

適応的部分境界散乱変換による UWB パルスレーダのための高精度形状推定法

阪本卓也*, 佐藤 亨 (京都大学)

An Accurate Shape Estimation Method

with the Adaptive Fractional Boundary Scattering Transform for UWB Pulse Radars

Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

Abstract

The UWB pulse radars are promising as an environment measurement method for autonomous cars and rescue robots. Radar imaging of a nearby target is known as one of ill-posed inverse problems, for which a various studies have been done. However, conventional algorithms require long computational time, which makes them difficult to apply to a realtime operation of robots. We have proposed a fast algorithm of radar imaging, SEABED algorithm, for UWB pulse radars. This algorithm is based on a reversible transform, BST (Boundary Scattering Transform), between the target shape and the observed data. This transform enables us to estimate target shapes quickly and accurately in a noiseless environment. However, the estimated image by SEABED algorithm is degraded in a noisy environment because BST utilizes the differential operation. In order to solve this problem, we expanded BST and proposed a stabilization method with FBS (Fractional Boundary Scattering Transform). This method can improve the accuracy of the shape estimation to some extent. This method assumes that the fractional transform parameter is constant for any signals. In this paper, we derive the optimum parameter depending on the received signals. We propose a shape estimation method which adaptively select the parameter, and show that this method can achieve better accuracy than the conventional one.

キーワード：適応的部分境界散乱変換，UWB パルスレーダ，形状推定，安定化

(adaptive fractional boundary scattering transform, UWB pulse radar, shape estimation, stabilization)

1. はじめに

将来に実現が期待される自動走行車やロボットなどに必要な状況測定手法として UWB パルスレーダは有望な候補の一つである。レーダによりアンテナ近傍の物体形状を推定する問題は設定不適切逆問題の一種として知られ、多くの手法が提案されてきた [1] ~ [8]。これらの従来手法は反復計算に基づくために長い計算時間が必要であり、ロボットなどのリアルタイム用途への応用は困難であった。この計算時間の問題を解決するために、我々は境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform; 以下 BST と略す) に基づいた高速な形状推定法を提案してきた [9] ~ [14]。このアルゴリズムは SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) と呼ばれ、目標形状とデータの間になり立つ可逆な変換関係である境界散乱変換により、反復に基づくことなく目標形状をデータから直接推定できる特徴を有する。この境界散乱変換は受信信号から推定される疑似波面と呼ば

れる曲線の微係数を用いるために、雑音環境下では推定像が劣化するという問題があった。そこで、可逆な変換である境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を導入し、実空間とデータ空間の間の部分変換空間での平滑化により安定に形状を推定する手法を提案した [15]。単純に実空間やデータ空間で平滑化する場合には形状によっては大きな誤差を生じるが、部分変換空間での平滑化を行うことで形状に依存せずに誤差を小さくすることが可能である。部分変換空間は部分変換パラメータを変化させることで実空間からデータ空間まで連続的に定義することができる。しかし、これまでは部分変換パラメータを一定値として処理を行ってきた。本稿では受信信号の特徴に応じて最適な部分変換パラメータが存在することを示し、適応的に部分変換パラメータを変化させる適応的部分境界散乱変換による平滑化手法を提案する。提案手法によりパラメータを固定させる場合と比べて形状推定精度が大きく改善することを示す。

2. システムモデル

本稿ではモノスタティックレーダシステムを扱う．無指向性アンテナを走査しながらモノサイクルパルスの送受信を繰り返すことで得られる受信波を A/D 変換し，メモリ内に保存する．得られるデータから信号処理により目標の形状を推定する．本稿では 2 次元問題を扱い，電波の伝播は TE 波とする．目標及びアンテナは，図 1 上図に示すように平面内に存在すると仮定し，目標は明瞭な境界を有し，均一な誘電率を有する物体であると仮定する．目標及びアンテナが存在する空間を実空間と呼ぶ．実空間の点を (x, y) で表現する．ここで x 及び y はいずれも真空中での送信パルスの中心波長 λ により正規化する．但し $y > 0$ とする．アンテナの走査は実空間の x 軸上とする．アンテナの位置 $(x, y) = (X, 0)$ での受信電界を $s'(X, Y)$ と定義する．但し， Y は送信からの時間 t 及び真空中の光速 c を用いて $Y = ct/(2\lambda)$ と定義する． $y > 0$ であるため， $Y > 0$ が成り立つ．但し，アンテナの位置における電界の瞬時包絡線が最大となる時刻を $t = 0$ とする．雑音除去を目的として $s'(X, Y)$ の Y 方向に送信波形を用いた整合フィルタを適用することで得られる受信波形を新たに $s(X, Y)$ と呼び，処理に用いる． (X, Y) で表現される空間をデータ空間と呼ぶ．図 1 下図は，上図の物体形状に対するデータ空間の例を示す．この曲線を疑似波面と呼ぶ．ここで X 及び Y はそれぞれ送信パルスの中心波長及び送信パルスの中心周期で正規化されている．本稿では $s(X, Y)$ を用いて目標形状を推定する問題を扱う．データ空間から実空間への変換は形状推定に他ならない．

3. SEABED アルゴリズム

3.1 境界散乱変換と逆変換

本節では SEABED 法を簡単に説明する．SEABED 法は目標形状とパルスの遅延時間の間に成り立つ可逆な変換関係が存在することを利用した手法である．SEABED 法は目標形状を逆変換により直接的に推定可能であり，その解は数学的に逆問題の正確な解となっている．SEABED 法は疑似波面と目標形状の間の可逆な変換関係が存在することを利用した手法である．電磁波の伝播速度は既知であるとする．本稿では簡単のため，目標からの散乱波の伝播経路は全て真空であるとする．

2 次元の境界散乱変換は次式で表わされる [9] ．

$$X = x + ydy/dx \quad (1)$$

$$Y = y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \quad (2)$$

ここで (X, Y) の軌跡は前節で述べた疑似波面に相当する． (x, y) は目標境界面上の点であり， $y > 0$ 及び $Y > 0$ を仮定する．

境界散乱変換の逆変換は次式で表わされる．

$$x = X - YdY/dX \quad (3)$$

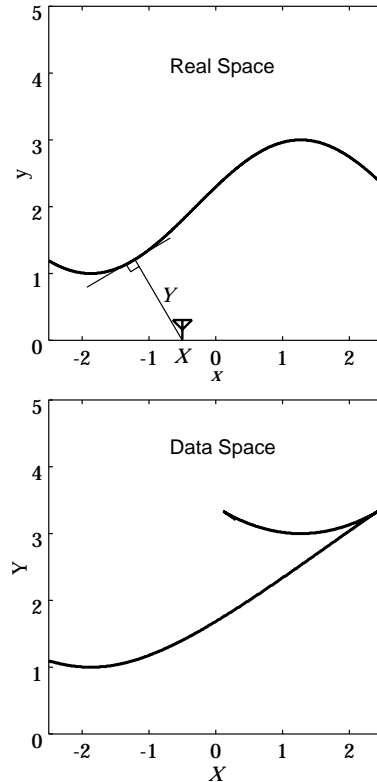


図 1 目標境界と疑似波面の例

Fig. 1 An example of a target shape and quasi wavefronts.

$$y = Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2} \quad (4)$$

式 (4) の y が実数となる条件より $|dY/dX| \leq 1$ が満たされる必要がある．この条件は疑似波面を推定する際に手がかりとして使用することができる．式 (3) 及び (4) を逆境界散乱変換 (Inverse Boundary Scattering Transform; 以下 IBST と略す) と呼ぶ．

SEABED 法では最初に， $s(X, Y)$ から疑似波面の抽出を行なう．疑似波面は $ds(X, Y)/dY = 0$ 及び $|dY/dX| \leq 1$ の条件を満たすように選ぶ．後者の条件は式 (4) の Y が実数となるために必要である．更に，干渉波を防ぐ目的で条件 $|s(X_i, Y_i)/s(X_{i+1}, Y_{i+1})| < T_r$ を課す．ここで (X_i, Y_i) 及び (X_{i+1}, Y_{i+1}) は隣合う疑似波面上の点である．この条件は同一の疑似波面内での大きな振幅変化を除外するために導入したものである．疑似波面として点集合 (X, Y) を逐次抽出し，大きな電力を有するものを選択し，不要成分を除去する．最後に，抽出した疑似波面に IBST を適用し，目標形状を推定する．図 2 に SEABED 法の概要を示す．

以上で述べた手法は雑音が無視しうる環境下では有効に動作することが確認されている．しかし，実際に受信される信号には雑音が含まれており，そこから抽出される疑似波面は不規則成分を含む．形状推定に用いる逆境界散乱変換は疑似

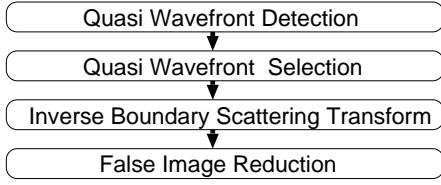


図 2 SEABED 法の概要

波面の微分操作を含むため、不規則成分が拡大され、像の劣化を引き起こす問題がある。この問題を解決するために、我々は境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換を用いた平滑化手法を提案した。この手法については次節で述べる。

4. 部分境界散乱変換

4.1 部分境界散乱変換と部分逆境界散乱変換

本節では、前節で説明した境界散乱変換を拡張した部分境界散乱変換 FBST(Fractional Boundary Scattering Transform) について述べる。部分境界散乱変換を用いた平滑化法については次節で説明する。部分境界散乱変換を次式で定義する [15]。

$$x_\alpha = x + \alpha y \frac{dy}{dx} \quad (5)$$

$$y_\alpha = y \sqrt{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \quad (6)$$

式 (5), (6) には、元の境界散乱変換の式 (1), (2) には含まれないパラメータ α ($-1 \leq \alpha \leq 1$) が含まれている。この変換を $\text{FBST}(\alpha)$ と呼ぶ。実空間からパラメータ α で部分境界散乱変換した (x_α, y_α) を部分変換疑似波面と呼ぶ。 (x_α, y_α) で表される空間を部分変換空間と呼ぶ。 $\alpha = 1$ の場合には部分変換疑似波面は従来の疑似波面に一致する。また、 $\alpha = 0$ の場合には部分変換疑似波面は目標形状と一致する。部分境界散乱変換は、従来別々に扱っていた実空間とデータ空間の中間の空間を考えることに相当する。

式 (6) は次式の通り書き換えることができる。

$$x_\alpha = x + (\sqrt{\alpha}y) \frac{d(\sqrt{\alpha}y)}{dx} \quad (7)$$

$$\sqrt{\alpha}y_\alpha = \sqrt{\alpha}y \sqrt{1 + \left(\frac{d(\sqrt{\alpha}y)}{dx} \right)^2} \quad (8)$$

この式は従来の境界散乱変換の変数を $y \rightarrow \sqrt{\alpha}y$ 及び $y_\alpha \rightarrow \sqrt{\alpha}y_\alpha$ と書き換えたものとなっている。但し、 $\alpha < 0$ の場合には $\sqrt{\alpha}$ を虚数と考える。このことから直ちに逆変換が導ける。なぜなら逆境界散乱変換の各変数を同様に変数変換することで式 (8) の逆変換となるためである。逆変換は次式で表される。

$$x = x_\alpha - \alpha y_\alpha \frac{dy_\alpha}{dx_\alpha} \quad (9)$$

$$y = y_\alpha \sqrt{1 - \alpha \left(\frac{dy_\alpha}{dx_\alpha} \right)^2} \quad (10)$$

この変換は部分境界散乱変換 $\text{FBST}(\alpha)$ の逆変換であり、 $\text{FBST}(-\alpha)$ と一致する。この特徴を用いることで、疑似波面を部分境界散乱変換により部分変換疑似波面に移した後に、再び部分境界散乱変換を適用することにより推定像を得ることも可能であることがわかる。特に $\alpha = -1$ のとき、部分境界散乱変換 $\text{FBST}(\alpha)$ は逆境界散乱変換に一致し、次式が成り立つ。

$$\text{FBST}(-1) = \text{FBST}(-\alpha) + \text{FBST}(-1 + \alpha) \quad (11)$$

ここで左辺は逆境界散乱変換に相当し、右辺の和はそれぞれの変換を順次適用することを意味する。従来の SEABED 法で使用される逆境界散乱変換を 2 段階に分割することでデータ空間と実空間の間の空間での処理が可能になることが部分境界散乱変換を導入することの利点である。実空間、データ空間及び部分変換空間の関係を図 3 に示す。

4.2 部分変換疑似波面の特徴

前章で述べた通り、疑似波面の 2 階導関数は凸物体に対しては滑らかになるために平滑化が容易である一方、凹面に対しては推定像の精度を悪化させる原因となる。一方、部分変換疑似波面の 2 階導関数は次式で表される。

$$\frac{d^2 y_\alpha}{dx_\alpha^2} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx} \right)^2\}^{3/2} \{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + \alpha y \frac{d^2 y}{dx^2}\}} \quad (12)$$

この式で $\alpha = 0$ の場合には分子のみが残り、目標形状自体の 2 階導関数と一致する。また、 $\alpha = 1$ の場合には前章で述べた疑似波面の 2 階導関数と一致する。同式が非正則とならないための $\frac{d^2 y}{dx^2}$ の条件は次式で与えられる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} > -\frac{1}{y} \left\{ \frac{1}{\alpha} + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

$\alpha = 1$ の場合よりも $\alpha < 1$ とすることで正則となる条件が緩和されることがわかる。一方、 $\alpha \simeq 0$ とすると分子 $\frac{d^2 y}{dx^2}$ が大きい場合に $\frac{d^2 y_\alpha}{dx_\alpha^2}$ も大きくなる問題がある。そこで両者の妥協を取り、 $\alpha = 0.5$ における平滑化を提案した [15]。図 4 に目標物体の 2 階導関数 $d^2 y/dx^2$ と部分変換疑似波面の 2 階導関数の絶対値 $|d^2 y_\alpha/dx_\alpha^2|$ の関係の例を示す。但し、 $y = 1$ 、 $dy/dx = 0$ と仮定した場合の数値例である。 $d^2 y/dx^2 > 0$ の場合には目標形状が最も大きな 2 階導関数を持つ。また、 $d^2 y/dx^2 < 0$ の場合には疑似波面が最も大きな 2 階導関数を持つ。一方、部分変換疑似波面 ($\alpha = 0.5$) はいずれの場合でも 2 階導関数の最大値を取らないことがわかる。このように、部分変換疑似波面を用いることで目標形状の凹凸に依存せずに 2 階導関数を小さくし、長い相関長での平滑化が可能となる。図 5 に、部分変換空間での平滑化手法を従来のデータ空間での平滑化手法 [14] と比較して示す。データ空間での平滑化手法では疑似波面を平滑化した後、一度に逆境界散乱変換を適用して推定形状を得るのに対し、部分変換空間での平滑化手法では疑似波面を部分境界散乱変換 ($\alpha = -0.5$) によって部分変換疑似波面へ移し、平滑化を行った後に再び部分境界散乱変換 ($\alpha = -0.5$) によって推定形状を得る。

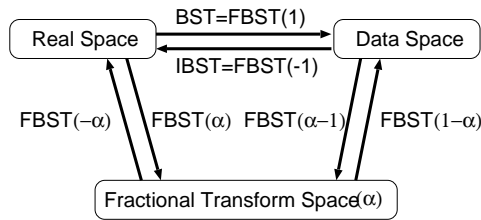


図 3 実空間，データ空間，及び部分変換空間の関係
Fig. 3 The relationships of the spaces.

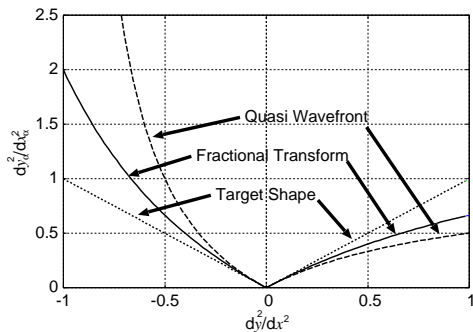


図 4 d^2y/dx^2 と d^2y_α/dx_α^2 の関係
Fig. 4 The relationship between d^2y/dx^2 and d^2y_α/dx_α^2 .

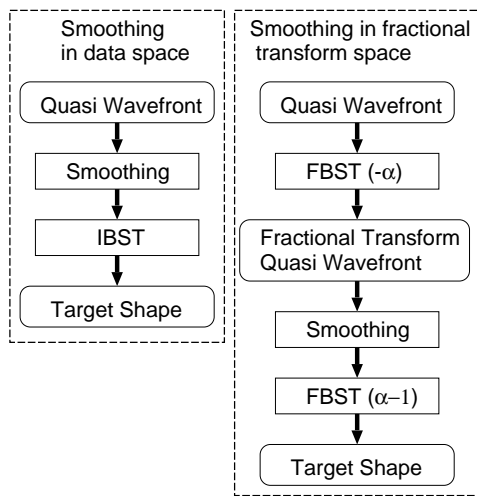


図 5 提案平滑化手法及び従来法の処理手順

Fig. 5 The procedures of the proposed smoothing method and the conventional one.

4.3 部分境界散乱変換パラメータを固定した推定像安定化手法

本節ではデータ空間での平滑化，実空間での平滑化，部分変換パラメータを固定した場合の部分変換空間での平滑化のそれぞれにより推定される形状の精度について示す．部分変換パラメータは $\alpha = 0.5$ と固定する．本節では図 6 に実線で

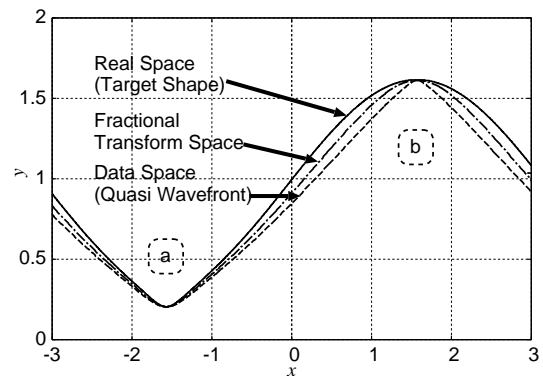


図 6 部分境界散乱変換の例
Fig. 6 An example of a fractional BST.

示す目標形状を仮定する．目標は凸面の部分と凹面の部分の両方を有するものとしている．雑音は実際には受信信号に加算されるが，簡単のため推定される目標までの距離に正規分布に従う誤差を加えることで近似する．疑似波面に加える誤差の標準偏差は 1.0×10^{-2} 波長とする．疑似波面はあらかじめ歪みを生じない程度 (2.5×10^{-2} 波長) の相関長で平滑化を行ったものを用いる．図 6 の破線はレーダにより得られる疑似波面を示す．目標形状の凸面は疑似波面では滑らかになっており，逆に目標形状の凹面は疑似波面では鋭くなっていることがわかる．一方，同図に示す部分変換疑似波面は凸面及び凹面の双方で両者の中間的な曲率を有することが確認できる．

各手法の平滑化の相関長は 0.1 波長とする．図 7 に各手法で推定した形状と真値との誤差を示す．凸部分 a については実空間での平滑化を行う場合に最も大きな誤差を生じ，凹部分 b については疑似波面の平滑化を行う場合に最も大きな誤差を生じている．一方，部分変換疑似波面の平滑化を行う手法では凹凸の双方の部分で誤差が小さくなっており，推定精度の最悪値を避けることが実現される．しかしながら，いずれの方法でも推定精度の最良値を取ることはできていない．次節ではこの問題を解決するために，部分変換パラメータを疑似波面の特徴に応じて適応的に変化させる適応的部分境界散乱変換による平滑化手法を提案する．

5. 最適部分変換パラメータを用いた適応的部分境界散乱変換による画像化

5.1 部分変換に用いる最適パラメータの導出

前節で示したとおり，部分変換疑似波面の 2 階導関数は次式で表される．

$$\frac{d^2y_\alpha}{dx_\alpha^2} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\}^{3/2} \{1 + \alpha \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \alpha y \frac{d^2y}{dx^2}\}} \quad (14)$$

本節ではこの 2 階導関数の絶対値を最小にする疑似波面パラメータ α を求める．ここで α に依存するのは式 (14) の分母のみであるため，分母の 2 乗値を最大にする問題と等価であ

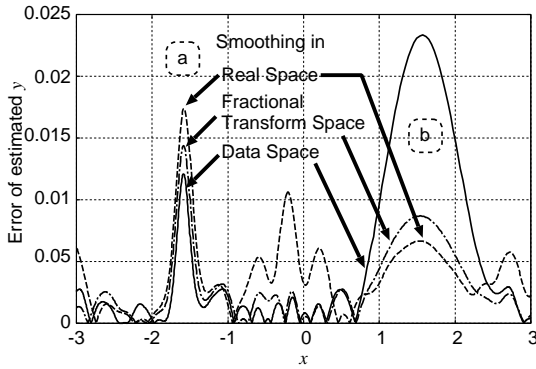


図 7 各平滑化手法での推定形状の誤差
Fig. 7 The error of estimated shape.

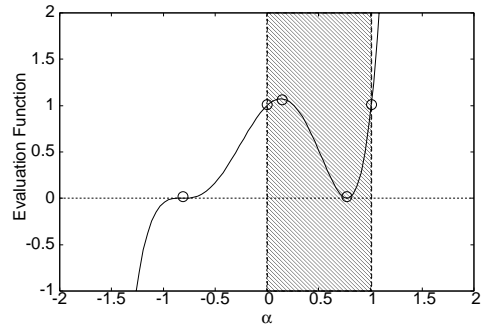


図 8 5 次関数の最大化

Fig. 8 The maximization of the polynomial function.

る．簡単のため $a = dy/dx$, $b = yd^2y/dx^2$ とすると最大化すべき関数は次式となる．

$$f(\alpha) = (1 + a^2\alpha)^3 \{1 + (a^2 + b)\alpha\}^2 \quad (15)$$

但し、定義により $0 \leq \alpha \leq 1$ が条件として付与される．

5 次方程式 $f(\alpha) = 0$ は $\alpha = -1/a^2$ で 3 重根を、 $\alpha = -1/(a^2 + b)$ で 2 重根を持つ． b が正の場合には定義域内で同式は単調増加関数となるため $\alpha_{opt} = 1$ となる．一方、 b が負の場合には図 8 のような形となり、2 重根、極大値及び定義域の両端の大小関係を考慮した場合分けが必要になる．

最適パラメータ $\alpha = \alpha_{opt}$ は次の通り求められる．

(1) $0 < b$ であれば $\alpha_{opt} = 1$ である．条件を満たさない場合は (2) へ進む．

(2) $1 < -\frac{5a^2+2b}{5a^2(a^2+b)}$ であれば $\alpha_{opt} = 1$ である．条件を満たさない場合は (3) へ進む．

(3) $-\frac{1}{a^2+b} < 0$ であれば $\alpha_{opt} = 1$ である．条件を満たさない場合は (4) へ進む．

(4) $-\frac{5a^2+2b}{5a^2(a^2+b)} < 0$ であれば (5) へ．条件を満たさない場合は (7) へ進む．

(5) $1 < -1/(a^2 + b)$ であれば $\alpha_{opt} = 0$ である．条件を満たさない場合は (6) へ進む．

(6) $1 > (1 + a^2)^3(1 + a^2 + b)^2$ であれば $\alpha_{opt} = 0$ である．条件を満たさない場合は $\alpha_{opt} = 1$ である．

(7) $1 < -1/(a^2 + b)$ であれば $\alpha_{opt} = -\frac{5a^2+2b}{5a^2(a^2+b)}$ である．条件を満たさない場合は (8) へ進む．

(8) $-\frac{108b^5}{3125a^4(a^2+b)^3} > (1 + a^2)^3(1 + a^2 + b)^2$ であれば $\alpha_{opt} = -\frac{5a^2+2b}{5a^2(a^2+b)}$ である．条件を満たさない場合は $\alpha_{opt} = 1$ である．

各 (a, b) に対する最適パラメータ α_{opt} を図 9 に示す．同図の $\alpha_{opt} = 1$ の部分はデータ空間での平滑化が最適となる場所であり、 $\alpha_{opt} = 0$ の部分は実空間での平滑化が最適となる場所である．一方、両者の中間の値を取る場所では部分変換空間での平滑化が最適となる．文献 [11] より、 a, b は疑似波面 X, Y により次の通り表現できる．

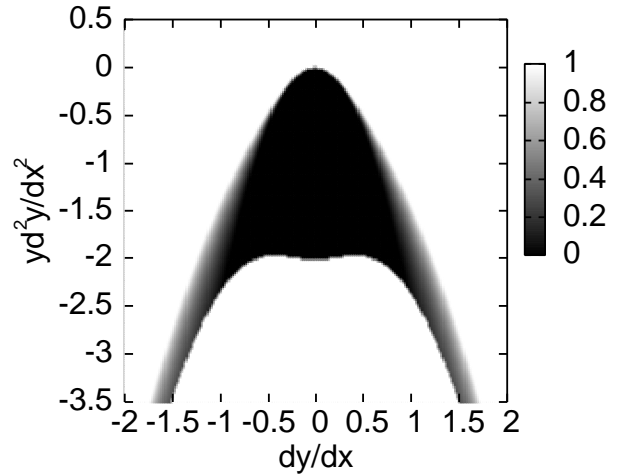


図 9 部分変換パラメータの最適値

Fig. 9 The optimum fractional transform parameter.

$$a = \frac{dY/dX}{\sqrt{1 - (dY/dX)^2}} \quad (16)$$

$$b = \frac{Yd^2Y/dX^2}{(1 - (dY/dX)^2)(1 - (dY/dX)^2 - Yd^2Y/dX^2)} \quad (17)$$

これらの関係を用いると最適部分変換パラメータを疑似波面から直接求めることが可能であり、部分境界散乱変換を 2 回適用するのみで推定像を得ることができるため、SEABED 法の有する高速性を犠牲にすることなく像の安定化が実現できる．

5.2 最適部分変換パラメータを用いた適応的部分境界散乱変換による平滑化

提案する適応的部分境界散乱変換による平滑化は次の通りである．得られる疑似波面を 0.5λ の相関長により平滑化し、式 (17) に従って a, b をアンテナ位置 X 毎に計算する． (a, b) に対応する最適部分変換パラメータ α_{opt} を前節の手順により得る． $\alpha_{opt} > 0.5$ の場合には疑似波面を平滑化した後に逆境界散乱変換を適用して像を得る．各手法の平滑化の相関長は前節と同様に 0.1λ とする．一方、 $\alpha_{opt} \leq 0.5$ の場合には逆境

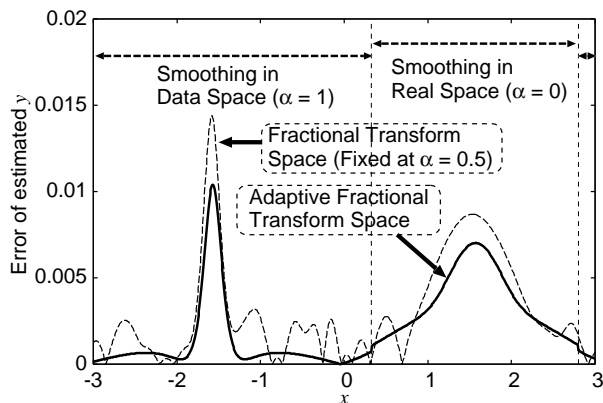


図 10 提案手法による推定精度

Fig. 10 Estimation error for the proposed method

界散乱変換を適用して推定像を得た後に平滑化を行う。これらはそれぞれデータ空間での平滑化 ($\alpha = 1$) 及び実空間での平滑化 ($\alpha = 0$) に対応する。

この手法により前述と同一の目標形状に対して形状推定を行う。提案手法による形状推定誤差を図 10 に実線で示す。破線は前節で説明した部分変換空間 $\alpha = 0.5$ での平滑化手法による推定誤差である。推定手法では x に応じて $\alpha = 0$ 及び 1 を切替ることで適応的に最適な平滑化手法を選択している。同図より提案手法により形状推定精度が大幅に改善することが確認でき、推定誤差の最悪値に関して約 1.4 倍の精度改善が得られる。

6. ま と め

本論文では UWB パルスレーダのための高速形状推定法である SEABED 法の推定像安定化手法を提案し、適用例を示すことでその有効性を明らかにした。SEABED 法のための推定像安定化手法としては固定部分変換パラメータによる部分境界散乱変換に基づくものが提案されていた。この手法では推定精度の最悪値を避けることができるものの一般に最良値を取ることができないという問題があった。本稿での提案手法は、従来固定されていた部分変換パラメータを疑似波面の特徴に応じて適応的に変化させることにより推定精度の向上を実現するものである。本稿では、提案する適応的部分境界散乱変換による平滑化手法により SEABED 法の形状推定精度が大幅に向上することを適用例により示した。

文 献

[1] E. J. Bond, X. Li, S. C. Hagness, and B. D. van Veen, "Microwave imaging via space-time beamforming for early detection of breast cancer," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1690–1705, 2003.

[2] R. M. Narayanan, X. Xu, and J. A. Henning, "Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 151, no. 3, pp. 143–148, 2004.

[3] J. van der Kruk, C. P. A. Wapenaar, J. T. Fokkema, and

P. M. van den Berg, "Three-dimensional imaging of multicomponent ground-penetrating radar data," *Geophysics*, vol. 68, no. 4, pp. 1241–1254, 2003.

[4] C. J. Leuschen and R. G. Plumb, "A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data," *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, vol. 39, no. 5, pp. 929–936, May 2001.

[5] T. J. Cui, Y. Qin, G. L. Wang, and W. C. Chew, "High-order inversion formulas for low-frequency imaging of 2D buried targets," *Proceedings of 2004 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 189–192, 2004.

[6] W. C. Chew and Y. M. Wang, "Reconstruction of two dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 9, no. 2, pp. 218–225, 1990.

[7] P. Lobel, C. Pichot, L. Blanc-Feraud, and M. Barlaud, "Microwave imaging: Reconstructions from experimental data using conjugate gradient and enhancement by edge-preserving regularization," *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 337–342, Dec. 1998.

[8] T. Sato, T. Wakayama, and K. Takemura, "An imaging algorithm of objects embedded in a lossy dispersive medium for subsurface radar data processing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 38, no. 1, pp. 296–303, 2000.

[9] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E87-B, No. 5, pp. 1357–1365, May, 2004.

[10] T. Sakamoto and T. Sato, "Fast imaging of a target in inhomogeneous media for pulse radar systems," *Proc. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* Vol. 3, pp. 2070–2073, Sep. 2004.

[11] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Communications*, vol. E87-B, no. 11, pp. 3314–3321, Nov., 2004.

[12] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *Proc. 2004 International Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 585–588, Aug. 2004.

[13] T. Sakamoto and T. Sato, "A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems," *Proc. 2004 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, vol. 2, pp. 2099–2102, June, 2004.

[14] T. Sakamoto, S. Kidera, T. Sato, T. Mitani and S. Sugino, "An experimental study on a fast imaging algorithm for UWB pulse radar systems," *Proc. 2005 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, July, 2005.

[15] 阪本卓也, 佐藤 亨 "部分境界散乱変換を用いた UWB パルスレーダのための推定像安定化手法," 電気学会研究会資料 電磁界理論研究会, EMT05-26, pp. 7–12, July, 2005.