

センサ間のノイズレベルが異なる場合を考慮した 波動分布関数法のノイズ積分核設計法の提案

田中 裕士・太田 守・笠原 禎也（金沢大）

1 はじめに

科学衛星で観測される自然電波の到来方向を推定することで、宇宙空間を安全に活用する上で必要な宇宙プラズマ環境変動の情報が得られる。電波到来方向推定手法の一つである波動分布関数法 [1, 2] は、少数のセンサで複数波の到来方向及び到来波の角度広がり推定可能である。

波動分布関数法の求解法の一つであるマルコフ確率場 (MRF) モデル [3] は、雑音環境下でも正確な推定結果が得られる。MRF モデルは、推定に用いる基底関数である積分核にノイズに対応するもの (ノイズ積分核) を加えてロバスト性を向上させている。このノイズ積分核は、従来電磁界センサのノイズレベルが全て等しいという仮定のもと設計・評価されてきた。しかしながら、科学衛星の長期運用により搭載している電磁界センサの特性に経年変化によるばらつきが生じる場合がある。本稿では、電磁界センサ間のノイズレベルが異なる場合の到来方向推定精度を向上させるノイズ積分核設計法を提案し、その有効性についてシミュレーションで検証する。

2 MRF の観測モデルとノイズ積分核

波動分布関数法では、すべての天頂角 θ 及び方位角 φ の波動のエネルギー方向密度分布 $f(\theta, \varphi)$ を電磁界センサの相関行列 \mathbf{S} から推定する。加えて、MRF では隣接する $f(\theta, \varphi)$ に相関があると仮定し、ノイズレベル ε を $f(\theta, \varphi)$ と同時に推定する。電磁界センサのチャンネル数を D とした場合、MRF の観測モデルは以下で表される。

$$\mathbf{S} = \sum_l f(\theta_l, \varphi_l) \mathbf{A}_K(\theta_l, \varphi_l) + \varepsilon \mathbf{I}_D \quad (1)$$

ここで $\mathbf{A}_K(\theta, \varphi)$ は到来方向 (θ, φ) の波動の振幅・位相特性を理論的に算出した既知量であり、積分核と呼ばれる。また \mathbf{I}_D は D 次の単位行列であり、ノイズ積分核に対応している。すなわち、従来法では全ての電磁界センサのノイズレベルを一律 ε として推定している。

本研究では、電磁界センサのノイズレベルが異なる場合に推定可能な以下 2 通りのノイズ積分核を提案する。

1. 複数のノイズ積分核 $\mathbf{A}_{\varepsilon d} (d = 1, \dots, D)$: $\mathbf{A}_{\varepsilon d}$ は第 d 対角成分が 1, その他が 0 からなる行列である。
2. センサ間のノイズレベルの比からなるノイズ積分核

提案法 1 は、各電磁界センサのノイズレベルを別々に推定する。提案法 2 は、センサ間のノイズレベルの比が既知である条件下で従来法と同様に推定する。

3 シミュレーションによる検証

本研究ではセンサ間のノイズレベルが一律ではない条件下、3 軸直交した電界センサ 3 個及び磁界センサ 3 個から得られる電磁界データ 6 成分の擬似観測信号を用いたシミュレーションで提案法の有効性を検証した。具体的に

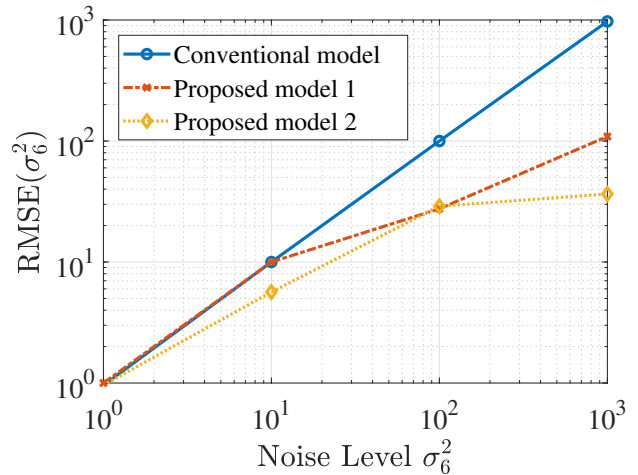


図 1: 磁界成分のノイズレベル σ_6^2 とノイズレベル推定誤差

は、擬似観測信号から算出された \mathbf{S} に MRF モデルを適用し、その際ノイズ積分核で得られるノイズレベル推定結果を確認した。なお、ピーク電力 20 dB, 標準偏差 5 deg のガウス型波源を仮定した。

電磁界 5 成分のノイズレベルを 10 dB に固定した条件下、磁界 1 成分のノイズレベル σ_6^2 を 0 dB から 30 dB まで変化させた場合のノイズレベル推定結果について、その平均平方二乗誤差 (RMSE) を図 1 に示す。従来法ではノイズレベルと RMSE がほぼ一致していることが確認できる。これはノイズ積分核が到来方向推定の際ほとんど機能していないことを意味する。一方提案法 1 及び提案法 2 では、RMSE が従来法と比較してそれぞれ最大 1/10 及び 1/25 に低減していることが確認された。また提案法を適用した場合、従来法と比較して到来方向推定精度が改善していることも確認された。

4 むすび

本稿では、電磁界センサ間のノイズレベルが異なる場合の到来方向推定精度を向上させるノイズ積分核設計法を提案した。提案法を適用することで、センサ間の推定ノイズレベルの誤差が低減し、到来方向推定精度が改善していることをシミュレーション上で確認した。

参考文献

- [1] L.R.O. Storey and F. Lefeuve, "The analysis of 6-component measurements of a random electromagnetic wave field in a magnetoplasma - I. The direct problem," *Geophysical Journal International*, vol.56, no.2, pp.255-269, 1979.
- [2] L.R.O. Storey and F. Lefeuve, "The analysis of 6-component measurements of a random electromagnetic wave field in a magnetoplasma - II. The integration kernels," *Geophysical Journal International*, vol.62, pp.173-194, 1980.
- [3] M. Ota, Y. Kasahara and Y. Goto, "A new method for direction finding based on Markov random field model," *Radio Science*, vol.50, pp.598-613, 2015.