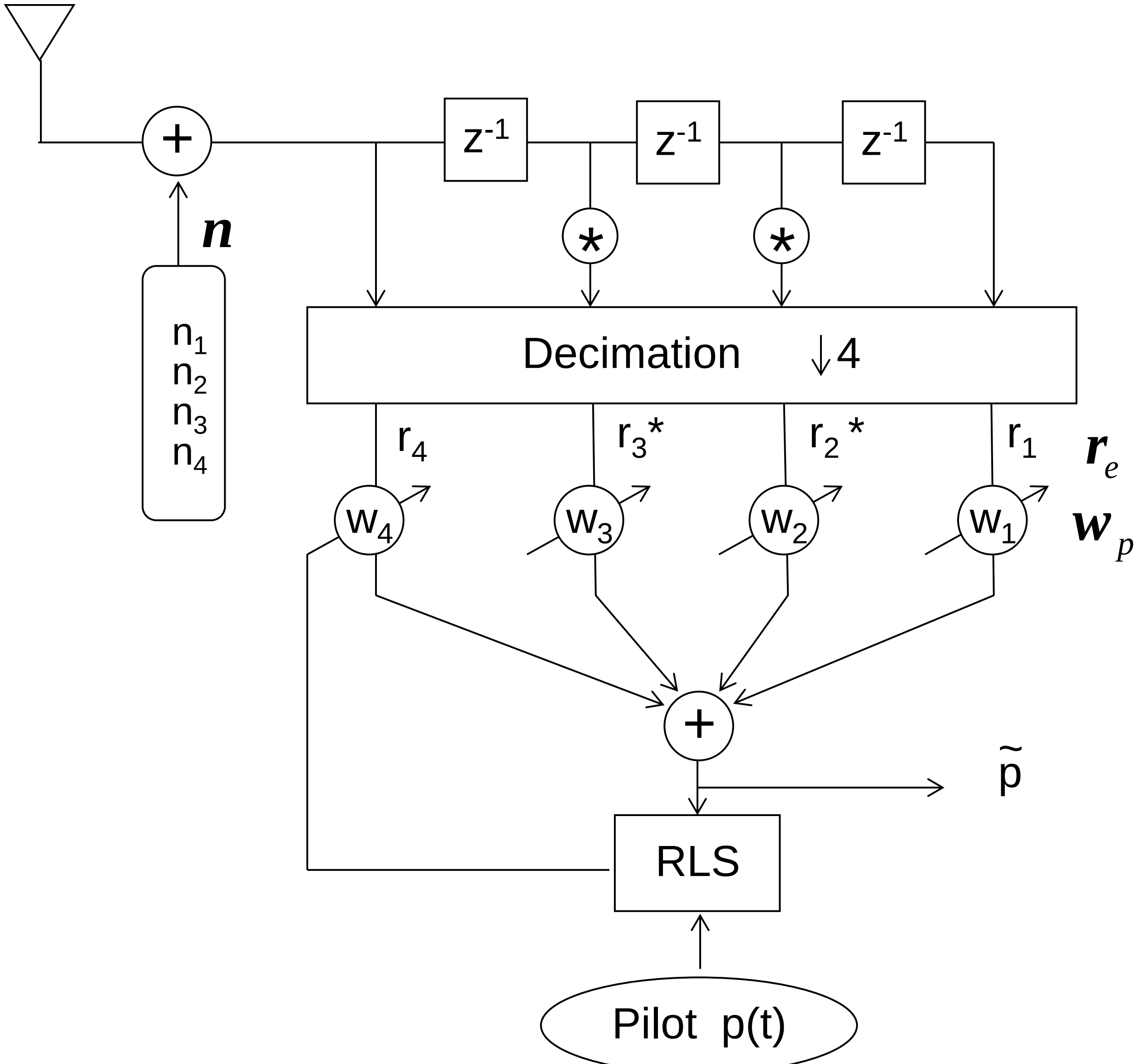
$$\boldsymbol{W} \left(\equiv \boldsymbol{W}_3 \right)$$ （PSAM / MMSE で定める）

PSAM
QO-STBC



S. Sasaki et al. 信学論(B), vol. J94 B No.2 February 2011.

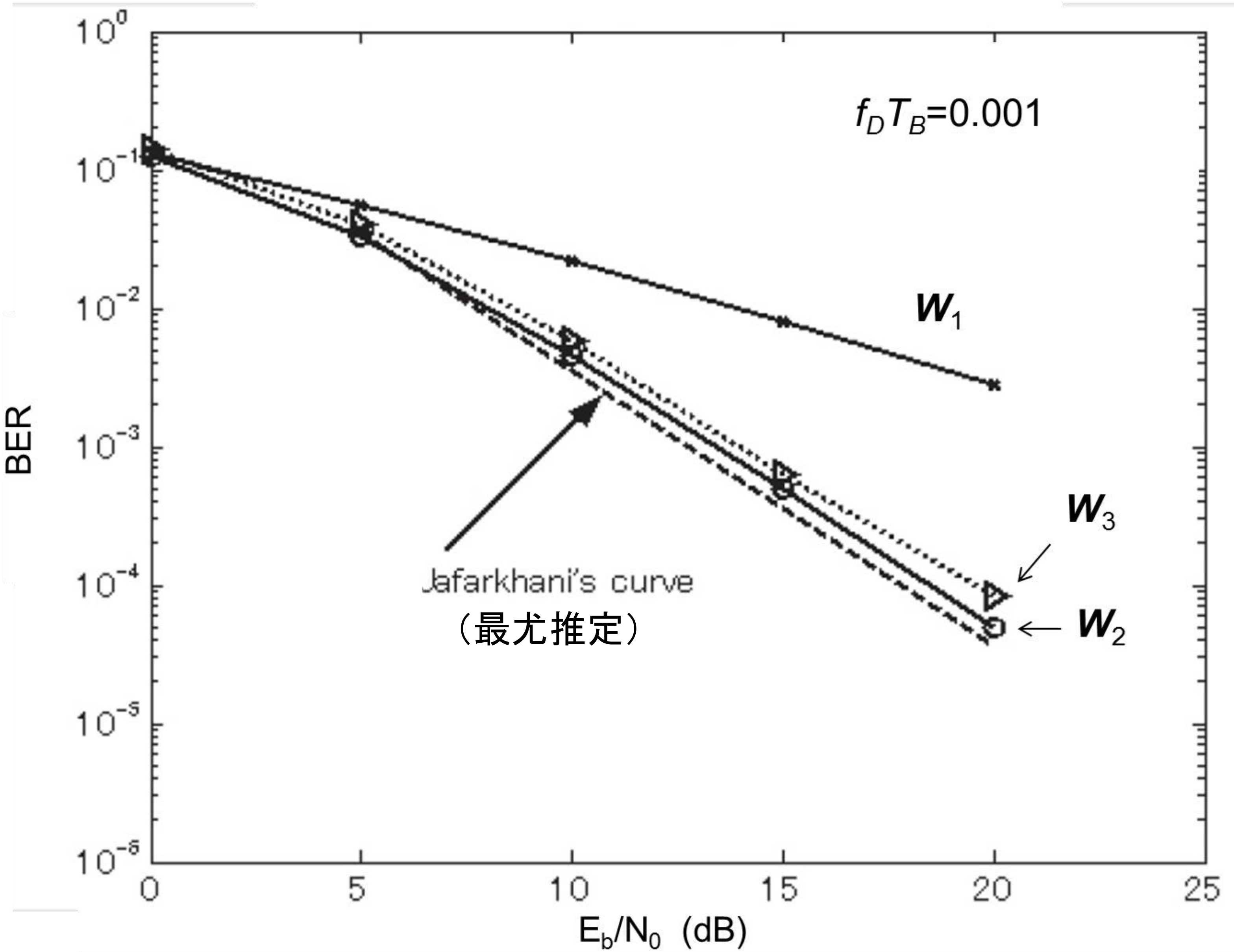
Adaptive Receiving Scheme for Pilot Signal



$$\boldsymbol{W}_1 = \boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2^* & -h_1^* & h_4^* & -h_3^* \\ h_3^* & h_4^* & -h_1^* & -h_2^* \\ h_4 & -h_3 & -h_2 & h_1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \boldsymbol{h}_p & \boldsymbol{h}_A & \boldsymbol{h}_B & \boldsymbol{h}_C \end{pmatrix}$$

$\boldsymbol{W}_1$の値はそのままには使えないが
要素間の関係は使える（？）

$$\boldsymbol{W}_3^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} \boxed{w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4} \\ \Downarrow \\ \boxed{w_2^* \quad -w_1^* \quad w_4^* \quad -w_3^*} \\ \boxed{w_3^* \quad w_4^* \quad -w_1^* \quad -w_2^*} \\ \boxed{w_4 \quad -w_3 \quad -w_2 \quad w_1} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \boldsymbol{w}_p^{\mathrm{T}} \\ \downarrow \\ \boldsymbol{w}_A^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{w}_B^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{w}_C^{\mathrm{T}} \end{array}$$


$f_D T_B$=0.001
W_1
W_3
W_2
Jafarkhani's curve
（最尤推定）
BER
E_b/N_0 (dB)
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
0
5
10
15
20
25

試行錯誤的な方法(経験的な方法)で合成ウェイトを見出し、
結果として、うまく行っていたが、理論的根拠を得ていなかった

$$\boldsymbol{W} \equiv \begin{pmatrix} \boldsymbol{w}_p & \boldsymbol{w}_A & \boldsymbol{w}_B & \boldsymbol{w}_C \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} w_1 & w_2^* & w_3^* & w_4 \\ w_2 & -w_1^* & w_4^* & -w_3 \\ w_3 & w_4^* & -w_1^* & -w_2 \\ w_4 & -w_3^* & -w_2^* & w_1 \end{pmatrix}$$

このやり方で
なぜうまくゆくのか？

SNRが十分大きいとき、パイロット信号に対して最適化受信（適応受信）を行えば、ウェイトの自由度が足りているので、信号成分（s_A, s_B, s_C）は、すべてキャンセルされているはず

$$\boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p = a \qquad \boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A = \boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B = \boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C = 0$$

この時、パイロット信号に受信で得られたウェイト$\boldsymbol{w}_p$から変換して求めたウェイト$\boldsymbol{w}_A$での受信信号を見ると

$$\boldsymbol{w}_p = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \rightarrow \boldsymbol{w}_A = \begin{pmatrix} w_2^* & -w_1^* & w_4^* & -w_3^* \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{w}_A^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p = w_2 h_1 - w_1 h_2^* + w_4 h_3^* - w_3 h_4 = -\left(\boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A = w_2 h_2 + w_1 h_1^* + w_4 h_4^* + w_3 h_3 = \left(\boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p\right)^* = a^*$$

$$\boldsymbol{w}_A^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B = w_2 h_3 - w_1 h_4^* - w_4 h_1^* + w_3 h_2 = -\left(\boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C = w_2 h_4 + w_1 h_3^* - w_4 h_2^* - w_3 h_1 = \left(\boldsymbol{w}_p^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B\right)^* = 0$$

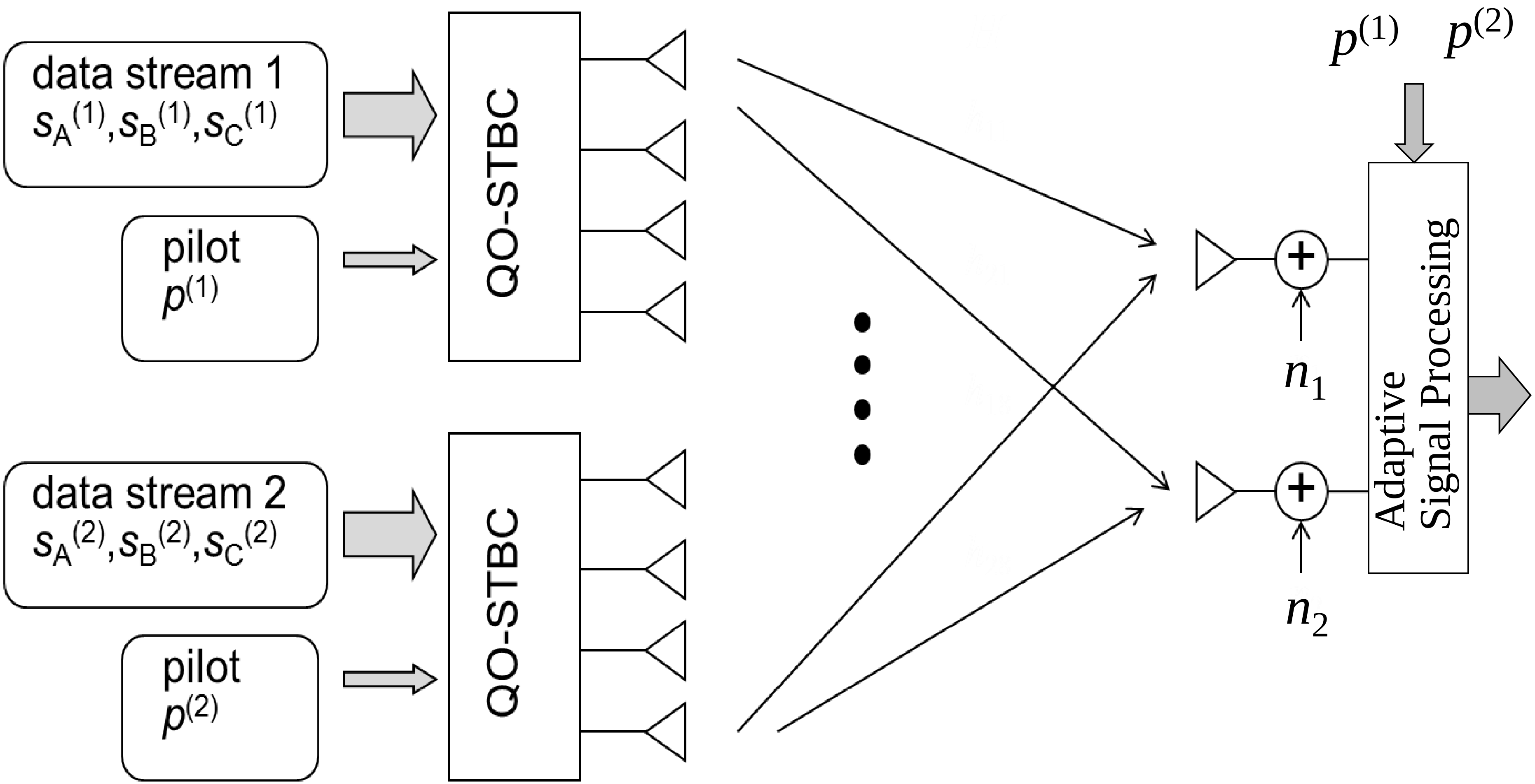
$\boldsymbol{w}_B$, $\boldsymbol{w}_C$も同様な形になり、次式で整理される

$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a \end{pmatrix}$$

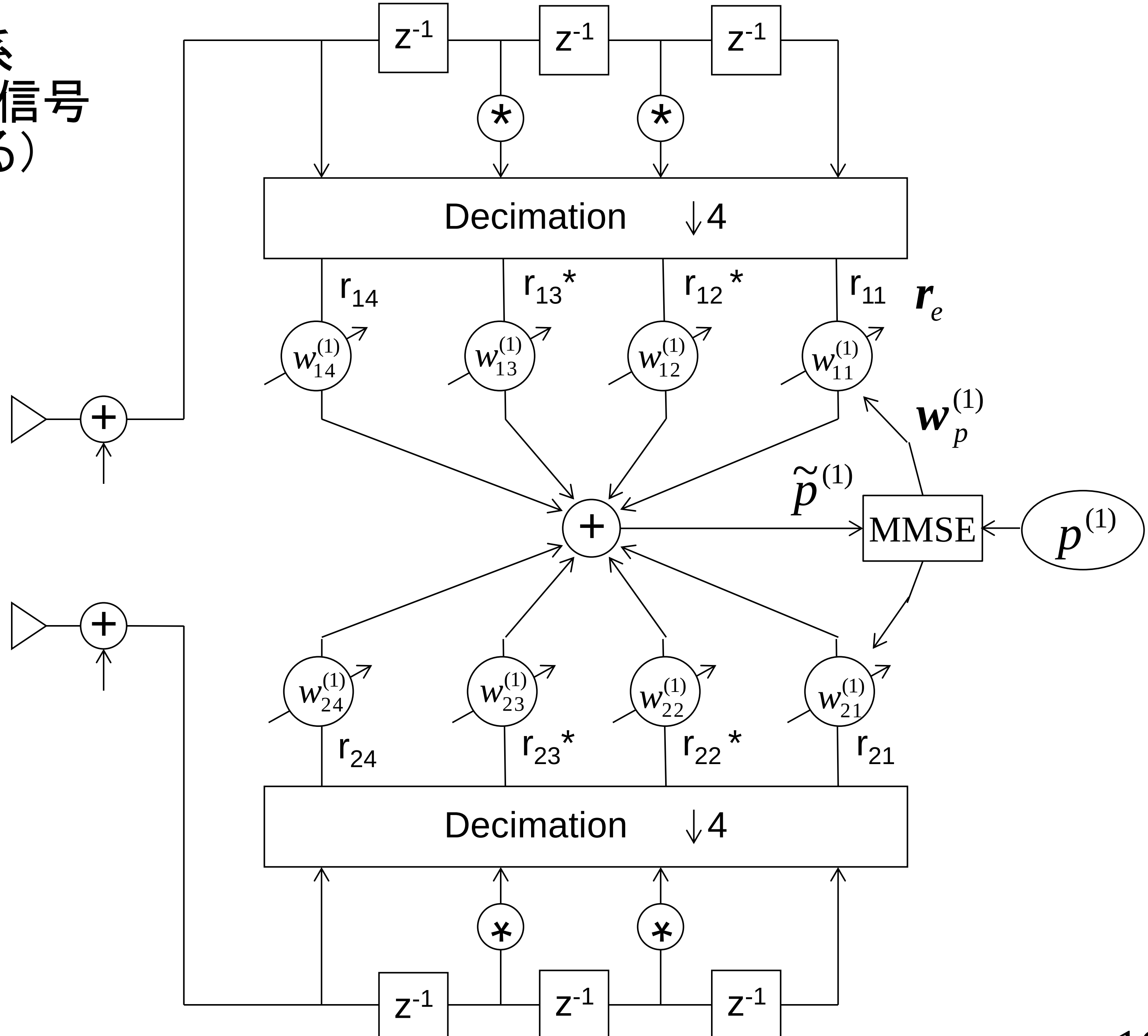
このようにして、CNRが十分大きい場合には、ウェイト$\boldsymbol{W}$で、信号p, s_A, s_B, s_C を完全、かつ、同等に分離できる

実際には、CNR有限での動作になるが、最小平均誤差規範でウェイト決定をしているため、雑音の影響も、信号p, s_A, s_B, s_Cに対して同等と考えてよい

PSAM QO-STBC　2ストリーム伝送



適応受信系（パイロット信号 $p^{(1)}$に対する）



受信信号表現

$$\boldsymbol{r}_e = \boldsymbol{H}_e \boldsymbol{s} + \boldsymbol{n}_e$$

$$\boldsymbol{r}_e = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12}^* & r_{13}^* & r_{14} & r_{21} & r_{22}^* & r_{23}^* & r_{24} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{s} = \begin{pmatrix} p^{(1)} & s_A^{(1)} & s_B^{(1)} & s_C^{(1)} & p^{(2)} & s_A^{(2)} & s_B^{(2)} & s_C^{(2)} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{n}_e = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12}^* & n_{13}^* & n_{14} & n_{21} & n_{22}^* & n_{23}^* & n_{24} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} \boldsymbol{H}_{e1}^{(1)} & \boldsymbol{H}_{e1}^{(2)} \\ \boldsymbol{H}_{e2}^{(1)} & \boldsymbol{H}_{e2}^{(2)} \end{pmatrix}$$

$$\equiv \begin{pmatrix} \boldsymbol{h}_p^{(1)} & \boldsymbol{h}_A^{(1)} & \boldsymbol{h}_B^{(1)} & \boldsymbol{h}_C^{(1)} & \boldsymbol{h}_p^{(2)} & \boldsymbol{h}_A^{(2)} & \boldsymbol{h}_B^{(2)} & \boldsymbol{h}_C^{(2)} \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{e1}^{(1)} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* & h_{14}^* & -h_{13}^* \\ h_{13}^* & h_{14}^* & -h_{11}^* & -h_{12}^* \\ h_{14} & -h_{13} & -h_{12} & h_{11} \end{pmatrix}$$

ウェイトの形

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_1^{(1)} & \mathbf{W}_1^{(2)} \\ \mathbf{W}_2^{(1)} & \mathbf{W}_2^{(2)} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{w}_p^{(1)} & \mathbf{w}_A^{(1)} & \mathbf{w}_B^{(1)} & \mathbf{w}_C^{(1)} & \mathbf{w}^{(2)} & \mathbf{w}_A^{(2)} & \mathbf{w}_B^{(2)} & \mathbf{w}_C^{(2)} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{W}_i^{(j)} = \begin{pmatrix} w_{i1}^{(j)} & w_{i2}^{(j)*} & w_{i3}^{(j)*} & w_{i4}^{(j)} \\ w_{i2}^{(j)} & -w_{i1}^{(j)*} & w_{i4}^{(j)*} & -w_{i3}^{(j)} \\ w_{i3}^{(j)} & w_{i4}^{(j)*} & -w_{i1}^{(j)*} & -w_{i2}^{(j)} \\ w_{i4}^{(j)} & -w_{i3}^{(j)*} & -w_{i2}^{(j)*} & w_{i1}^{(j)} \end{pmatrix} \qquad i, j = \{1, 2\}$$

ウェイト$\mathbf{w}_p^{(1)}$が満たすべき条件

$$\mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_p^{(1)} = b$$

$$\mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_A^{(1)} = \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_B^{(1)} = \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_C^{(1)} = \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_p^{(2)}$$

$$= \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_A^{(2)} = \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_B^{(2)} = \mathbf{w}_p^{(1)\mathrm{H}} \mathbf{h}_C^{(2)} = 0$$

このとき、$w_A^{(1)}$のウェイトに対しては

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p^{(1)} = w_{12}^{(1)}h_{11} - w_{11}^{(1)}h_{12}^* + w_{14}^{(1)}h_{13}^* - w_{13}^{(1)}h_{14} + w_{22}^{(1)}h_{21} - w_{21}^{(1)}h_{22}^* + w_{24}^{(1)}h_{23}^* - w_{23}^{(1)}h_{24} = -\left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A^{(1)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A^{(1)} = w_{12}^{(1)}h_{12} + w_{11}^{(1)}h_{11}^* + w_{14}^{(1)}h_{14}^* + w_{13}^{(1)}h_{13} + w_{22}^{(1)}h_{22} + w_{21}^{(1)}h_{21}^* + w_{24}^{(1)}h_{24}^* + w_{23}^{(1)}h_{23} = \left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p^{(1)}\right)^* = b^*$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B^{(1)} = -\left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C^{(1)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C^{(1)} = \left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B^{(1)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p^{(2)} = -\left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A^{(2)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_A^{(2)} = \left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_p^{(2)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B^{(2)} = -\left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C^{(2)}\right)^* = 0$$

$$\boldsymbol{w}_A^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_C^{(2)} = \left(\boldsymbol{w}_p^{(1)\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_B^{(2)}\right)^* = 0$$

さらに、$\boldsymbol{w}_B^{(1)}$, $\boldsymbol{w}_C^{(1)}$に対しても、同様な結果が得られ、まとめて整理すると

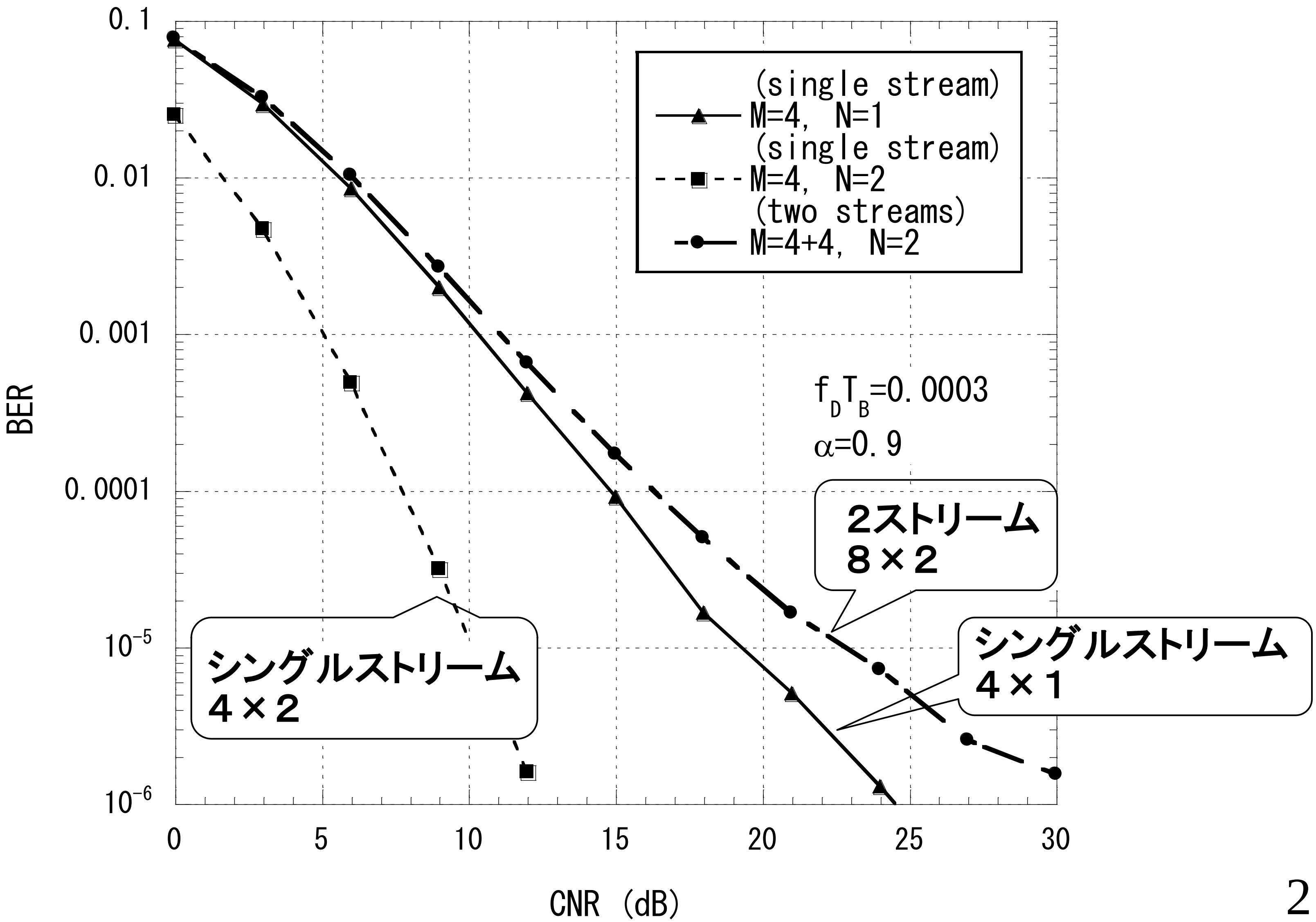
$$\left(\boldsymbol{w}_p^{(1)} \quad \boldsymbol{w}_A^{(1)} \quad \boldsymbol{w}_B^{(1)} \quad \boldsymbol{w}_C^{(1)}\right)^{\mathrm{H}} \boldsymbol{H}_e = \begin{pmatrix} b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

さらに、$p^{(2)}$ をパイロット信号とするアダプティブアレーから$\boldsymbol{w}_p^{(2)}$を定め、同様な手順で$\boldsymbol{w}_A^{(2)}$, $\boldsymbol{w}_B^{(2)}$, $\boldsymbol{w}_C^{(2)}$)に変換し、かつ、パイロット信号$p^{(1)}$で行ったと同じ仮定をすると、同様な結果が得られ、全部まとめると

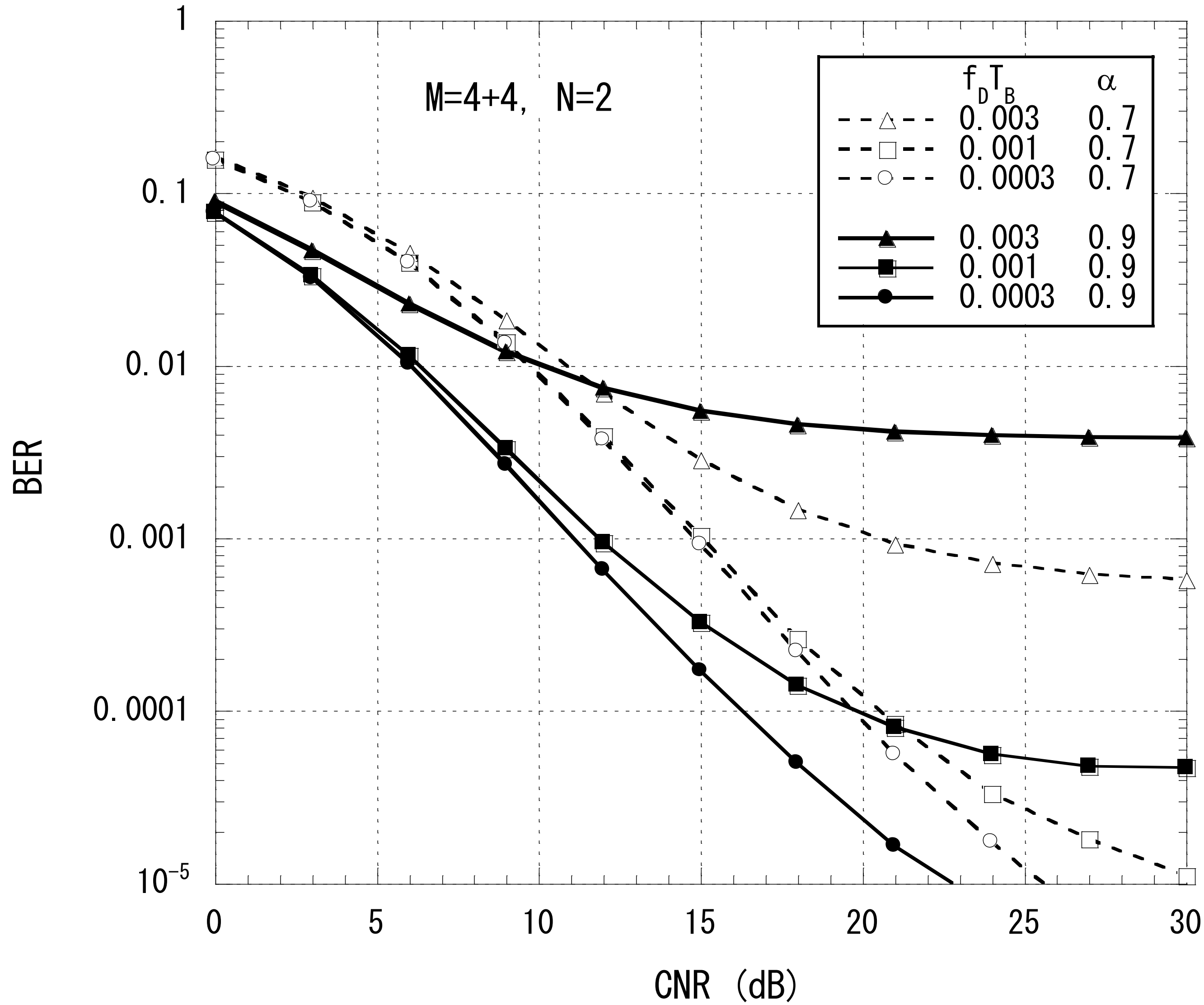
$$\boxed{\boldsymbol{W}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{H}_e = \mathrm{diag}\left(b \quad b^* \quad b^* \quad b \quad b \quad b^* \quad b^* \quad b\right)}$$

経験的に見出していた方法が、理論的にも妥当であることを示した。
白紙の状態から、理論式を導いたわけではない。

1ストリームおよび2ストリーム伝送におけるPSAM-QOSTBC AAのBER特性

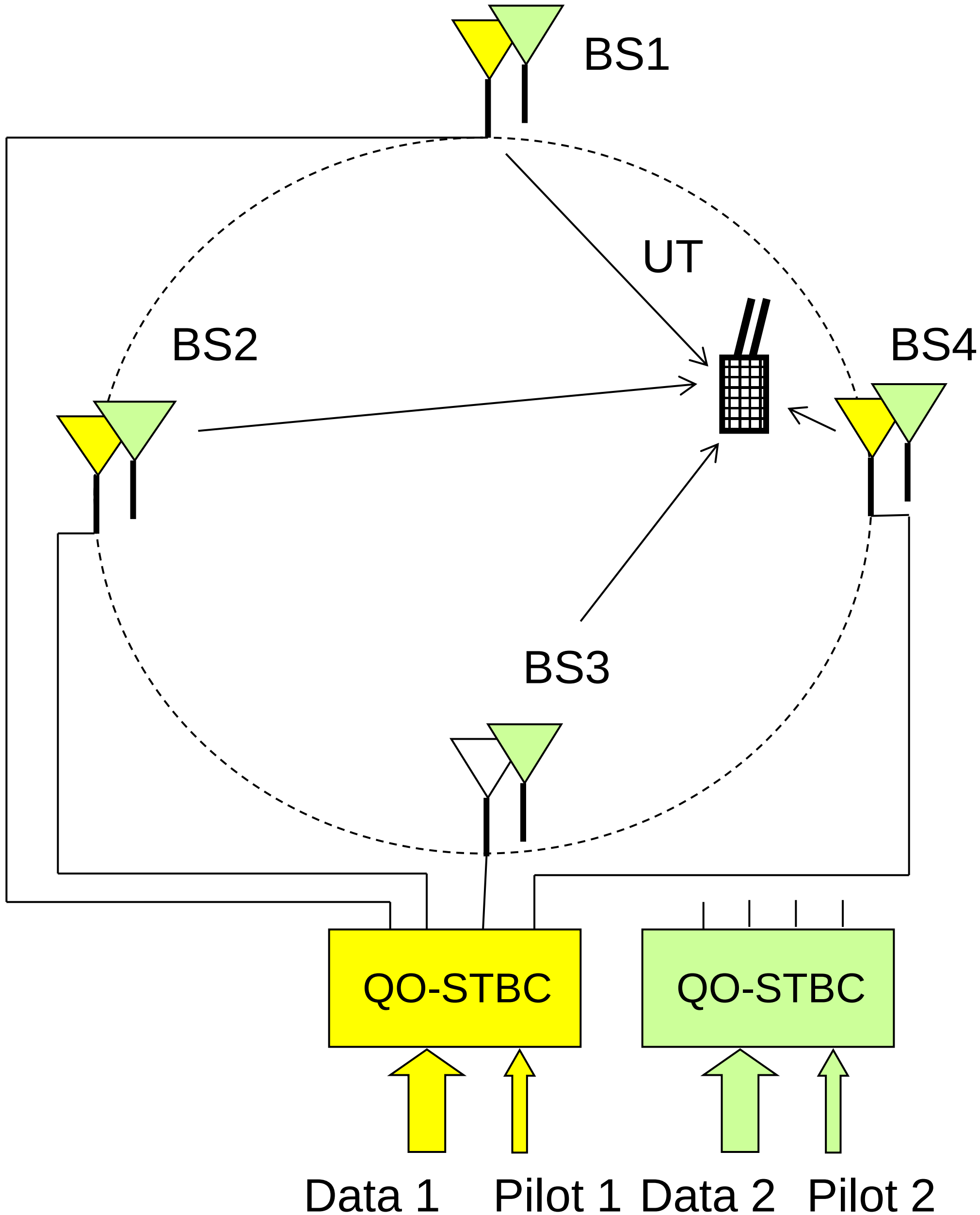


BER特性の忘却係数依存性



MIMOマルチストリーム伝送の分散アンテナシステム（DAS）への応用

M=4, N=2 での
2ストリーム伝送



まとめ

１）PSAM QO-STBC アダプティブアレー動作アルゴリズムの理論的根拠を示した。

２）送信アンテナ4本、受信アンテナ１本のMISO構成のシングルストリーム伝送に対して、送信アンテナ8本、受信アンテナ2本のMIMO構成による2ストリーム伝送（伝送レートを2倍にできる）では、ほぼ同程度のBER特性が実現できることを、理論および計算機シミュレーションにより示した。

謝辞：　本理論解析に関しては、筆者（唐沢）が、昨年11月の発表[6] を行った際の北大大鐘武雄博士とのディスカッションが、隘路を開くきっかけになった。ここに謝意を表す。