

# MIMO システムのトータルキャリブレーション

## Total Calibration for MIMO System

阪口 啓                      黒田 一浩                      高田 潤一                      荒木 純道  
 Kei Sakaguchi              Kazuhiro Kuroda              Jun-ichi Takada              Kiyomichi Araki  
 東京工業大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

### 1 まえがき

MIMO システムにおけるアンテナ素子間相互結合の影響および送受信機ポート間特性差の影響を同時に補償するキャリブレーション法を提案する．本手法では送信信号をキャリブレーション信号として用い、アンテナからのフィードバック信号を解析することで送信機の伝達係数行列、受信機の伝達係数行列、アンテナの散乱行列を独立に求めることができる．求められた3つの行列より、送信機ポート間特性差と素子間結合の同時補償行列、または素子間結合と受信機ポート間特性差の同時補償行列を決定する．本手法を用いることによって（非線形歪み補償も考慮すべき）MIMO システムのトータルキャリブレーションを実現することができる．

### 2 キャリブレーション定式化

散乱行列が  $S$  で与えられる任意配置の  $m$  素子アレーアンテナおよび伝達係数行列が  $H_s$  で与えられる  $m$  ポートの送信機、伝達係数行列が  $H_r$  で与えられる  $m$  ポートの受信機を考える．ただし送受信機間のアイソレーションは充分にとれているものとする．アンテナと送受信機の接点に誘起される電圧ベクトル  $v$  は、送信信号  $v_s$  に相当する電圧ベクトル  $v'_s$  および到来方向  $\theta$  から入射した電界に相当する等価な電圧ベクトル  $v'_r(\theta)$  を用いて次の様に表すことができる．

$$v = (I + S)(v'_s + v'_r(\theta)) \quad (1)$$

ここで  $(I + S)$  は素子間結合の影響を表す行列であり、 $C = (I + S)^{-1}$  の行列を用いることで補償可能である．素子間結合の影響を補償する行列は送受共通であるが、送信機の補償行列は  $C_s = H_s^{-1}(I + S)^{-1}$ 、受信機の補償行列は  $C_r = (I + S)^{-1}H_r^{-1}$  と異なる．

素子間結合の補償行列  $C$  を求める方法としては、角度軸 ( $\theta$ ) におけるフーリエ変換を用いる方法 [1] や最小自乗法を用いる方法 [2] が提案されているが、電波暗室内などにおける角度軸測定精度の確保が問題とされている．一方ポート間特性差  $H_s, H_r$  の補償方法として、近傍の参照アンテナを用いる方法 [3] やアンテナ間の帰還信号を用いる方法 [4] が提案されているが素子間結合の補償は行っていない．本報告では素子間結合とポート間特性差を同時に補償する方法を提案する．

### 3 アクティブキャリブレーション

上記議論より  $H_s, H_r, S$  を独立に求めることができれば素子間結合とポート間特性差を同時に補償することができる．この目的を達成するためにここではアクティブキャリブレーション法を提案する．

「アクティブ」とはアンテナと送受信機の接点におけるインピーダンスをアクティブに制御するという意味であり、例えばアンテナより送受信機側に  $\lambda/4$  の位置にスイッチを並列に接続したアンテナ構成を考える．つまりスイッチ ON のとき  $Z(0) = \infty$  となり、スイッチ OFF のとき  $Z(0) = Z$  となる．スイッチが ON のときのフィードバック信号  $v_r$  は散乱行列が単位行列となるために以下のように表すことができる．

$$v_r = H_r H_s v_s \quad (2)$$

一方スイッチが OFF のときは以下の様になる．

$$v_r = H_r S H_s v_s \quad (3)$$

この2つの測定結果より3つの行列  $H_s, H_r, S$  を独立に求める．ただし  $H_s, H_r$  に関してはポート間の特性差のみを補償すれば良いので相対的な測定で良い．相対的な伝達係数行列  $\hat{H}_s, \hat{H}_r$  は以下の手順で計算される．ここで  $\hat{H}_s, \hat{H}_r$  は全てのポートの伝達係数の相対値を表す行列であり、例えば  $\hat{H}_s(1, 2)$  は  $H_s(2, 2)/H_s(1, 1)$  を表している．

$$\hat{H}_s = \sqrt{M_1/M_2} \hat{H}_s \quad (4)$$

$$\hat{H}_r = \sqrt{M_1 \times M_2} \hat{H}_r \quad (5)$$

ただし  $M_1, M_2$  は以下で与えられ、また  $\sqrt{\cdot}, \cdot \times, \cdot /$  は要素毎の演算である．

$$M_1 = (H_r S H_s) / (H_r S H_s)^T \quad (6)$$

$$M_2 = \text{diag}(H_r H_s) \text{diag}((H_r H_s)^{-1})^T \quad (7)$$

最後に相対的に求められた  $H_s, H_r$  より絶対的な散乱行列  $S$  を以下の式により求める．

$$S = (\hat{H}_r)^{-1} (H_r S H_s) (\hat{H}_s)^{-1} (\hat{H}_r \hat{H}_s) (H_r H_s)^{-1} \quad (8)$$

### 4 数値解析結果

アクティブキャリブレーション法の効果を確認するために計算機シミュレーションを行った．評価関数としては ESPRIT 法を用いた到来方向推定の推定誤差を用いる．1波のみの到来波環境を考え、到来方向 (DOA) を  $-90[\text{deg}] \sim 90[\text{deg}]$  と変化させたときの到来方向の推定誤差を評価した．なお本シミュレーションでは到来方向推定であるため受信時の特性のみを示すが、放射方向推定すなわち送信時の特性に関しても同様の結果を得ている．表1に示す条件のもと、素子間相互結合の影響のみを受けた場合（点線）、素子間相互結合と受信機ポート間特性差の両方の影響を受けた場合（破線）、それらを提案法を用いて補償した場合（実線）の特性を図1に示す．これよりポート間特性差の補償のみでは推定誤差の軽減は充分には得られず、トータルキャリブレーションを用いることで初めて達成されることがわかる．

表 1: シミュレーション条件

アンテナ	8 素子半波長間隔直線ダイポールアレー
スイッチ特性	ON:1[Ω]    OFF:∞[Ω]
受信機振幅特性差	± 3[dB] 内一様乱数
受信機位相特性差	± 5[deg] 内一様乱数

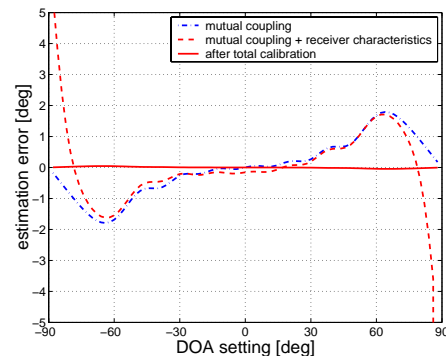


図 1: 到来方向推定におけるトータルキャリブレーションの効果

### 5 まとめ

MIMO システムにおけるアンテナ素子間相互結合の影響および送受信機ポート間特性差の影響を同時に補償するキャリブレーション法を提案し、計算機シミュレーションによりその特性を把握した．

### 参考文献

[1] H.Steyskal, J.S.Herd, IEEE Trans., Vol.AP-38, No.12, pp.1971-1975, Dec.1990.  
 [2] 稲葉, 坂本, 大堂, 三浦, 信学ソ大, B-1-152, 2001.  
 [3] 森, 新井, 信学ソ大, B-1-150, 2001.  
 [4] 西森, 長, 堀, 信学技報, SST2000-92, AP2000-226, RCS2000-226, MW2000-217, 2001.