

## E7 コヒーレント波のDOA推定に関するアレー校正効果の実験的検証

池田 堅一      原 六蔵      山田 寛喜      山口 芳雄  
新潟大学工学部

### 1. まえがき

高分解能な推定が実現可能なスーパーレゾリューション法は、様々な分野で利用されてきている。しかし、アレーアンテナを用いて電波到来方向推定を行う際には、次のような問題が生じる。アレーアンテナにおいて、各アレー素子の特性の変化による利得・位相誤差の問題や、アレー状に配置することによって生じる素子間相互結合誤差の問題である。このような誤差が存在する場合は、MUSIC法 [1] や ESPRIT 法 [2] などの高分解能な手法は、本来の高分解能性を発揮できず、その推定性能は著しく劣化する [3]。

また、MUSIC 法、ESPRIT 法は、コヒーレント波を分離検出する場合、全データアレーを相重なる複数のサブアレーに分割し、それらのデータ相関行列の平均化処理を行う相関抑圧処理 SSP[4] を用いる。この相関抑圧処理により信号相関が抑圧され、MUSIC 法等の手法を正しく動作させることが可能となる。しかし、比較的少ないアレー素子数でのコヒーレント波の分離検出を考えた場合、分離可能な信号数が本来のアレーの自由度に比べ極めて小さくなる問題が生じる。

本稿では、MUSIC 法、ESPRIT 法、コヒーレント波を直接取り扱うことが可能なスーパーレゾリューション法である MODE 法 [5] を用いたコヒーレント 2 波推定を行う。なお本稿では、信号根に関する拘束条件を付加しない MODE 法アルゴリズムを用いている。更に、各手法に対してアレー校正 [3] により、どの程度特性が改善するかを考察する。

### 2. アレー校正

まず、入射波の到来方向 (DOA) を理想的な  $L$  素子等間隔リニアアレーで推定することを考える。第 1 素子から  $l$  番目の素子までの素子間隔を  $x_l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ )、信号周波数を  $f$ 、 $d$  波の入射電波が存在するときの  $i$  番目の入射波の複素振幅、到来方向を  $s_i$ 、 $\theta_i$  とする。このとき受信データは以下のように表される。

$$r_l = r(x_l) = \sum_{i=1}^d s_i e^{j2\pi \frac{x_l}{\lambda} \sin \theta_i} + n_l \quad (1)$$

$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^d s_i \mathbf{a}(\theta_i) + \mathbf{n} = \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = [r_1, \dots, r_L]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_d]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_L]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_d)] \quad (6)$$

$$\mathbf{a}(\theta_i) = \left[ e^{j2\pi \frac{x_1}{\lambda} \sin \theta_i}, \dots, e^{j2\pi \frac{x_L}{\lambda} \sin \theta_i} \right]^T \quad (7)$$

$\mathbf{A}$  は誤差の無い理想的なモードベクトル行列、 $\mathbf{s}$  は入射波の複素振幅ベクトル、 $\mathbf{n}$  は雑音ベクトルである。

実験で得られるアレーアンテナの受信データには、各アレー素子の利得・位相誤差、素子間相互結合誤差が含まれる。前者を行列  $\mathbf{\Gamma}$ 、後者を行列  $\mathbf{C}$  でモデル化すると、これらの誤差を含むデータベクトル  $\mathbf{r}_{raw}$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{raw} &= \mathbf{C} \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、本稿では、文献 [3] の手法を用い、行列  $\mathbf{C}$  及び行列  $\mathbf{\Gamma}$  を推定し、行列  $\mathbf{W}$  を構成する。受信データより生成される相関行列を  $\mathbf{R}_{raw}$  として次式により校正が実現される。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{raw} &= \mathbf{r}_{raw} \mathbf{r}_{raw}^H \\ &= \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{S} \mathbf{A}^H \mathbf{W}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{cal} = \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{R}_{raw} - \sigma^2 \mathbf{I}) (\mathbf{W}^H)^{-1} \quad (10)$$

ここで  $H$  は複素共役転置、 $\sigma^2$  は雑音電力である。

### 3. 到来方向推定誤差の考察

電波暗室内で測定したデータを使用し到来方向推定を行う。実験では、送信にホーンアンテナ、受信にモノポールアンテナを使用し、送受信のアンテナを 4[m] 離した。受信アンテナは 6 素子を等間隔にリニア状に配置する。(受信アンテナの配置は図 1)。送信アンテナを固定し、受信アンテナを  $-80^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $5^\circ$  刻みで回転させることにより入射角度の異なる計 33 方向のデータを測定した。測定周波数は 2.5 [GHz]、素子間隔は 6.0 [cm]、スナップショット数は 1 である。

図 2, 3, 4 はコヒーレント 2 波の校正前後の MUSIC 法、ESPRIT 法、MODE 法の DOA 推定結果である。MUSIC 法と ESPRIT 法に関して、SSP 法はサブアレー数 2、サブアレー内素子数 5 で行う。校正を行う場合には校正後の相関行列  $\mathbf{R}_{cal}$  に対して SSP 法を適用する。各図とも 1 波目を  $60^\circ$  に固定し、2 波目の DOA を変化させた場合の 1 波目、2 波目の DOA 推定誤差を示している。横軸 (theta2[deg.]) は 2 波目の DOA、縦軸 (ER-ROR[deg.]) は推定誤差を表す。2 波分離不可能、

または推定結果が表示範囲を越えた場合には推定不可能とした。

推定誤差に関して、3手法ともに校正によって推定誤差が減少する。分解能に関して、校正前では ESPRIT 法と MODE 法の分解能特性は同等であるが、校正後では MODE 法が ESPRIT 法より優れている。MUSIC 法も校正により分解能が向上するが他の2手法に比べ若干、分解能が劣ることがわかる。

#### 4. まとめ

本稿では、6素子モノポールリニアアレーの実験データを用いて、コヒーレント波に対する各種 DOA 推定法の校正前後の推定精度に関する比較検討を行った。その結果より、校正により各手法の分解能が向上し、特に MODE 法が優れていることがわかった。

#### 謝辞

本研究で利用したリニアアレーは阿達透技官の協力によって作成された。ここに深く感謝する。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B)15760257により行われたものである。

#### 参考文献

- [1] R.O.Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-34, No.3, pp.276-280, Mar. 1986.
- [2] R.Roy and T.Kailath, "ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques," IEEE Trans., vol.ASSP-37, No.7, pp984-995, July 1989.
- [3] 新井隆宏, 原 六蔵, 山田寛喜, 山口芳雄, "既知の波源を用いたスーパーレゾリューションアレー校正法について," 信学論 (B), vol.J86-B, no.3, pp.527-535, Mar. 2003.
- [4] T.J.Shan, M.Wax, and T.Kailath, "On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals," IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, vol.ASSP-33, No.4, pp.806-811, Aug. 1985.
- [5] P.Stoica and K.C.Sharman, "Novel eigenanalysis method for direction estimation," IEE Proc., vol.137, Pt.F, No.1, pp.19-26, Jan. 1990.

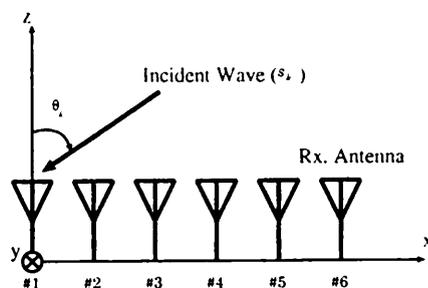


図 1. 6素子リニアアレーの構成

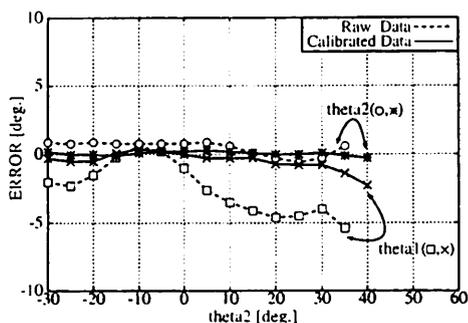


図 2. MUSIC 法によるコヒーレント 2 波推定誤差

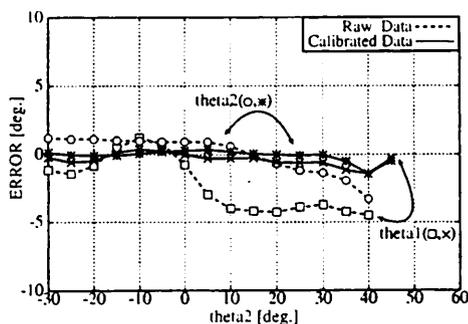


図 3. ESPRIT 法によるコヒーレント 2 波推定誤差

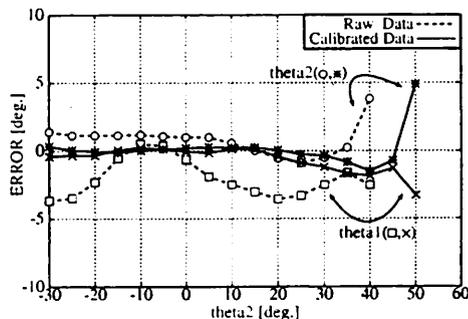


図 4. MODE 法によるコヒーレント 2 波推定誤差