

UWB パルスレーダのための散乱波形推定を用いた 高速・高解像度形状推定法の実験的検討

木寺正平, 阪本卓也, 佐藤 亨 (京都大学大学院)

An Experimental Study for a High-resolution Imaging Algorithm

with Scattered Waveform Estimation for UWB Pulse Radars.

Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

Abstract

UWB pulse radars enables us to measure a target location with a high range-resolution, which are applicable for measuring techniques for industrial products, such as antennas and vehicles. We have already proposed a robust and fast imaging algorithm with an envelope of circles, which is suitable for these applications. This method is based on a principle that a target boundary should be expressed as an envelope of circles with estimated time delays. We determine time delays with the matched filter of the transmitted waveform in this method. However, scattered waveforms are in general different from transmitted one because they depend on the target shape. Due to these waveform deformations, the resolution of this method deteriorates around target edges. In this paper, we propose a high-resolution imaging algorithm for general convex targets with a waveform estimation. We show application examples with numerical simulations and experiments.

キーワード：UWB パルスレーダ、高解像度物体像推定、実験的検討、散乱波形推定

(UWB pulse radars, High-resolution imaging, Experimental study, Scattered waveform estimation)

1. 序 論

アンテナ鏡面及び各種工業製品の精密計測技術として、高い距離分解能を有する UWB パルスレーダが有望である。この技術は将来、室内用ロボットのための近傍界空間計測技術への応用も期待されている。上記用途等には実時間処理が要求される。しかし従来のレーダ画像化手法では膨大な計算時間を要し、リアルタイム処理への応用は困難であった [1] ~ [4]。これに適する物体形状推定手法として我々は以前に SEABED 法を提案している [5] ~ [7]。SEABED 法では到来波面と目標形状への可逆な変換関係を利用し、受信波形画像から抽出される到来波面より直接的に境界面を推定する。SEABED 法は高速な形状推定を実現する一方、変換式に到来波面の微分値を用いるため、雑音に対し不安定である。この問題を解決するため、我々は円包絡線抽出を用いた安定かつ高速物体形状推定法を提案している [8]。この手法は、物体境界面が到来波面から求まる円の包絡線上に存在するという原理を利用する。当手法は微分に依らない高速物体像推定を可能とし、雑音環境下でロバストな推定を実現する。

しかしながら、この手法では物体からの散乱波形が送信波形と同一であるという仮定に起因する誤差が生じる。特にエッジからの散乱波形は送信波形の積分波形に近くなり、

整合フィルタによる推定到来時間精度が劣化する。このため目標エッジにおいて送信波長の 10^{-1} 程度の推定像の劣化が生じる。一般にアンテナ鏡面や工業製品の精密検査においては、数 mm オーダーやそれ以下の形状推定精度が要求される。また計測器のコストを抑えるためには、低周波帯信号による高解像度形状推定手法が有効である。よって、波長の 10^{-2} 程度の形状推定精度を達成するレーダ画像化手法の需要は高い。本論文では、物体像推定精度を向上させるために散乱波形推定を併用する形状推定法を提案する。以前に我々は、このアイデアに基づく形状推定法を提案している [9]。しかしながら、当手法はパラメトリックな手法を用いており、推定対象は単純な多角柱物体に限定される。本稿では、形状推定及び散乱波形推定を一般の凸形状物体へと拡張する。最後に数値計算及び UWB 送受信モジュールを用いた実験によりその特性評価を与える。

2. システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す。本稿では TE 波、2 次元問題を仮定する。伝搬空間は非分散等方性媒質を仮定する。目標物体は一樣な誘電率を持ち、明瞭な境界を持つ凸型形状物体とする。目標物体は $y > 0$ の領域に存在すると仮定する。無指向性アンテナを x 軸上で直線走査し、各素子で散乱波形を取得する。送信素子に与える電流波形はモノサイ

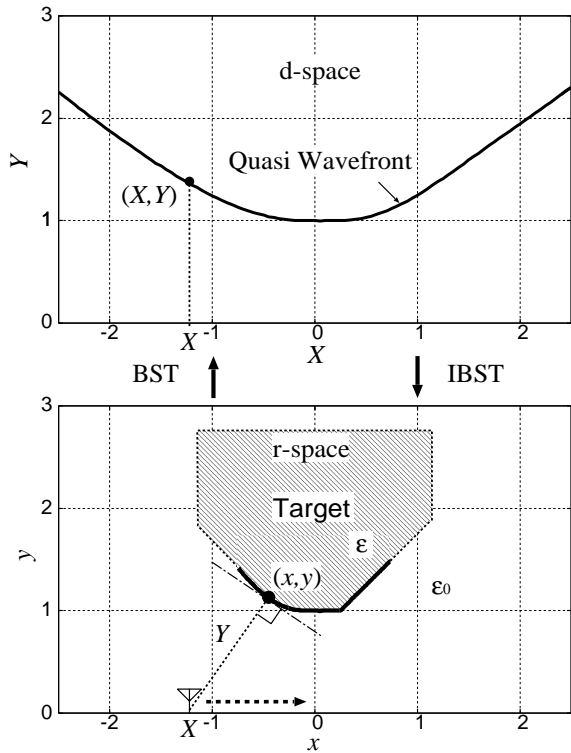


図1 システムモデル及びデータ空間 (上図) と実空間 (下図)。

Fig.1 D-space (Upper side) and r-space (Lower side) in the system model.

クルパルスとする。目標物体が存在する空間を r 空間と定義し、その空間は送信電流の中心波長 λ で正規化する。アンテナ素子位置を $(x, y) = (X, 0)$ と定義する。各素子位置での受信電界を $s'(X, Y)$ とする。但し $Y = ct/(2\lambda)$ 、 c は光速である。 $s(X, Y)$ を、送信波形または推定波形を用いた整合フィルタに通した時の出力波形とする。この出力波形のピーク値をつないだ曲線を (X, Y) とし、擬似波面と呼ぶ。また (X, Y) が存在する空間を d 空間と定義する。本稿では d 空間から r 空間への変換により目標形状推定を実現する。

3. 従来手法

我々は以前に円包絡線抽出に基づく高速かつ安定物体形状推定法を提案している。物体境界点 (x, y) と擬似波面 (X, Y) の間には次式に示す通り、可逆な変換関係が存在する [5]。

$$\left. \begin{aligned} X &= x + ydy/dx. \\ Y &= y\sqrt{1 + (dy/dx)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= X - YdY/dX. \\ y &= Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

前者を境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform、以後 BST と略す。)、後者を逆境界散乱変換 (Inverse BST、以後 IBST と略す。) と呼ぶ。図 1 に実空間とデータ空間の関係を示す。この可逆な変換関係を利用することによ

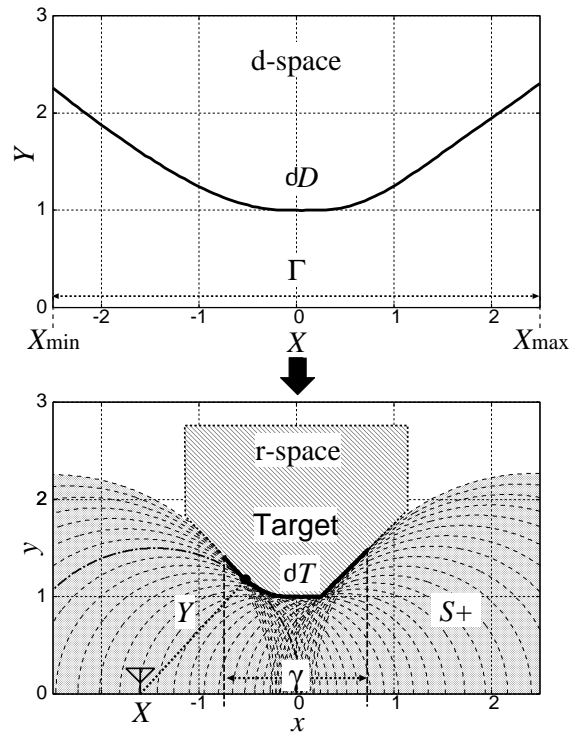


図2 データ空間上の擬似波面 (上図) 及び実空間上の物体境界と円包絡線 (下図)

Fig.2 Quasi wavefront in d-space (Upper side) and a set of circles in r-space (Lower side).

て、我々は物体境界と擬似波面から得られる円の包絡線が完全に一致することを示した [8]。以下にその原理と実手順を示す。擬似波面 (X, Y) を表す曲線を ∂D と定義する。 ∂D に対して IBST により変換される物体境界上の曲線 (x, y) を ∂T と定義する。また Γ を ∂D における X の領域、 γ を ∂T における x の領域と定義する。 $g(X, Y) = \partial x / \partial dX = 1 - Yd^2Y/dX^2 - (dY/dX)^2$ を定義する。ここで擬似波面 (X, Y) に対して、 $S_{(X, Y)} = \{(x, y) | (x - X)^2 + y^2 < Y^2\}$ により、円の内点集合を定義する。 ∂D が一価かつ連続な関数で表現される時、円の和集合 $S_+ = \bigcup_{X \in \Gamma} S_{(X, Y)}$ を定義し、その境界集合 ∂S_+ を次式で定義する。

$$\partial S_+ = \{(x, y) | (x, y) \in \overline{S_+} - S_+, x \in \gamma, y > 0\}, \quad (3)$$

但し、 $\overline{S_+}$ は S_+ の閉包である。

この時、次式

$$\partial T = \partial S_+ \quad (g(X, Y) > 0), \quad (4)$$

が成立する。 $g(X, Y) > 0$ という条件では、全ての円は ∂T に外接する。図 2 に擬似波面と物体境界及び円包絡線の関係を示す。この条件は全ての凸形状境界において満たされる。更に我々は物体境界がエッジを持つ場合 ($g(X, Y) = 0$) においても上式が満たされることを確認している。上式の関係を用いることにより物体形状を円包絡線として抽出する。式 (4) は擬似波面の点群から物体境界点群への変換を表しており、擬似波面の微分値に依存しない形状推定が可能となる。

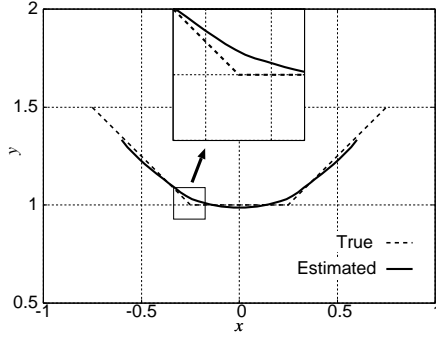


図3 従来手法での形状推定例

Fig. 3 Estimated image with the conventional method.

次に本手法の実手順について説明する。ここで $R(X, X')$ を2円 $\partial S_{(X,Y)}$ と $\partial S_{(X',Y')}$ の交点の x 座標と定義する。但し、 $\partial S_{(X,Y)}$ は $S_{(X,Y)}$ の境界点である。更に X_{\max} と X_{\min} を領域 Γ における最小値及び最大値と定義する。また ΔX をアンテナ走査サンプル間隔とする。

手順 1). 各素子で得られる受信信号 $s'(X, Y)$ に対して送信波形を用いた整合フィルタを適用し、出力波形 $s(X, Y)$ を得る。

手順 2). 整合フィルタの出力波形 $s(X, Y)$ のピークを連続的に繋ぎ擬似波面 (X, Y) を抽出する。

手順 3). ∂S_+ 上の点 (x, y) を次式で求める。

$$y = \max_{X \in \Gamma} \sqrt{Y^2 - (x - X)^2} \quad (5)$$

但し、 x は Γ 上で等間隔にサンプルする。

手順 4). 物体境界を次式、 $\partial T = \partial S_+$ 、 $(x_{\min} \leq x \leq x_{\max})$ で求める。ここで $x_{\min} = R(X_{\min}, X_{\min} + \Delta X)$ 及び $x_{\max} = R(X_{\max}, X_{\max} - \Delta X)$ とする。

図3に本手法での形状推定例を示す。同図よりエッジ付近における推定像の劣化が存在し、また推定像は実サイズよりも小さくなることが確認できる。これは散乱波形が送信波形と異なることによって生じるフィルタリング誤差に起因する。最大誤差は0.07波長程度である。

4. 提案手法

本節では、散乱波形推定を用いた物体形状推定法を提案する。提案手法では、初期推定形状から散乱波形推定を用いて整合フィルタを更新し、再帰的に形状推定を行う。以下では散乱波形推定法及び提案手法の実手順について述べる。

4.1 散乱波形推定法

我々は以前に任意凸形状からの高速な散乱波形推定法を提案している [10]。本手法では、散乱電磁界の近似式を用いるが、擬似波面推定において波長の1/100程度の精度を得ることを示している。図4に波形推定におけるアンテナ位置と物体境界の関係を示す。本手法では散乱に寄与する物体境界上においてグリーン関数を積分し、伝達関数を作成する。周波数領域の散乱波形 $F(\omega)$ を次式で近似する。

$$F(\omega) = \sqrt{\frac{jk}{2\pi}} E_0(\omega) \int_C g(2\rho) ds, \quad (6)$$

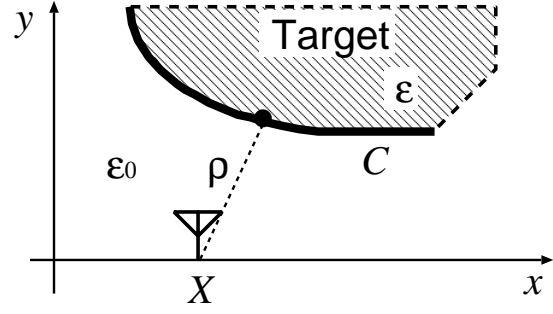


図4 散乱波形推定における物体とアンテナ配置

Fig. 4 Arrangement of the antenna and the target for waveform estimation.

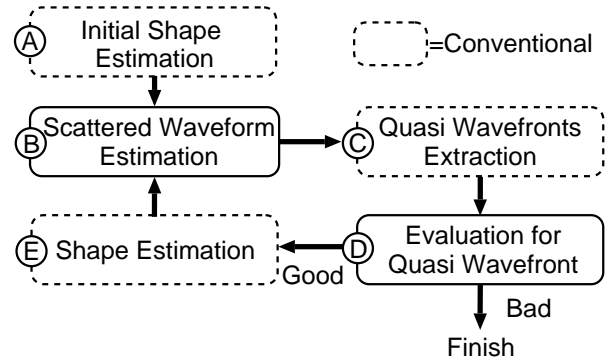


図5 提案手法の実手順

Fig. 5 Flowchart of the proposed method.

ここで C は積分経路、 k は波数、 ρ はアンテナ物体間距離、 $E_0(\omega)$ は周波数領域での遠方界送信波形の逆相波形、 g は2次元グリーン関数であり、0次第2種ハンケル関数で表される。

4.2 提案手法の実手順

提案手法の実手順を以下に示す。

手順 A). 従来手法より初期推定形状を得る。

手順 B). 推定形状に対して散乱波形推定法を適用し、推定波形を用いて整合フィルタを更新する。

手順 C). 整合フィルタのピーク値より擬似波面を抽出する。

手順 D). 擬似波面の更新値を次式で評価する。

$$\Delta Q_i = \frac{\int_{X_{\min}}^{X_{\max}} |Y_i(X) - Y_{i-1}(X)| dX}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

ここで $Y_i(X)$ は i 回目の更新における推定擬似波面を表す。

手順 E). ΔQ_i が次式、

$$\Delta Q_i < \begin{cases} \epsilon & (i = 1), \\ \Delta Q_{i-1} & (i \geq 2). \end{cases} \quad (8)$$

を満たすとき、物体形状を更新し手順 B へ戻る。満たない場合、処理を終了する。 ϵ は経験的に設定する。

本手法において擬似波面の更新量 ΔQ_i は、真値へ近づく更新過程において、減少すると仮定する。手順 E により波

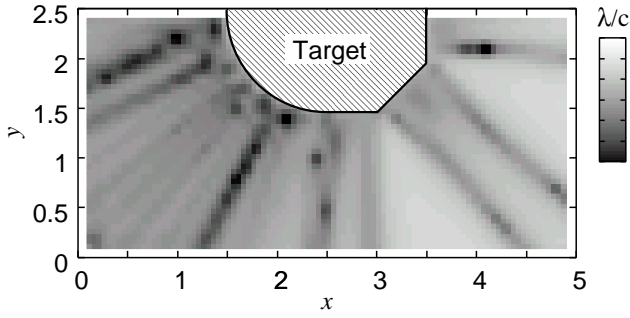


図 6 送信波形を用いた擬似波面推定精度

Fig. 6 Error of quasi wavefronts with the transmitted waveform.

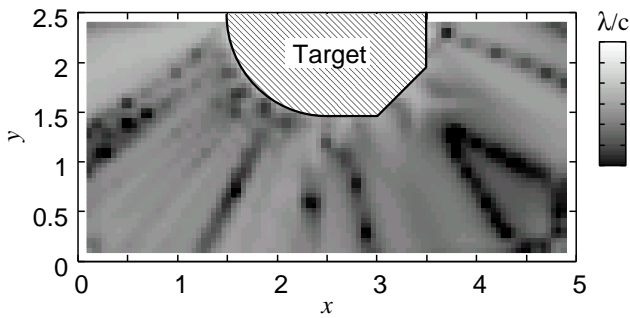


図 7 推定波形を用いた擬似波面推定精度

Fig. 7 Error of quasi wavefronts with the estimated waveform.

形更新による擬似波面の発散を抑える。この更新手順により、推定波形は真の散乱波形へ近づき、推定精度が向上する。図 5 に処理手順のフローチャートを示す。

5. 提案手法の特性評価

5.1 散乱波形推定評価

本節では散乱波形推定についての特性評価を与える。図 6、7 は、送信波形及び推定波形を用いた整合フィルタに対する各素子での擬似波面推定精度を示す。図 6 では、エッジからの回折波を受信する図右下の領域において大きな推定誤差が存在する。一方図 7 では、この領域の推定精度は約 10 倍程度改善する。しかし同図の左上方部分においては推定精度が劣化している。この領域では物体の影領域からのエコーが強く寄与するためと考えられる。しかし同領域以外の全ての領域において推定精度は $10^{-2}\lambda$ 以内であり、高精度な波形推定が可能であることが確認できる。また図 8 に素子位置 $(x, y) = (4.0\lambda, 1.0\lambda)$ での散乱波形、送信波形及び推定波形を示す。同図より式 (6) による伝達関数が正しく推定されることが確認できる。また各素子での計算時間は Xeon 3.2 GHz processor において約 5.0 msec であり実時間処理に有効である。

5.2 数値計算による特性評価

本節では、数値計算による提案手法の形状推定例を紹介する。図 9 に提案手法による推定形状を示す。 $\epsilon = 10^{-2}\lambda$ とする。同図よりエッジ付近の解像度が、図 3 と比較して大幅

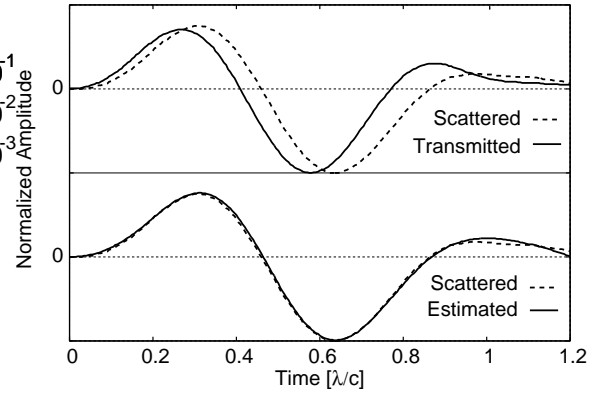


図 8 散乱波形及び推定波形の一例。

Fig. 8 Example of scattered waveform and estimated one.

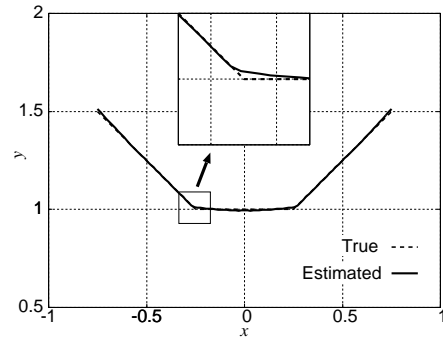


図 9 提案手法による推定形状例。

Fig. 9 Estimated image with the proposed method.

に改善することがわかる。提案手法での推定精度は $10^{-2}\lambda$ 以内であり、エッジを含めて高精度な形状推定を実現する。また同図より提案手法は物体境界領域も正しく推定する。

次に物体形状の特徴量を評価するため、以下の通り曲率 κ を導入する。

$$\kappa = \frac{d^2y/dx^2}{(1 + (dy/dx)^2)^{3/2}} \quad (9)$$

上式において dy/dx 及び d^2y/dx^2 は差分近似を用いる。図 10 に両手法の推定曲率を示す。同図より従来手法では物体曲率曲線に大きな変化はなく物体境界面が滑らかであるという特徴を示す。これに対して提案手法での推定曲率曲線は、真のエッジ付近において大きな曲率を示し、物体曲率を正確に推定する。

また提案手法の雑音に対する特性評価を示す。推定精度の評価値 μ を次式、

$$\mu = \frac{\sqrt{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \{f_t(x) - f_e(x)\}^2 dx}}{\sqrt{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f_t(x)^2 dx}} \quad (10)$$

で定義する。但し $f_t(x)$ 及び $f_e(x)$ は真の形状及び推定形状の関数を表す。また γ は推定形状の x 座標上の領域である。図 11 に SN 比に対する評価値 μ の推移を示す。本稿では、SN 比を整合フィルタ通過後の最大信号電力と雑音平均電力

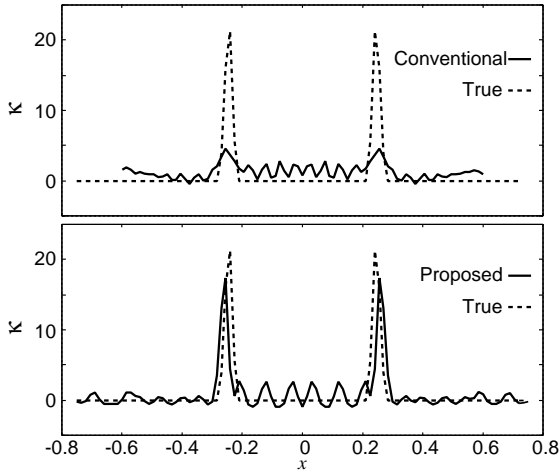


図 10 両手法による推定曲率

Fig. 10 Estimated curvature with each method.

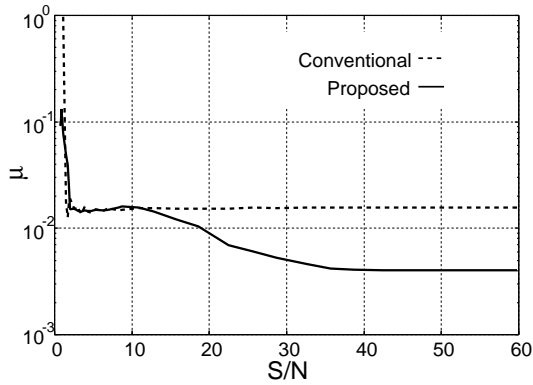


図 11 両手法での雑音に対する推定精度の推移

Fig. 11 Estimation accuracy for S/N with each method.

の比と定義する。同図より SN 比が 30dB 以上で、提案手法は従来法と比較して約 8 倍の精度改善が得られる。また 20dB 以上の SN 比であれば提案手法により 0.01λ 程度の形状推定精度を得る。

5.3 実験による特性評価

本節では UWB 信号発生器及びオシロスコープを用いた実験による提案手法の特性評価を与える。本実験では中心周波数 3.3 GHz、10dB 帯域幅 2.0 GHz の送信信号を用いる。図 12 に本実験におけるアンテナ及び目標物体の配置を示す。送信側での偏波は長軸対短軸比約 17dB で、 z 軸方向に長軸方向を持つ楕円偏波を用いる。またアンテナ指向性は約 90° であり、目標物体はスチールシートで被覆する。送受信間距離 76mm のバイスタティックアンテナを x 軸上で走査する。送受信アンテナ中心位置を $(X, 0, 0)$ と定義する。2次元問題を仮定するため、目標物体は z 軸方向に十分長くとる。ここで 2次元問題における散乱波形を得るために各 X において、送信アンテナのみを z 軸方向に走査して受信信号を積分する [9]。SN 比を改善するために受信信号は 1024 回、同相加算する。アンテナ対を $-200 \text{ mm} \leq x \leq 200 \text{ mm}$ の範囲で走査する。走査サンプル間隔を 10 mm とする。物体を

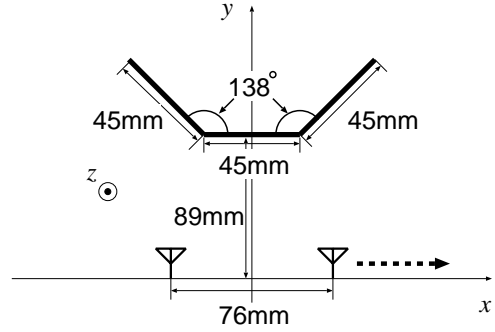


図 12 実験におけるアンテナ及び物体配置

Fig. 12 Arrangement of bi-static antennas and a target in experiments.

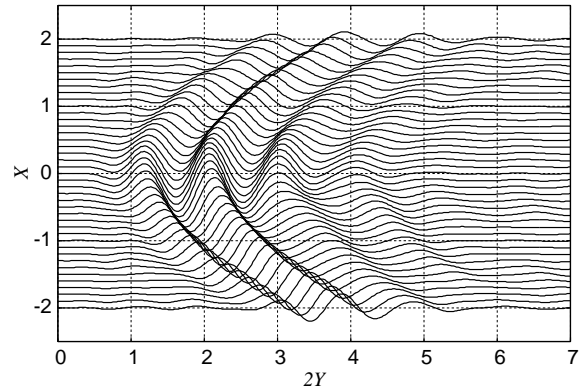


図 13 実験で取得される散乱波形

Fig. 13 Scattered waveforms in experiments.

置かない場合の直接波を受信波形より取り除き、散乱波形のみを取得する。

ここで形状推定及び波形推定をバイスタティックモデルへ拡張する。本モデルでは次式、 $(x-X)^2/Y^2 + y^2/(Y^2-d^2) = 1$ を満たす楕円に対する内点集合を $S_{(X,Y)}$ と定義する。 $S_+ = \bigcup_{X \in \Gamma} S_{(X,Y)}$ と定義する。式 (3) で定義される境界 ∂S_+ を用いて、モノスタティックと同様に式 (5) が示される。また散乱波形推定においては積分経路をバイスタティックモデルへ変更する。図 14、15 は従来手法及び提案手法による形状推定を示す。但し $\epsilon = 10^{-2}\lambda$ とする。図 14 では数値計算例と同様にエッジ付近の解像度が劣化することが確認される。これに対して図 15 に示す通り、提案手法での推定形状ではエッジ付近の誤差が改善する。また図 16 に各手法での推定曲率曲線を示す。同図より従来手法では真の形状とまったく異なった個所に大きな曲率を持ち、形状の特徴量は著しく劣化している。これに対して提案手法ではおよそ正しい位置に 2つの大きなピークが確認できる。しかし同図では、誤った個所にも比較的大きなピークが現れることが確認される。また数値計算例と比較して推定精度が 0.01λ を越える場合が存在する。これは散乱波形に直接波の消え残り及び周辺からの微弱な干渉波が影響することが原因と考えられる。またこの形状推定に要する計算時間は約 2.0 秒であり、実時間処理のために更なる高速化が必要となる。

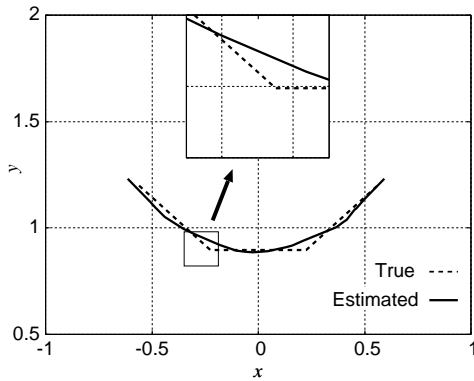


図 14 従来手法による形状推定例 (実験データに基づく)
Fig. 14 Estimated image with the conventional method.

6. 結 論

本稿では散乱波形推定を用いた任意凸形状に適する高解像度形状推定法を提案した。数値計算においてエッジ付近の推定誤差は従来と比較して大幅に改善し、エッジを含めた推定が可能であることを示した。この推定精度は約 $10^{-2}\lambda$ 程度であり、従来どのレーダ画像化手法でも達成困難な精度を実現する。また UWB 送受信モジュールを用いた測定実験により、提案手法の実環境での有効性を示した。今後は本手法を任意形状物体及び三次元問題へと拡張する必要がある。

文 献

- [1] C. Chiu, C. Li, and W. Chan, "Image reconstruction of a buried conductor by the genetic algorithm," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. 12, pp. 1946–1951, 2001.
- [2] T. Takenaka, H. Jia, and T. Tanaka, "Microwave imaging of an anisotropic cylindrical object by a forward-backward time-stepping method," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E84-C, no. pp. 1910–1916, 2001.
- [3] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura and T. Shinbo, "Automatic signal processing of front monitor radar for tunneling machines," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol.35, no.2, pp.354–359, 1997.
- [4] 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 Sens.*, vol.38, no.1, pp.296–303, 2000.
- [5] 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, 2004.
- [6] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.6, pp. 1631–1638, 2004.
- [7] T. Sakamoto and T. Sato, "An image stabilization algorithm for UWB pulse radars with fractional boundary scattering transform," *IEEE AP-S International Symposium*, pp. 1399–1402, Jul, 2006.
- [8] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A robust and

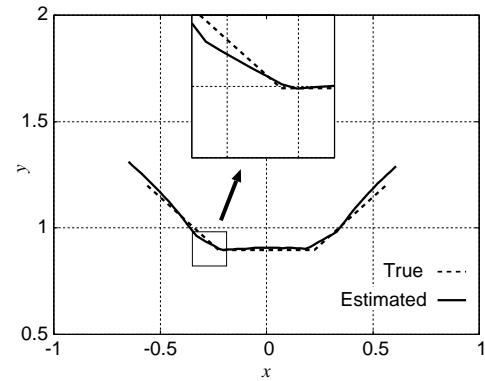


図 15 提案手法による形状推定例 (実験データに基づく)
Fig. 15 Estimated image with the proposed method.

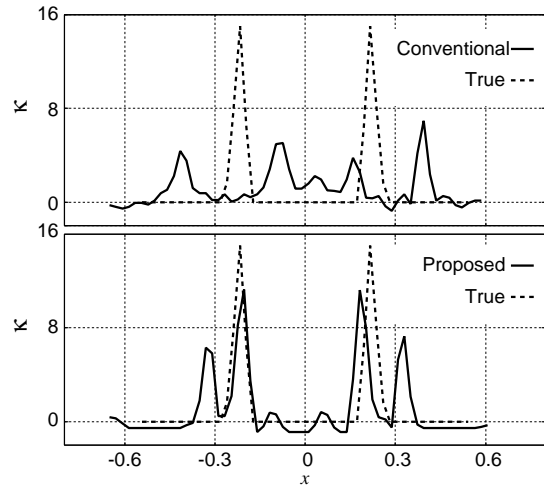


図 16 両手法による推定曲率 (実験データに基づく)
Fig. 16 Estimated curvature with each method in experiments.

fast imaging algorithm with an envelope of circles for UWB pulse radars", *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2006-Tokyo, Session 1P4*, Aug, 2006.

- [9] S. Kidera, T. Sakamoto, T. Sato, and S. Sugino, "An accurate imaging algorithm with scattered waveform estimation for UWB pulse radars", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E89-B, no. 9, pp. 2588–2595, Sep, 2006.
- [10] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A high-resolution imaging algorithm based on scattered waveform estimation for UWB pulse radar systems," *Proc. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1725–1728, Jul, 2005.