

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

A Study on Signal Arrival Direction Estimation Using Array Antenna for Anti-Spoofing

芝田淳之介

Junnosuke Shibata

大阪府立大学大学院 工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

1. 背景

GNSS は、簡単に位置測位が可能なシステムとして広く利用されているが、妨害電波、特にスプーフィング（なりすまし）を受けた場合は大きな障害となる恐れがある。そのため、受信した信号がスプーフィング信号であるかどうかを検知する必要がある。本研究はスプーフィングの検知に向けて、信号到来方向推定手法の1つである MUSIC 法を実衛星信号に適用して方向推定を行い、その有効性を確認することを目的とする。

2. 到来方向推定手法の概要

本研究で用いる MUSIC 法について説明する。K素子のアレーアンテナにL個の信号が仰角 θ ，方位角 ϕ から到来するとき、入力ベクトルは次式で表せる。

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

$$\mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) = \left[\exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_1^T \mathbf{L}\right\}, \dots, \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{r}_K^T \mathbf{L}\right\} \right]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \phi_1), \mathbf{a}(\theta_2, \phi_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_L, \phi_L)] \quad (3)$$

ここで $s_l(t)$ は到来信号の波形、 $\mathbf{n}(t)$ はノイズを表す。また $\mathbf{a}(\theta_l, \phi_l)$ はアンテナ素子の位置ベクトル \mathbf{r}_k と、信号の視線ベクトル $\mathbf{L}(\theta_l, \phi_l) = [\cos \theta_l \cos \phi_l, \cos \theta_l \sin \phi_l, \sin \theta_l]^T$ で定まり、素子1の位置を基準としてk番目の素子との受信位相差 $\Psi_{1k}(\theta_l, \phi_l)$, ($k = 1, \dots, K$)を用いると次式で表せる。

$$\mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) = [1, \dots, \exp\{j\Psi_{1k}(\theta_l, \phi_l)\}, \dots, \exp\{j\Psi_{1K}(\theta_l, \phi_l)\}]^T \quad (4)$$

本手法では $\mathbf{X}(t)$ の相関行列 \mathbf{R}_{xx} を計算し、その固有値、固有ベクトルを利用する。求めた固有値のうち、 $K - L$ 個の微小な固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{E}_N を用いると、MUSIC スペクトラムは次式で定義される。

$$P_{MUSIC}(\theta, \phi) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{a}(\theta, \phi)}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (5)$$

この関数のピークを探し、それに対応する (θ, ϕ) から到来方向を推定できる⁽¹⁾。今回は、3素子、6素子のアレーアンテナを用いて遮蔽物の少ない環境下で衛星信号を取得し、本手法を適用して方向推定を行った。

3. 得られた結果

取得した衛星信号に MUSIC 法を適用し、方向推定を行った結果を以下にそれぞれ示す。Fig.1は低仰角の衛星に対する推定結果を示している。3素子の場合では実際の方向と推定方向がずれていたが、6素子ではそれが補正され、より精度が向上していることが確認できた。

次に、衛星ごとに得られている搬送波位相の観測値を合算し、複数方向から到来する信号の方向推定が可能であるかの確認を行った。Fig.2は複数衛星に対する方向推定の結果を示している。こちらも同様に3素子での推定方向のずれが6素子では改善されていることが確認できた。一方で、6素子の方向推定において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。

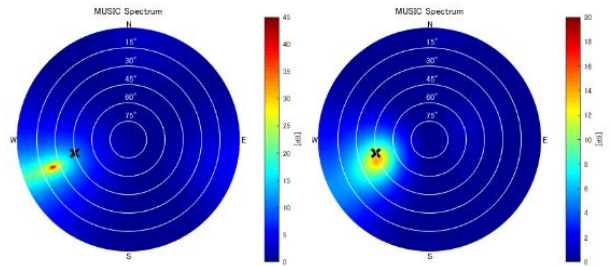


Fig.1 低仰角信号に対する到来方向推定の結果 (左: 3素子 右: 6素子, ×印は実際の衛星位置)

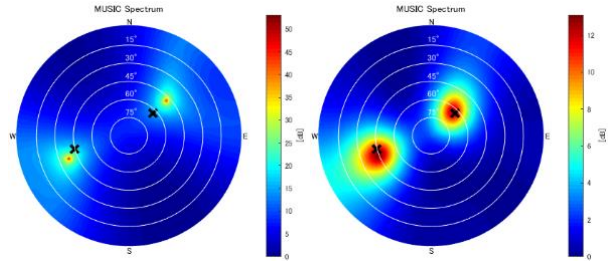


Fig.2 複数衛星に対する到来方向推定の結果 (左: 3素子 右: 6素子, ×印は実際の衛星位置)

4. まとめ

今回は衛星信号を受信機で処理して得られる搬送波位相の観測値を到来信号の位相と考え、MUSIC法に適用して有効性を確認したが、スプーフィング攻撃を受けた場合、受信機から正しい位相値が得られない可能性が高い。そのため、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 MUSIC 法に適用した方向推定を行うことを目標としている。

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, 1998, 11, pp. 195-199.