

複雑目標境界のための角度ファジィ推定を用いた UWB レーダ高速画像化手法

High-Speed UWB Radar Imaging Algorithm with Fuzzy Function for Complex Boundary

木寺 正平 阪本 卓也 佐藤 亨
Shouhei Kidera Takuya Sakamoto Toru Sato

京都大学大学院 情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

1 はじめに

アンテナ鏡面，航空機体等の非接触精密計測として UWB パルスレーダが有望である．同レーダは，ロボットや自動車等の不可視領域における目標認識及び位置校正技術にも適する．従来の画像化技術は合成開口処理及び反復改良等に基づき，実時間処理を要する上記用途には不適切である．これに対し，高速目標形状推定法として Envelope 法を提案している [1]．同手法は到来波面の点群から物体境界点群への写像を用いて，比較的単純な形状の目標に対しては，雑音環境下で高速かつ安定な形状推定を実現する．しかし同手法は画像化の前処理において，到来波面の適切な連結を必要とする．複雑な目標境界の場合，複数干渉波に起因する不適切な波面連結が生じ，同手法の形状推定誤差は著しく増大する．本稿では到来角度をファジィ関数を用いて推定し，波面連結に基かない形状推定法を提案する．同手法は観測距離点群から目標境界点群への直接的な写像を可能にし，従来法の不安定性を本質的に解決する．数値計算により本手法の特性評価を示す．

2 システムモデル

図 1 上にシステムモデルを示す．明瞭な境界を有する目標物体を仮定する．伝搬速度は既知かつ一定とする．送信電流はモノサイクルパルスとし，その中心波長 λ で空間を正規化する．無指向性送受信素子を x 軸上で走査する．素子及び目標物体が存在する空間を r 空間とし， (x, z) で表わす．目標は $z > 0$ に存在すると仮定する．素子位置を $(x, z) = (X, 0)$ とする． $s(X, Z')$ を受信電界波形に Wiener フィルタを適用した出力とする．但し $Z' = ct/2\lambda$ ， t は時間， c は光速である．各 X に対し， $s(X, Z')$ の設定閾値を越える極大値を求め，これを Z とする． (X, Z) の曲線を擬似波面と呼び，これを d 空間と定義する． d 空間から r 空間への変換が，目標境界抽出に対応する．図 1 に r 空間と d 空間の関係を示す．

3 従来手法

高速目標境界推定法として SEABED 法を提案している [2]．同手法は擬似波面の点 (X, Z) から物体境界の点 (x, z) への逆境界散乱変換 (IBST)

$$\left. \begin{aligned} x &= X - Z\partial Z/\partial X \\ z &= Z\sqrt{1 - (\partial Z/\partial X)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

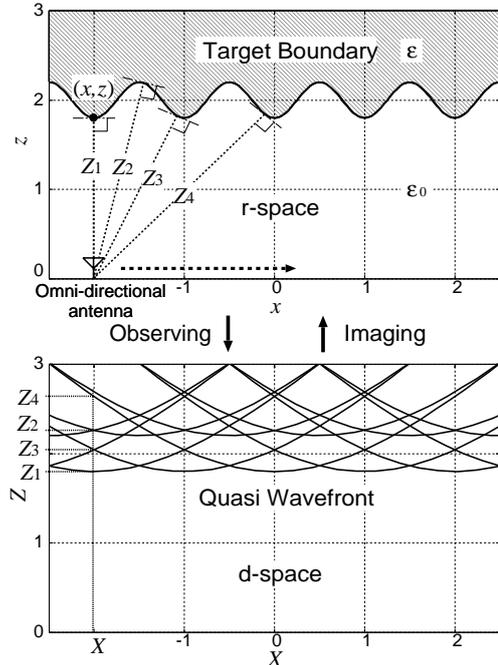


図 1 目標境界 (上) と擬似波面 (下) の対応関係

を用いて高速な目標境界推定を実現する [2]．しかし目標境界が多数の凹凸面を有する場合，同手法の推定誤差は増大する．図 1 上に示す目標境界を仮定する．図 2 に受信波形画像及び抽出される擬似波面を示す．図 3 に SEABED 法による推定点群を示す．同図から推定点群が発散し，目標境界推定が困難であることがわかる．これは，干渉波に起因する Z の推定誤差が式 (1) の微分 $\partial Z/\partial X$ により強調されるためである．

波面微分を用いない高速画像化手法として Envelope 法を提案している [1]．同手法では物体境界がアンテナ位置を中心とし， Z を半径とした円の外または内包絡線上に存在するという原理を用いる．適切に連結される擬似波面の点群に対して次式で物体境界領域 (x, z) を求める．

$$\left. \begin{aligned} \max_{\nu_X(X'-X)<0} x_p(X') \leq x \leq \min_{\nu_X(X'-X)>0} x_p(X') \\ z = \sqrt{Z^2 - (x - X)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但し $x_p(X')$ は (X, Z) と (X', Z') から定まる 2 円の交点の x 座標であり， X' は探索変数である．符号 $\nu_X = \text{sgn}(\partial x/\partial X)$ は微分を用いずに推定可能である．同手法は，擬似波面の点群から目標境界の点群への写像を可能

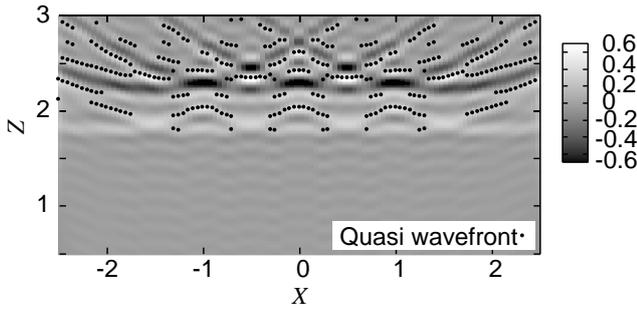


図 2 受信波形画像と抽出される擬似波面

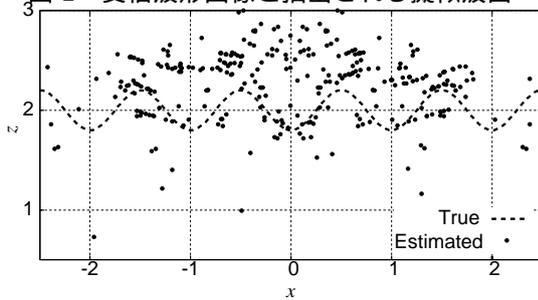


図 3 SEABED 法を用いた推定像

にし、波面微分に起因する不安定性を解決する。しかし複雑目標の場合には、同手法による推定は不安定となる。図 4 にその推定像を示す。同図の推定誤差は、擬似波面点群の不適切な連結に起因する。複数の散乱中心が存在する、複雑または複数目標からの受信信号には多数の干渉波が混在する。この時、全ての擬似波面を適切に連結することが困難となり、誤連結に起因する推定誤差が増大する。また波面連結を用いない形状推定法として合成開口処理や 2 次元フーリエ変換等があるが、何れも膨大な計算時間を要する。

4 提案手法とその特性

前節の問題点を解決するため、本稿では角度ファジィ推定を用いた高速画像化手法を提案する。目標境界点 (x, z) は、 (X, Z) から定まる円上に存在し、到来角度推定が境界点推定に相当する。同円と他の擬似波面 (X_i, Z_i) で定まる円の交点を求め、その角度を $\theta(X_i, Z_i)$ と定義する。到来角度 θ に関するメンバシップ関数を以下で与える。

$$f(\theta, X_i, Z_i) = e^{-\frac{\{\theta - \theta(X_i, Z_i)\}^2}{2\sigma_\theta^2}} \quad (3)$$

同手法は (X_i, Z_i) が適切な擬似波面に沿って移動する場合、 $\theta(X_i, Z_i)$ が真の到来角へ収束するという原理を用いる。図 5 に交点の軌道と目標境界の関係を示す。各擬似波面 (X, Z) に対して以下で到来角度 θ_{opt} を推定する。

$$\theta_{opt} = \arg \max_{\theta} \left\{ \sum_i s(X_i, Z_i) f(\theta, X_i, Z_i) e^{-\frac{(X-X_i)^2}{2\sigma_X^2}} \right\} \quad (4)$$

$x = X + Z \cos \theta_{opt}$, $z = Z \sin \theta_{opt}$ により目標境界を推定する。但し σ_X , σ_θ は定数である。本手法は擬似波面上の点群から目標境界上の点群への直接的な写像を可

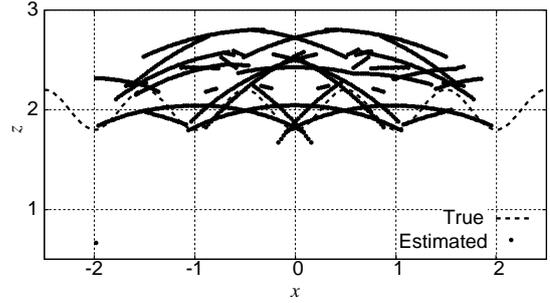


図 4 Envelope 法を用いた推定像

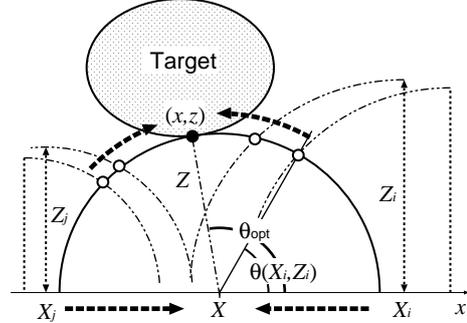


図 5 円の交点軌道と目標境界の関係

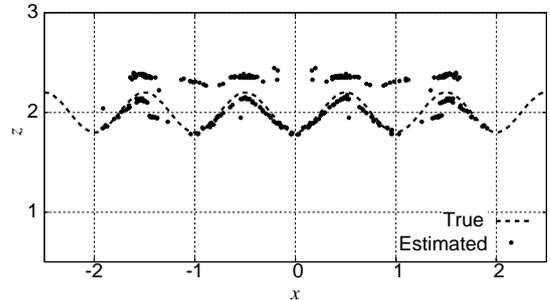


図 6 提案手法を用いた推定像

能にし、擬似波面の連結が不要である。このため、従来法の波面連結に起因する不安定性を本質的に解決する。また式 (4) 右辺の評価値は交点が集中する場合に増大し、散乱強度の小さい点目標も推定可能である。

図 6 に提案法による推定像を示す。但し雑音は考慮しない。 $\sigma_X = 1.0\lambda$, $\sigma_\theta = \pi/50$ とする。同図の通り、提案法は安定な目標境界推定を実現し、従来の形状推定誤差を飛躍的に改善することが可能である。計算時間は約 0.2 秒であり、実時間処理に適する。また同手法は鏡面や複数点目標が混在する場合でも、適用可能であることを確認している。しかし、非常に多数の干渉波が観測される場合では、提案手法による境界推定は不安定となり、これを解決することが今後の課題となる。また単純形状推定では、計算量、精度の点で Envelope 法が優れる場合があり、目的用途に応じた選択が必要である。

参考文献

[1] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.7, pp. 1801-1809, July, 2007.
 [2] T. Sakamoto and T. Sato, *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.5, pp. 1357-1365, 2004.