

疑似波面最適化による複雑形状物体の高分解能イメージング手法

A High-Resolution Imaging Method for Complex-Shaped Target Shapes by Optimization of Quasi-Wavefronts

阪本 卓也 松本 浩志 佐藤 亨
Takuya Sakamoto Hiroshi Matsumoto Toru Sato

京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻
Dept. of Communications and Computer Eng., Kyoto University

1 はじめに

UWB (超広帯域) レーダは室内等の近距離の距離測定を高い分解能で実現するため、ロボットや防犯システムのセンサのひとつとして有望である。UWB レーダのための高速画像化手法である SEABED 法は目標が明瞭な境界を有するという条件の元で、目標形状と受信信号の等位相面の間に成り立つ可逆変換を用いて高速処理を実現する [1]。この信号の等位相面は疑似波面と呼ばれ、SEABED 法はこの疑似波面が正確に推定されることを前提としている。しかし、目標が複数ある場合や複雑な形状の場合には散乱波が互いに干渉し、疑似波面を正確に推定することができず、SEABED 法による画像化が困難である [2]。本稿では最適化問題により疑似波面推定を行い、散乱波の干渉が生じる場合でも動作する画像化手法を提案する。

2 SEABED 法と疑似波面

本稿では無指向性 UWB アンテナを走査するモノスタティックレーダシステムを扱い、2次元問題を仮定する。アンテナの位置 $(x, y) = (X, 0)$ で測定される受信信号に整合フィルタを適用したものを $s(X, Y)$ とする。ここで位置の変数はそれぞれ中心波長 λ で正規化されている。但し、 Y は遅延時間 t 及び波の速度 c を用いて $Y = ct/(2\lambda)$ とする。SEABED 法は $s(X, Y)$ から各アンテナ位置 X において散乱波の遅延時間に相当する距離 Y を推定する。この曲線 (X, Y) を疑似波面と呼び、疑似波面 X, Y から目標形状 x, y への変換である逆境界散乱変換 [1] を用いて目標形状 (x, y) を推定する。従来の SEABED 法はこの疑似波面 (X, Y) の推定において信号 $s(X, Y)$ の極値を順次接続することで計算していた。しかし、この方法では信号が干渉している場合には正しく推定することができない。

3 提案疑似波面推定法

この問題を解決するために、Hantscher ら [3] は各 X に対して $s(X, Y)$ の最大値を選択し、仮定した散乱波形を差引き、その残差に対して再び最大値を選択するという手順を繰り返す手法を提案している。しかし、この手法も干渉が多い場合には最大値の位置と実際の散乱波の位置が一致せず、動作しない。本稿では [3] と同様に散乱波形 $p(Y)$ を仮定し、次式で定める評価関数 $e(V)$ を

最小化する最適化問題により疑似波面を定める。

$$e(V) = \iint \left| s(X, Y) - \sum_{i=1}^N p(Y - q(X, \mathbf{v}_i)) \right|^2 dXdY \quad (1)$$

ただし N は想定する疑似波面の数であり、 $p(Y)$ は仮定する散乱波形である。また、 V は疑似波面を定めるパラメータ行列であり、 i 番目の疑似波面 $q(X, \mathbf{v}_i)$ を定める列ベクトル \mathbf{v}_i により $V = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N]$ と定義する。 $q(X, \mathbf{v}_i)$ は $\mathbf{v}_i = [Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,M}]^T$ に対して $(X_1, Y_{i,1}), (X_2, Y_{i,2}), \dots, (X_M, Y_{i,M})$ を通る曲線であり、3 次の B スプライン曲線により補間して得る。ここで X_1, X_2, \dots, X_M は実際のアンテナ走査範囲 $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$ から等間隔に選び固定する。凸形状の目標に対しては疑似波面が滑らかとなるため、こうして一般の関数である疑似波面を M 点の離散点で表現することにより最適化問題の次元を低く抑える。

最適化アルゴリズムとしては遺伝的アルゴリズムを個体数 1 に簡略化した不規則探索法を用いる。各 \mathbf{v}_i に対して 25% の確率で $0 < m < M$ 個のパラメータを不規則に選択し、一様乱数で置き換える。加えて各反復で 2% の確率で \mathbf{v}_i と \mathbf{v}_j の一部の要素を入れ替える (交叉)。この交叉により局所解に収束することを防ぐことを試みる。

4 多干渉条件下での従来法によるイメージング

図 1 に示す目標形状を想定し、各手法によるイメージング性能を比較検討する。想定する目標に対して x 軸上をアンテナ走査して得られる受信信号 $s(X, Y)$ を図 2 に示す。散乱波形としてモノサイクルパルスを用い、伝搬にはボルン近似幾何光学散乱を仮定し、S/N は 35dB である。同図には真の疑似波面が破線で示されている。疑似波面間の距離が散乱波形の波長よりも短いために疑似波面に対応するピーク位置が確認できない。

図 3 に従来の SEABED 法により推定される疑似波面を丸印で示す。散乱波形の干渉により、極値を順次接続することで疑似波面を推定する従来の SEABED 法は正常に機能していないことがわかる。従来の SEABED 法による推定画像を図 4 に示す。疑似波面の推定誤りにより形状推定も全く機能しないことがわかる。

5 多干渉条件下での提案法によるイメージング

図 5 に提案法による評価値 $e(V)$ の最小化の経過を示す。ただし、ここでは疑似波面数 $N = 4$ は既知としている。今回は反復回数を 40,000 回とし、正規化評価値で 0.2% まで最適化されていることがわかる。図 6 に提

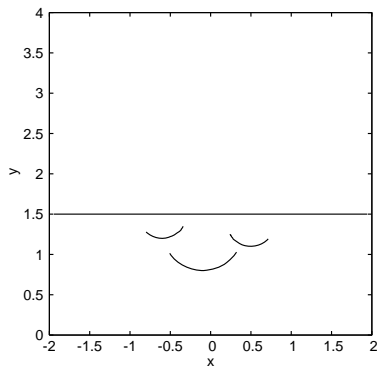


図 1 真の目標形状

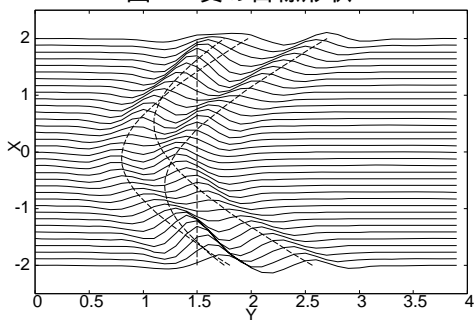


図 2 真の疑似波面と受信信号 $s(X, Y)$

案法により推定される疑似波面を示す．同図より提案法によりほぼ正確に疑似波面を推定できていることがわかる．推定疑似波面に逆境界散乱変換を適用して推定される画像を図 7 に示す．同図より、複数の近接した目標の形状を高精度かつ高分解能に推定できていることがわかる．提案疑似波面推定法を導入した拡張 SEABED 法は簡単な制約の元で、従来法では得られない高い分解能でのレーダイメージングを実現することがわかる．今後は同手法を改良し、必要な反復回数を減らす高速化により高速処理と高分解能性能の両立を図ることが必要である．

参考文献

- [1] T. Sakamoto and T. Sato, IEICE Trans. on Commun. vol. E87-B, no. 5, pp. 1357–1365, 2004.
- [2] 関 鷹人, 木寺正平, 阪本卓也, 佐藤 亨, 上原康生, 山田直之, 信学技報, SNAE2006-141, 2007.
- [3] S. Hantscher *et al.* Proc. 2007 IEEE Intl. Conf. Ultra-Wideband, W04, 2007.

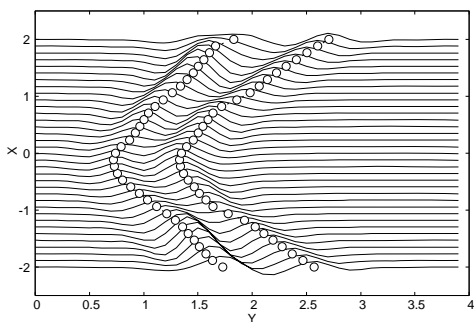


図 3 従来の SEABED 法による推定疑似波面

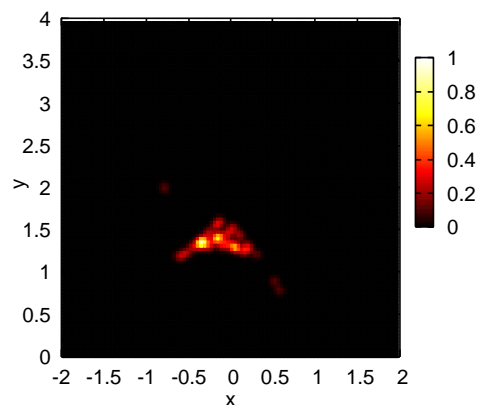


図 4 従来の SEABED 法による推定画像

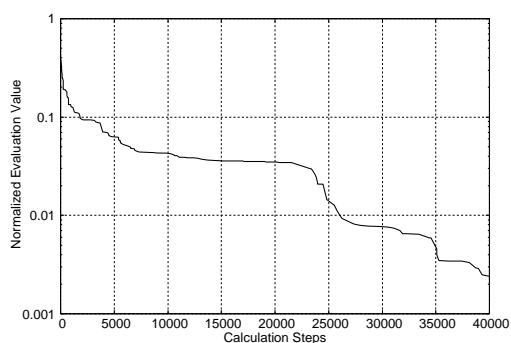


図 5 提案法の反復回数と評価値の関係

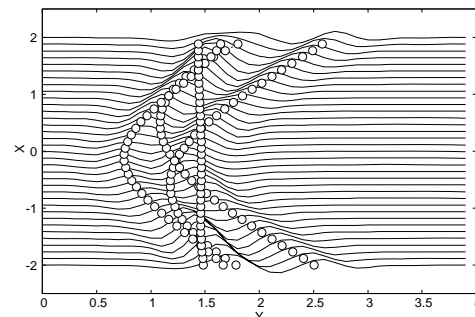


図 6 提案する疑似波面最適化による推定疑似波面

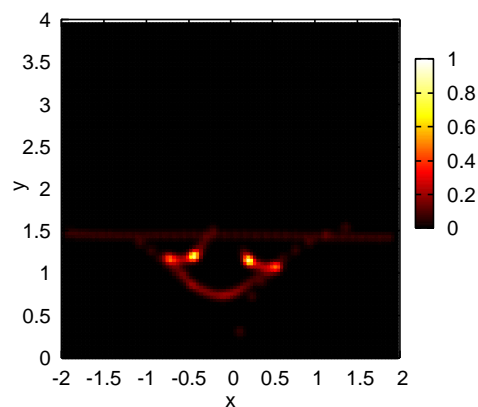


図 7 提案法による推定画像