

# 耐スプーフィングに向けたアレーアンテナによる 信号到来方向推定に関する研究

○芝田淳之介（大阪府立大学大学院）、  
藤原健、大澤壮志（宇宙航空研究開発機構）、  
辻井利昭（大阪府立大学大学院）

A Study on Signal Arrival Direction Estimation Using Array Antenna for Anti-Spoofing  
Junnosuke Shibata (Osaka Prefecture University)  
Takeshi Fujiwara, Sohshi Ohsawa (JAXA)  
Toshiaki Tsujii (Osaka Prefecture University)

## 1. はじめに

衛星航法(GNSS)は、簡単に測位が可能なシステムとして広く利用されている。しかし、その電波は微弱であり、他の電波の影響を容易に受ける。特に衛星信号になりすました偽の信号(スプーフィング信号)が送信された場合、受信機ユーザは攻撃者が意図する偽物の位置情報を本物と認識してしまうため、大きな障害を引き起こす恐れがあり、対策を講じる必要がある。スプーフィング信号は信号が到来する方向が実際の衛星信号とは異なるため、受信信号の到来方向がわかれば、スプーフィング信号の検知が可能になると考えられる。本研究では GNSS スプーフィングの検知に向けて、アレーアンテナを使用した方向推定手法の1つである MUSIC 法に基づいて信号到来方向を推定し、その有用性を確認する。

## 2. 到来方向推定手法について

本研究の到来方向推定で用いる MUSIC 法について説明する。 $K$ 素子のアレーアンテナで $L$ 個の到来波を受信する場合、アンテナからの入力ベクトル  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), \dots, x_K(t)]^T$  は次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= \sum_{l=1}^L s_l(t) \mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_L(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_L, \phi_L)]^T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) &= [\exp\{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_1^T \mathbf{p}(\theta_l, \phi_l)\}, \dots \\ &\quad , \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_K^T \mathbf{p}(\theta_l, \phi_l)\}, \dots, \exp\{j\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_K^T \mathbf{p}(\theta_l, \phi_l)\}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\mathbf{s}(t)$ は衛星からの到来信号を表すベクトルであり、 $\mathbf{n}(t)$ はノイズを表す。また、 $\mathbf{a}(\theta_l, \phi_l)$ はステ

アリングベクトルと呼ばれ、波源から各アンテナ素子への信号の伝達関数を表している。これは、素子の位置ベクトル  $\mathbf{r}_k^T$  と信号の視線方向ベクトル  $\mathbf{p}(\theta_l, \phi_l) = [\cos \theta_l \cos \phi_l, \cos \theta_l \sin \phi_l, \sin \theta_l]$  との内積に相当する。よって、アンテナ1の位置を基準(原点)として $k$ 番目のアンテナとの受信位相差  $\Psi_{1k}(\theta_l, \phi_l)$  を用いると以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) &= [1, \dots, \exp\{j\Psi_{1k}(\theta_l, \phi_l)\}, \dots, \exp\{j\Psi_{1K}(\theta_l, \phi_l)\}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

このとき $\mathbf{X}(t)$ の相関行列は以下の式で表される。

$$\mathbf{R}_{XX} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I} \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)] \quad (7)$$

この相関行列に対して固有値分解を行うと

$$\mathbf{R}_{XX}\mathbf{e}_i = \lambda_i\mathbf{e}_i \quad (i = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

となる。ここで $\lambda_i$ は相関行列の固有値であり、 $\mathbf{e}_i$ は固有ベクトルを表す。 $\lambda_i$ には以下の関係式が成り立つ。

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L > \lambda_{L+1} = \dots = \lambda_K = \sigma^2 \quad (9)$$

$\sigma^2$ は熱雑音電力であり、 $\sigma^2$ より大きい固有値の数から到来波数 $L$ を推定することが可能である。ここで $\sigma^2$ に等しい固有値に対応する固有ベクトルに対しては

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{XX}\mathbf{e}_i &= (\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I})\mathbf{e}_i = \lambda_i\mathbf{e}_i = \sigma^2\mathbf{e}_i \\ &\quad (i = L + 1, \dots, K) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H\mathbf{e}_i = \mathbf{0} \quad (11)$$

であり、到来波が無相関のとき $\mathbf{A}, \mathbf{S}$ はフルランクより

$$\mathbf{A}^H\mathbf{e}_i = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\mathbf{a}^H(\theta_l, \phi_l)\mathbf{e}_i = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$(i = L + 1, \dots, K \quad l = 1, 2, \dots, L)$$

となる。これは内部雑音に等しい固有値に対応する雑音部分行列  $\mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_{L+1}, \dots, \mathbf{e}_K] \in \mathbb{C}^{K \times (K-L)}$  がすべての到来波のステアリングベクトルと直交することを意味している。この  $\mathbf{E}_N$  を用いて MUSIC スペクトラム関数は次式で定義される。

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{a}(\theta, \phi)}{\sum_{i=L+1}^K |\mathbf{e}_i^H \mathbf{a}(\theta, \phi)|^2} = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{a}(\theta, \phi)}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (13)$$

この MUSIC スペクトラム関数は  $\mathbf{a}(\theta, \phi)$  が信号方向と一致するときに極大値をとる。よって、 $(\theta, \phi)$  を探索することで生じる  $L$  個のピークに対応する方向  $(\theta_l, \phi_l)$  から信号到来方向の推定結果が得られる[1]。

### 3. 実衛星信号に対する到来方向推定

本研究では、実在する衛星信号を取得し、受信した信号に対して MUSIC 法を適用することによって、実衛星の到来方向を正しく推定できるか検証を行った。信号取得には下図のような6素子円形アレーアンテナを使用し、素子間隔は半波長(9.5cm)である。



図 3.1 アレーアンテナ

受信機から衛星ごとに出力される搬送波位相の観測値を用いて到来方向推定を行った結果を以下に示す。図より、信号が1つであれば正しく方向推定できていることがわかる。一方で、各衛星信号の位相観測値を足し合わせて複数信号にして MUSIC 法に適用したところ、信号数が増加するにつれて精度が低下することがわかった。一方で、衛星数を増やしていくと精度が悪化することも確認できた。

### 4. まとめと今後の課題

今回は受信機処理で得られる搬送波位相値を到来信号の位相と考え、MUSIC 法に適用して到来方向推定を行ったが、スプーフィングを受けた場合、受信機から正しい位相値が得られない可能性が高い。そ

こで、スプーフィングの検知を行うためには受信機で処理するより前の段階で妨害信号の方向を推定する必要がある。よって、今後は受信機処理前の信号を用いた方向推定を行っていく。

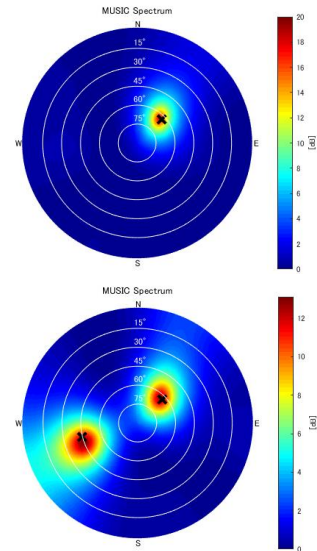


図 3.2 位相値を用いた方向推定(上 1 信号 下 2 信号)

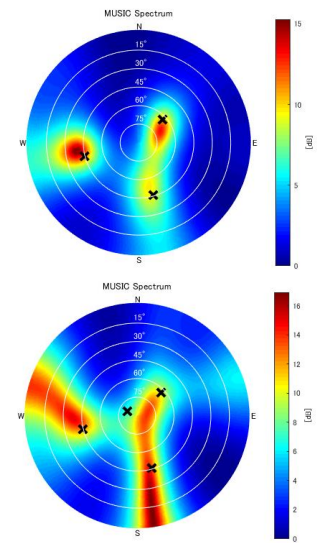


図 3.3 位相値を用いた方向推定(上 3 信号 下 4 信号)

### 5. 謝辞

本研究の一部は JAXA 航空技術イノベーションチャレンジに採択され、JAXA 航空技術部門次世代航空イノベーションハブとの共同研究により実施されたものである。

### 参考文献

[1] 菊間信良 『アレーアンテナによる適応信号処理』, 科学技術出版, pp.194-199, 1998.