フェーズドアレイ気象レーダのための
時空間的特徴を利用した高精度ビームフォーミング

HIGH-ACCURACY BEAMFORMING USING TEMPORAL AND SPACIAL FEATURE FOR PHASED ARRAY WEATHER RADAR

滝本 健人 [1] Kento Takimoto　　北原 大地 [1] Daichi Kitahara　　平林 晃 [1] Akira Hirabayashi　　牛尾 知雄 [2] Tomoo Ushio

立命館大学 情報理工学部 [1] College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

大阪大学 大学院工学研究科 [2] Graduate School of Engineering, Osaka University

1　はじめに

フェーズドアレイ気象レーダ (PAWR) では，雨滴などの分布型標的に対して指向性が弱いパルス波を L 回送信し，様々な仰角方向から到来する散乱信号をアレイアンテナで同時に観測する．得られた混合信号をビームフォーミング (BF) 技術によって，仰角ごとの散乱信号に分離する [1]．対象仰角区間 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ の分割数を M で表し，各方向からの散乱信号を行列 $X \in \mathbb{C}^{M\times L}$ で表現する．アンテナ素子数を N で表し，混合行列を $S \in \mathbb{C}^{N\times M}$，観測信号行列を $Y \in \mathbb{C}^{N\times L}$，雑音行列を $V \in \mathbb{C}^{N\times L}$ で表せば $Y = SX + V$ が成立する．Y から X を推定する問題が BF である．よく用いられているフーリエ BF などは，観測信号と固定重みベクトルとの複素内積により X を推定する線形手法であり，散乱体が数多く存在する分布型標的では十分な精度を実現できない．この問題を解決するために，分布型標的の散乱信号が持つ性質を巧みに利用した非線形 BF 手法が提案されている [2]．この手法の精度を更に向上させるために本論文では，散乱信号の周波数領域での特徴をより詳細に考慮してコスト関数を再定義し，それを最小化することによって X を推定する BF 手法を提案する．実データを模倣した計算機シミュレーションにより，提案法の有効性を示す．

2　分布型標的の散乱信号の特徴を利用した非線形 BF [2]

分布型標的の散乱信号には，電力スペクトル密度の狭帯域性と時間的連続性という 2 種類の性質がある．文献 [2] では，これらの性質をグループ ℓ_1 ノルムで評価し，データ整合性を加えたコスト関数の最小化問題

$$\widehat{X} = \operatorname*{argmin}_{X\in\mathbb{C}^{M\times L}} \frac{1}{2}\|Y - SX\|_{\mathrm{F}}^2 + \lambda_0\|X\|_1^{G_0} + \lambda_1\|BFX^{\mathrm{T}}\|_1^{G_1} \quad (1)$$

を定義した．ここで $B \in \mathbb{R}^{bL\times L}$ は要素数 b のブロックを抽出する行列，$F \in \mathbb{C}^{L\times L}$ は正規化された離散フーリエ変換，$\|\cdot\|_{\mathrm{F}}$ はフロベニウスノルム，$\|\cdot\|_1^{G_0}, \|\cdot\|_1^{G_1}$ は適宜決定したグループ ℓ_1 ノルム，$\lambda_0, \lambda_1 > 0$ は各正則化項の重みを調整するパラメータである．式 (1) は凸最適化問題であり，ADMM を用いて解くことにより BF を行う．

3　隣接仰角間の類似性も利用した非線形 BF

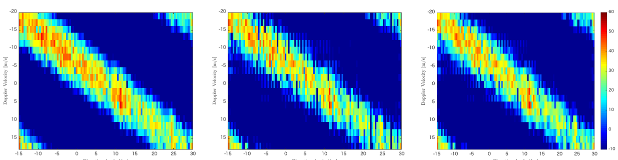
分布型標的の散乱信号には，上記 2 種類の性質の他に，平均風速に相当する平均ドップラー周波数が隣接仰角間において類似した値をとるという性質がある．この性質は，式 (1) の第 2 項が意味する時間的連続性より強力である．そこで提案法では，第 2 項を削除して新たな正則化項を導入する．更に，この新しいコスト関数を周波数領域の行列 $U = FX^{\mathrm{T}}$ を用いて表現し直し，最小化問題

$$\widehat{U} = \operatorname*{argmin}_{U\in\mathbb{C}^{L\times M}} \frac{1}{2}\|YF - SU^{\mathrm{T}}\|_{\mathrm{F}}^2 + \lambda_1\|BU\|_1^{G_1} + \lambda_2\|CU^{\mathrm{T}}\|_1^{G_2} \quad (2)$$

を定義する．ここで，$C \in \mathbb{R}^{cM\times M}$ は要素数 c のブロックを抽出する行列である．提案法は，式 (2) の凸最適化問題を ADMM を用いて解くことにより，BF を行う．

4　計算機シミュレーション

大阪大学吹田キャンパスに設置された PAWR を利用した．アンテナ素子数 $N = 128$，パルス数 $L = 20$，送信波波長 0.0318 [m]，素子間隔 0.0165 [m]，パルス反復時間 0.0004 [s] である．このレーダで 2013 年 6 月 19 日に観測されたデータにおいて，第 30 方位角，距離 7.5 [km] の地点のレーダ反射因子を利用した．仰角 $\theta_{\min} = -15$ [deg] から $\theta_{\max} = 30$ [deg] の 55 個のデータを 3 次スプライン補間した後に，微小雑音を加えた．さらに，10 以下の値を 10 に置き換えることで，$M = 110$ 個の真の平均電力密度を作成した．観測雑音の分散は 5 とした．平均ドップラー周波数は，図 1(a) のようにナイキスト周波数の範囲内で直線的に推移するようにし，周波数幅は 125.7 [Hz] に固定した．提案法において，$b = c = 3$，$\lambda_1 = 0.1$，$\lambda_2 = 0.05$ であり，ADMM で 2000 回の反復計算を行った．推定結果を図 1 に示す．正規化誤差 $100\|\widehat{U} - U\|_{\mathrm{F}}/\|U\|_{\mathrm{F}}$ [%] は従来法で 67.09 % であったが，提案法では 64.70 % に改善された．また，従来法では存在していた複数仰角における信号欠落の問題が，提案法では解消できていた．



(a) 推定対象 U　　(b) 従来法 [2]　　(c) 提案法

図 1: 周波数領域における散乱信号推定結果

参考文献

[1] E. Yoshikawa *et al.*, "MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51(5), pp. 3077–3088, 2013.

[2] D. Kitahara *et al.*, "Nonlinear beamforming via convex optimization for phased array weather radar," in *Proc. APSIPA ASC*, Honolulu, HI, 2018, pp. 1831–1835.