

# Relax イテレーションを用いた BMML アルゴリズムの提案と評価

## Evaluation of BMML Algorithm using Relax Iteration

B-2 山口 和樹 渡辺 一宏 秋田 学 稲葉 敬之  
 Kazuki Yamaguchi Kazuhiro Watanabe Manabu Akita Takayuki Inaba

電気通信大学 知能機械工学科

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

### 1. まえがき

筆者らはレーダ変復調方式として、狭受信帯域にて遠距離性と高分解能性を両立し、多目標分離能力に優れた多周波ステップ CPC 方式[1]を提案している. より広帯域化にある電波法動向を踏まえ、複数の多周波ステップ CPC レーダ出力をコヒーレント合成し、さらなる高距離分解能をめざす離隔周波数合成測距方式 [2]の検討を行っている. 上記離隔周波数合成測距方式を単一の多周波ステップ CPC レーダへ適用した場合、レーダ間の目標毎複素振幅推定処理が省略され、BM(blocking matrix)減算による信号分離と BM を考慮した最尤推定およびそれらの二重イテレーション(relax)という処理アルゴリズムとなる.

本稿では計算機シミュレーションにより、多目標環境における多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理入力データに本アルゴリズムを適用した場合の距離推定標準偏差と Cramer-Rao Lower Bound(CRB)[3] の比較評価を実施しその有効性を示す.

### 2. 受信信号モデル

合成帯域レーダ(周波数ステップ数 $N$ ,周波数ステップ幅 $\Delta f$ )で出力される合成帯域前の周波数ステップ方向の信号 $Z(n)$ は式(1)で表される. なお, 簡単のためここではパルスドップラフィルタにより, 目標相対速度に関する位相項が除去できているものとする.

$$z_n = \sum_{k=0}^{K-1} \left\{ s_k \exp \left[ \frac{-4\pi j R_k}{c} (fc + n\Delta f) \right] \right\} + ns_n \quad (1)$$

$fc, n, k, s_k$ , および $R_k$ は搬送波周波数, 周波数ステップ番号, 目標番号, 目標ごとの複素振幅, 目標ごとの距離にそれぞれ対応し,  $ns_n$ はガウス雑音である. また, 基準周波数 $fc$ と目標距離 $R$ で定義されるモードベクトル $\mathbf{a}(R) \in \mathcal{C}^N$ (式(2))とそれらを全目標数並べた行列 $\mathbf{A} \in \mathcal{C}^{N \times K}$ (式(3))から受信信号ベクトル $\mathbf{z} \in \mathcal{C}^N$ は式(4)のようになる.

$$\mathbf{a}(R) = \begin{bmatrix} \exp(-j4\pi(fc)R/c) \\ \exp(-j4\pi(fc + \Delta f)R/c) \\ \vdots \\ \exp(-j4\pi(fc + (N-1)\Delta f)R/c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(R_0), \mathbf{a}(R_1), \dots, \mathbf{a}(R_{K-1})] \quad (3)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{ns} \quad (4)$$

### 3. 提案法の処理フロー

提案法の処理フローを図 1 に示す.

「BM(blocking matrix)減算による信号分離」では, 受信信号 $\mathbf{z}$ に対し Blocking Matrix ( $\mathbf{BM}_i$ )を用いて波形減算を行う.

「BM を考慮した最尤推定」は, Blocking Matrix の波形減算を考慮したステアリングベクトル( $\mathbf{b}_i(\mathbf{r})$ )を用いた最尤推定を行い, 推定距離を用いて信号複素振幅( $\mathbf{s}$ )推定には減算前の受信信号 $\mathbf{z}$ を用いることを特徴としている.

さらに, 上記減算, 距離と複素振幅推定の処理を二重イテレーション構造をもつフローとする. すなわち, 目標数( $K$ )を 1 と仮定( $K=1$ )から始め,  $K$  個の目標の距離推定を収束するまで行い, 順次 $K=2$ から $K=K_{max}$ までの目標距離推定を行うという二重イテレーション構造(Relax)を採用している. この二重イテレーションにより, 電力の大きい目標の距離推定誤差が, 電力の小さい目標の距離推定へ与える影響を回避することが期待される.

なお, 合成帯域処理入力データ(1)は CW となるため上記の提案法は, より基本的なスペクトル推定法に帰着されるため, 各種応用が可能である.

For  $K = 1, 2, \dots, K_{max}$

repeat

for  $k = 0, 1, \dots, K-1$

$i = K - k$

$$\mathbf{BM}_i = \left( \mathbf{I} - \sum_{m, m \neq k}^K \frac{\mathbf{a}(\hat{R}_m)\mathbf{a}(\hat{R}_m)^H}{\mathbf{a}(\hat{R}_m)^H\mathbf{a}(\hat{R}_m)} \right)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{BM}_i \cdot \mathbf{z}$$

$$\mathbf{A}'(\mathbf{r}) = [\mathbf{a}(\hat{R}_0), \dots, \mathbf{a}(\hat{R}_{i-1}), \mathbf{a}(\mathbf{r}), \mathbf{a}(\hat{R}_{i+1}), \dots, \mathbf{a}(\hat{R}_{K-1})]$$

$$\mathbf{b}_i(\mathbf{r}) = \mathbf{BM}_i \mathbf{A}'(\mathbf{r}) \hat{\mathbf{s}}$$

$$\hat{R}_i = \operatorname{argmax}_{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{b}_i(\mathbf{r})^T \hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i^T \mathbf{b}_i(\mathbf{r})}{\mathbf{b}_i(\mathbf{r})^T \mathbf{b}_i(\mathbf{r})}$$

$$\hat{\mathbf{s}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \cdot \mathbf{z}$$

end for

until (convergence)

end for

図 1. 提案法の処理フロー

### 4. シミュレーション

表 1, 2 に示す条件で 1 目標, 2 目標に関して SN=20dB から SN=5dB まで変化させシミュレーションを実施した. ここでは, 目標間距離は送信周波数帯域幅で決まる距離分解能の 3/4 とする. 本条件においてノイズの種を変えて, 1 目標, 2 目標に対してそれぞれ 100 回, 50 回試行した結果について, 各目標の推定値の標準偏差の SN 依存性を図 2 に示す. 図2の縦軸は距離アンビギュイティで規格化した標準偏差である. 比較対象の CRB は[3]式(4.1)を用い複数目標に関して考慮した CRB を用いている. 図 2 より, SN20 において 1 目標条件の場合標準偏差が CRB の 1.02 倍, 2 目標条件の場合, 目標 1, 2 はそれぞれ 1.21, 1.20 倍と理論値に近い値を示していることを確認した.

表 1. レーダパラメータ

|               |      |               |       |
|---------------|------|---------------|-------|
| 送信帯域幅(MHz)    | 430  | スナップショット数     | 1     |
| 搬送波数(GHz)     | 79   | ステップ数         | 32    |
| 周波数ステップ幅(MHz) | 13.4 | アンビギュイティ距離(m) | 11.16 |

表 2. 目標パラメータ

|        |       |            |      |
|--------|-------|------------|------|
| 分解能(m) | 0.349 | 目標 1 真値(m) | 5    |
| 目標電力   | 1     | 目標 2 真値(m) | 5.26 |

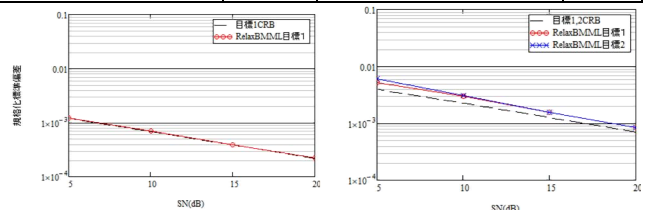


図 2. 各目標の距離推定値の標準偏差の SN 依存性 (左:1 目標条件 右:2 目標条件)

### 5. おわりに

本稿では, 多周波ステップ CPC レーダの合成帯域処理入力データに本アルゴリズムを適用した場合の距離推定標準偏差と Cramer-Rao Lower Bound の比較評価を実施しその有効性を示した. 今後の課題として, EM, SAGE アルゴリズムとの比較を進める.

### 参考文献

- [1] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, ”多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験”, 電気学会論文誌 C, Vol. 135 (2015) No. 3, pp.285-291, 2015.
- [2] 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, ”離隔周波数帯受信信号を用いた広帯域コヒーレント合成による 高分解能測距方式の検討”, 信学技報, vol.117, no.346, WBS2017-67, pp.179-184,2017年12月
- [3]Petre Stoica, Arye Nehorai ”MUSIC, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound” IEEE TRANSACTIONS ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, VOL 17, NO 5, MAY 1989

### 謝辞

本研究は総務省 SCOPE(受付番号 175003002)の委託を受けたものです.