

UWB レーダのための周波数シフト補正を用いた 高速・高精度立体像推定法の実験的検討

木寺正平*, 阪本卓也, 佐藤 亨 (京都大学 情報学研究科)

An Experimental Study for High-speed and Accurate 3-D Imaging Algorithm

with Spectrum Shift Correction for UWB Pulse Radars

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

Abstract

UWB pulse radar systems have a great advantage for a high range resolution imaging, which can be applied to target detections or self-localization systems for robots or vehicles. We have already proposed a fast and stable 3-D imaging algorithm with an envelope of spheres, which is applicable to an arbitrary target shape. However, the estimated image with this method is distorted especially around the target edges due to scattered waveform deformations. In this paper, we propose a fast and accurate 3-D imaging algorithm by directly compensating for these distortions with a spectrum offset correction. The application examples with numerical simulations and an experiment verify that the proposed method accomplishes high-speed, accurate 3-D imaging, including target edges, with the order of 1/100 center wavelength of the UWB pulse.

キーワード：UWB パルスレーダ, 高精度・高速立体像推定, 球群の包絡面, 周波数シフト補正

(UWB pulse radars, accurate and fast 3-D imaging, envelope of spheres, spectrum offset correction)

1. はじめに

UWB パルスレーダを用いた各種近傍界計測技術が注目されている。同レーダは高い距離分解能を有し、アンテナ鏡面や航空機体等の精密な構造の非接触精密計測に適する。また光学的方法が不適切な濃煙や濃霧等の状況下での目標計測も可能であり、室内ロボット等の空間状況計測及び位置較正技術に適する。従来までのレーダ画像化技術として、領域積分方程式、マイグレーション法、モデルフィッティング等に基づく手法が提案されている [1]~[4]。しかし、何れも処理速度の点で上記用途には不適切である。これに対し、我々は高速立体境界推定法として SEABED 法を提案している [5], [6]。同手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、雑音に対し不安定になる。この不安定性を解決する方法として、我々は球群の包絡面を用いた高速・安定立体像推定法を提案している [9], [10]。同手法は、物体境界面が到来波面から定まる球群の包絡面として表現されるという原理を用いる。同手法はデータの微分を用いずに、雑音環境下でロバストかつ高速立体像推定を実現する。

しかし、同手法では直接散乱波形の歪みに起因する推定精度の劣化が生じる。特にエッジ回折波形は送信波形の積分波形に近くなり、同領域の精度劣化が確認されている。これに対して、我々は高速な散乱波形推定と形状推定の反復改良に基づく手法を提案している [11], [12]。同手法は 2 次元問題において、送信波長の約 1/100 という超波長推定精度を実現することを実環境下で確認している。しかし、3 次元問題においては、波形推定に数十秒程度を要し、反復改良に基づく本方法は実時間処理に適さない。

上記問題を解決するため、本稿では反復改良を用いない高速・高精度立体像推定法を提案する。提案手法では、散乱波形が送信波形に対して位相関係を保持しながら帯域変化を有することに着目し、波形の歪みに起因する推定距離誤差を中心周波数シフト量により補正する。同補正により、波形推定を用いずに直接的に形状を推定する。数値計算及び実環境下の特性評価において、1/100 波長の超波長精度と高速立体像推定が同時に実現可能であることを示す。

2. システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す。目標物体は明瞭な任意形状境界を有する。伝搬空間は非分散等方性媒質とし、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

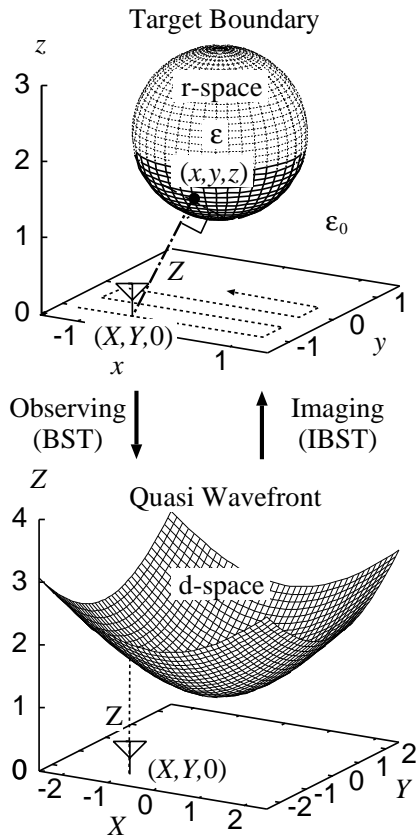


図1 目標物体 (r 空間) と擬似波面 (d 空間).

Fig.1 Relationship between r-space (Upper) and d-space (Lower).

し、その中心波長 λ で空間を正規化する．偏波は x 軸方向の直線偏波を仮定する．無指向性アンテナを、 $z = 0$ 平面内で走査する．アンテナ及び目標物体が存在する空間を r 空間とし、 (x, y, z) で表わす．目標は $z > 0$ に存在すると仮定する．素子位置をそれぞれ $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ とし、 $s'(X, Y, Z')$ を受信電界とする．但し $Z' = ct/2\lambda$, t は時間、 c 光速である． $s(X, Y, Z')$ を送信波形を用いる整合フィルタの出力波形とする．各 X, Y に対し、 $s(X, Y, Z')$ のピーク値を求め、これを Z とする． (X, Y, Z) で構成される曲面を擬似波面と呼び、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．

3. 従来手法

我々は既に高速立体像推定法として SEABED 法を提案している [6]．同手法は物体境界 (x, y, z) と擬似波面 (X, Y, Z) の間に成立する可逆な境界散乱変換 (BST: Boundary Scattering Transform) を利用する．逆境界散乱変換 (IBST) は $x = X - Z\partial Z/\partial X$, $y = Y - Z\partial Z/\partial Y$, $z = Z\sqrt{1 - (\partial Z/\partial X)^2 - (\partial Z/\partial Y)^2}$ として表わされる．図1は目標境界面と擬似波面の関係を示す．本手法は受信データよ

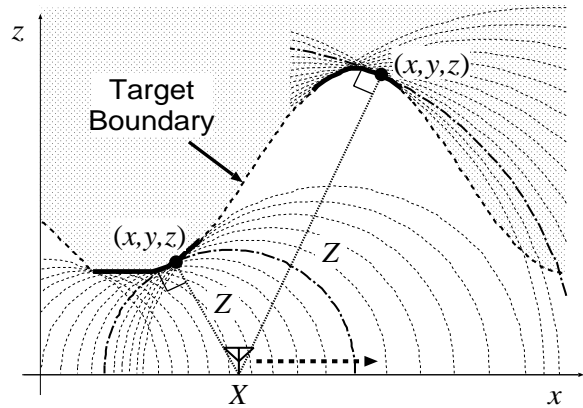


図2 物体境界と円包絡線との関係

Fig.2 Relationship between a target boundary and an envelope of circles.

り抽出される擬似波面に IBST を適用し、直接的に任意目標境界を抽出する．しかし SEABED 法は、変換式に擬似波面の微分を用いるため、雑音環境下で不安定性を有する．これに対して、我々は既に球群の包絡面を用いた高速かつ安定立体像推定法を提案している (Envelope 法と呼ぶ) [9], [10]．本手法は任意の物体境界面が $(X, Y, 0)$ を中心とし、 Z を半径とする球群の外または内包絡面として表現されるという原理を利用する．図2に2次元問題における物体境界面と円の外及び内包絡面との関係を示す．同図の通り、物体境界の一部はその曲率に応じて、円群の外または内包絡線に対応する．同原理は3次元問題へ拡張可能であり、微分を用いずに任意の目標境界面に対して高速かつ安定な形状推定を実現する．また凹面境界からの散乱波形は、一般に焦点通過による位相回転を有するため、この波形歪みに起因する推定像の劣化が確認されている [13]．しかし Envelope 法では、同位相回転の判別を擬似波面領域で、微分を用いずに判別することが可能であり、凹面目標境界において高精度推定を実現する [10]．

しかし、エッジ領域を有する凸面形状においては、本手法の推定精度は劣化する．図3は Envelope 法による推定像を示す．ここで波線は台形状を有する真の目標を示す．同図からエッジ付近で精度劣化が生じ、同手法で再構成される境界面は滑らかな曲面であり、エッジの存在を確認することが困難となる．一般に散乱波形は、目標境界に応じて送信波形に対して周波数特性を有する．特にエッジ領域からの散乱波形は、周波数特性変化に起因する波形歪みが顕著となる．上記波形歪みは、整合フィルタによる擬似波面抽出誤差となり、推定像の劣化に直接的に対応する．図4は各素子位置における擬似波面推定精度を示す．但し $\epsilon = |Z_{\text{true}} - Z|$ であり、 Z_{true} は真の擬似波面を示す．同図より、エッジ付近からの散乱波が卓越する領域 ($(X, Y) = (0.6\lambda, 0.6\lambda)$ の周辺) で、精度劣化を確認できる．同領域での推定誤差は約

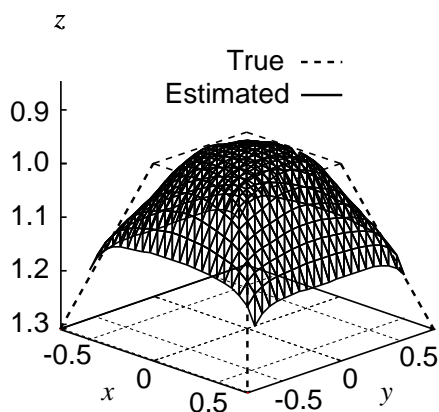


図 3 Envelope 法による推定像

Fig. 3 Estimated image with Envelope.

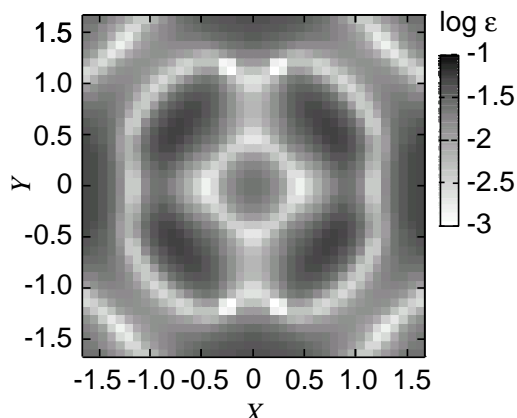


図 4 Envelope 法における擬似波面推定精度

Fig. 4 Accuracy for quasi wavefront with Envelope.

$7.0 \times 10^{-2} \lambda$ 程度となる。

同問題を解決するため、我々は波形推定と形状推定の反復改良に基づく高精度形状推定法 (Envelope+WE 法と呼ぶ) を提案している [11], [12]. 本手法では整合フィルタを、初期形状より高速に推定される散乱波形を用いて更新する。更新される整合フィルタ出力波形より擬似波面を再抽出し、収束条件を満す場合、推定形状を更新するという手順に基づく。各素子での波形推定は、散乱に寄与する物体境界面に沿う単純なグリーン関数積分を用いる。同手法は 2 次元問題において、 $1.0 \times 10^{-2} \lambda$ の推定精度を実環境下で実現することを確認している。

以下では同手法を 3 次元問題へ拡張する場合を示す。図 5, 6 に Envelope+WE 法を用いた推定立体形状及び擬似波面推定精度を示す。但し、更新回数は 2 回である。同図より推定精度の多少の改善は確認できるが、エッジ領域における推定精度はまだ不十分であることがわかる。エッジ付近での擬似波面推定誤差は $3.0 \times 10^{-2} \lambda$ 程度である。また更新回数を増大させても真の目標境界へ収束しないことを確認して

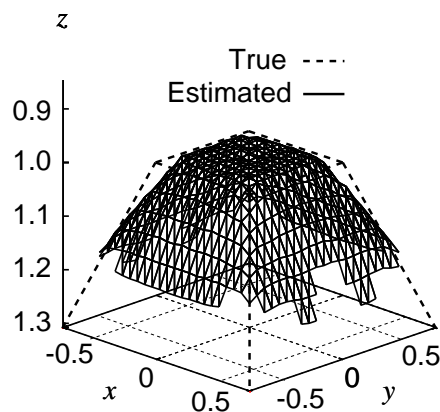


図 5 Envelope+WE 法での推定像

Fig. 5 Estimated image with Envelope with WE.

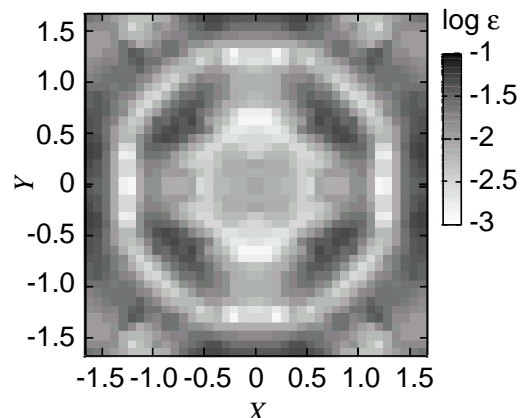


図 6 Envelope+WE 法における擬似波面推定精度

Fig. 6 Accuracy for the quasi wavefront with Envelope with WE.

いる。これは、散乱波形が単純なグリーン関数で表わせないことに起因する波形推定誤差のためである。更に同波形推定法では、偏波の影響を考慮しないため、2 次元問題と比較して、推定精度が劣化する。また同手法は反復改良に基づくため、数十秒の処理時間を要する。

4. 提案手法

前節での推定精度及び処理時間に関する問題を解決するため、本稿では周波数シフト補正を用いた高速・高精度立体像推定法を提案する。本手法は、散乱波形の周波数特性変化を利用した直接的な擬似波面補正を行う。前述の通り、送信波形を用いた整合フィルタリングでは、波形の変化に応じて擬似波面推定誤差を生じる。図 7 に送信波形及び散乱波形の整合例を示す。本手法は散乱波形が送信波形に対し、フーリエ変換の位相を保持しながら帯域変化を有することに着目し、擬似波面補正量 ΔZ を以下の式で近似する。

$$\Delta Z = \frac{f_0}{W} (f_{tr}^{-1} - f_{sc}^{-1}), \quad (1)$$

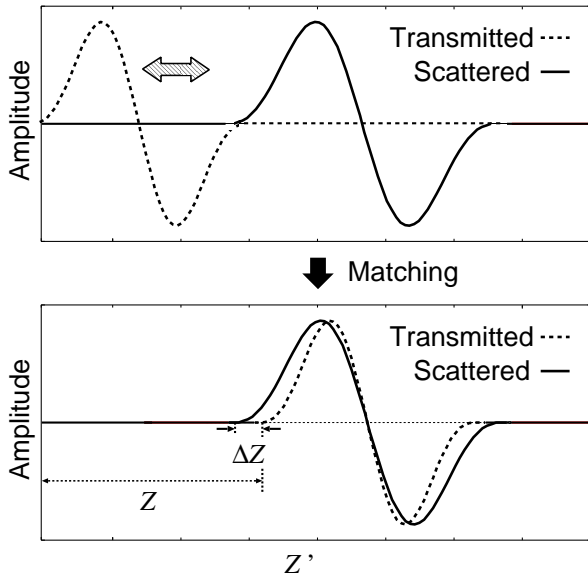


図 7 送信波形及び散乱波形の整合例

Fig. 7 Matching examples between scattered and transmitted waveforms.

但し f_{tr} と f_{sc} は送信及び散乱波形の中心周波数である．また $f_0 = c/\lambda$ であり， W は信号比帯域幅に依存する正規化定数である．本稿では $W = 4$ とする．ここで f_{sc} は以下の通り，時間領域で推定する [14]，

$$f_{sc} = \frac{1}{2\pi\Delta t} \angle \left(\sum_{i=0}^N s_i^* s_{i+1} \right), \quad (2)$$

但し $s_i = s_{sc}(i\Delta t + 2Z\lambda/c)$ であり， $s_{sc}(t)$ は各散乱波形の解析信号を示す．また Δt は時間刻み幅， N は総時間サンプル数を示す．本稿では， $N\Delta t = 1.0\lambda$ とする．式 (2) は，周波数推定の誤差原因となる多重散乱波や直接波の消え残りの影響を時間領域で除去することが可能である．以下に提案手法の実手順を示す．但し f_{tr} は，送信波形に式 (2) を適用して決定する．

1. 整合フィルタ出力波形 $s(X, Y, Z')$ の有意なピーク値を繋ぎ擬似波面 (X, Y, Z) を抽出する
2. 各素子で式 (2) により f_{sc} を求め，式 (1) より擬似波面補正量 ΔZ を計算する．
3. 各 (x, y) に対し， z を次式で求める．

$$z = \max_{(X, Y) \in \Gamma} \sqrt{(Z + \Delta Z)^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2} \quad (3)$$

但し， Γ は擬似波面の定義域である

4. 擬似波面の端部領域に相当する球群を推定点集合より除き，最終的な境界集合を決定する

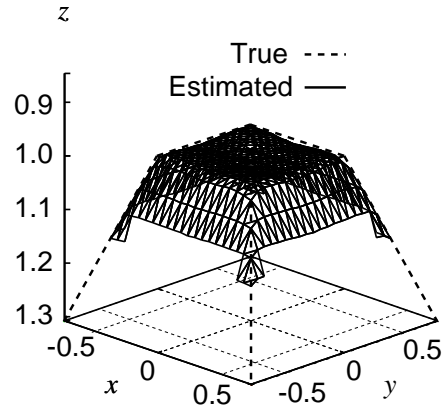


図 8 Envelope+SOC 法による推定像

Fig. 8 Estimated image with Envelope with SOC.

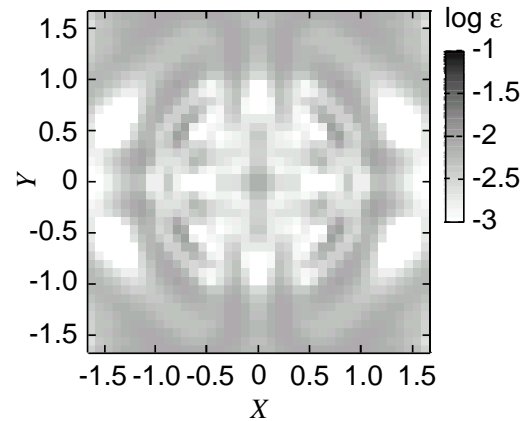


図 9 Envelope+SOC 法における擬似波面推定精度

Fig. 9 Accuracy for the quasi wavefront with Envelope with SOC.

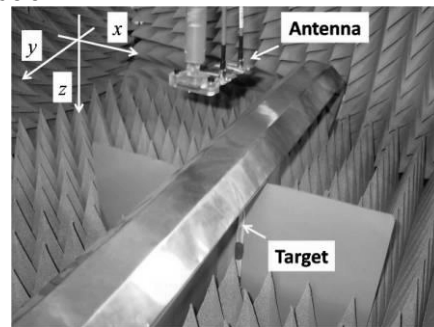


図 10 実験でのアンテナ及び目標物体配置

Fig. 10 Arrangement of antennas and target in the experiment.

本手法を Envelope+SOC(Spectrum Offset Correction) 法と呼ぶ．本手法は直接的な擬似波面補正を用いるため，高速・高精度立体像推定を実現する．

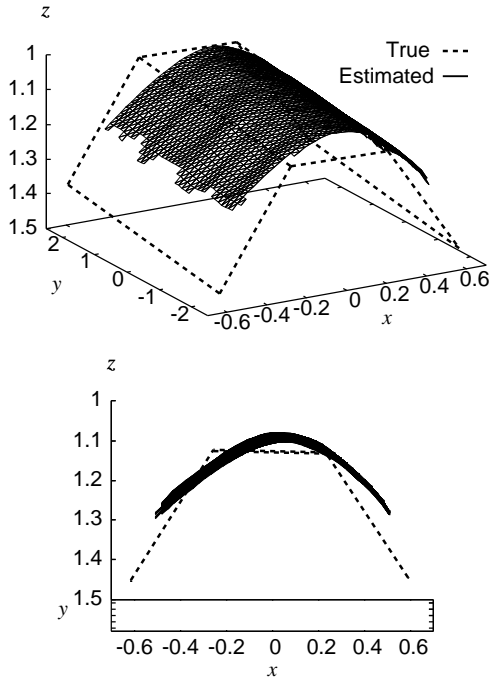


図 11 実験データに基づく推定像 (Envelope 法)

Fig. 11 Estimated image with Envelope in the experiment.

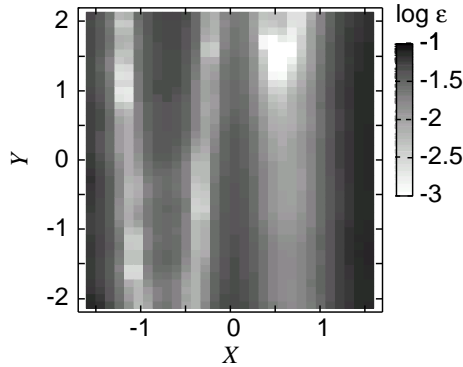


図 12 実験データに基づく擬似波面推定精度 (Envelope 法)

Fig. 12 Accuracy for the quasi wavefront with Envelope in the experiment.

5. 形状推定評価

5.1 数値計算に基づく特性評価

図 8, 9 に Envelope+SOC 法を用いる場合の境界推定像及び擬似波面推定精度を示す。同図より物体エッジ等を含めて非常に高精度な立体像推定を実現することが確認できる。エッジ領域での擬似波面推定誤差は約 $1 \times 10^{-2} \lambda$ である。また処理時間は Xeon 3.2 GHz プロセッサで約 0.2 秒であり、実時間処理に適する。これは境界推定精度が、擬似波面の推定誤差のみに依存し、その誤差が周波数シフトを用いることにより高速かつ高精度に補正されるためである。

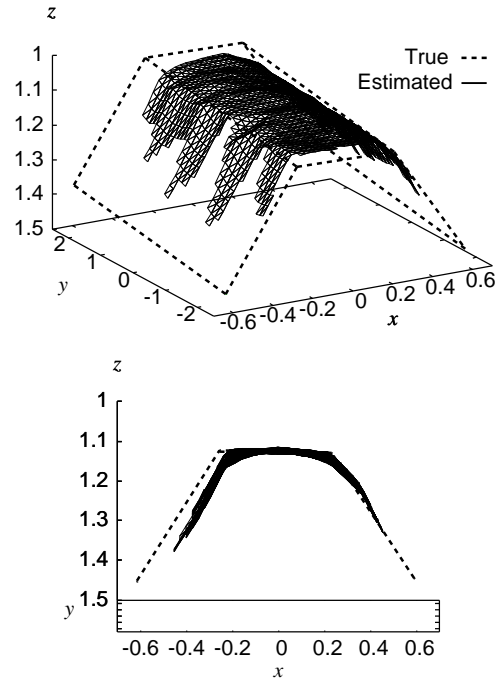


図 13 実験データに基づく推定像 (Envelope+SOC 法)

Fig. 13 Estimated image with Envelope with SOC in the experiment.

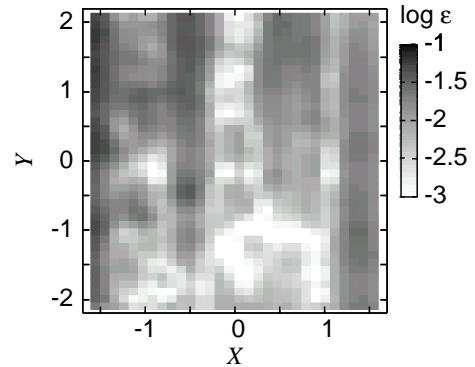


図 14 実験データに基づく擬似波面推定精度 (Envelope+SOC 法)

Fig. 14 Accuracy for the quasi wavefront with Envelope with SOC in the experiment.

5.2 実験に基づく特性評価

本節では、実験データに基づく提案手法の特性評価を示す。本実験で中心周波数 3.3 GHz, 10dB 帯域幅 2.0 GHz の UWB 信号を用いる。図 10 に目標形状及びアンテナ配置を示す。アンテナは、長軸対短軸比が 17 dB の楕円偏波特性を有し、長軸方向は図の y 軸方向である。アンテナ指向性の 3dB ビーム幅は、約 90° である。厚さ 3 mm ステンレス鋼板で構成される台形形状目標を用いる。送受信アンテナ素子間隔は y 方向に 48 mm であり、 $z = 0$ 平面内で $-170 \text{ mm} \leq x \leq 170 \text{ mm}$, $-200 \text{ mm} \leq y \leq 200 \text{ mm}$ の範囲で走査する。各方向の走査サンプル間隔は 10 mm であ

る．受信データの同相積分回数は 1024 回である．SN 比は約 35dB である．

図 11 と 12 に Envelope 法による推定像と擬似波面推定精度を示す．同図より，ウェッジ領域で推定精度の劣化が確認できる．これは数値計算の場合と同様に，散乱波形の歪みに起因する．形状推定誤差評価のため，評価値 μ を以下に導入する．

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{i=0}^{N_T} \min_x \|x - x_e^i\|^2}, \quad (4)$$

但し x と x_e^i はそれぞれ真の目標境界点及び推定目標境界点の位置座標を示す． N_T は推定点数の総数である．Envelope 法での μ は $3.178 \times 10^{-2}\lambda$ である．一方，図 13 及び 14 は Envelope+SOC 法による推定像及び擬似波面推定誤差である． μ は $1.631 \times 10^{-2}\lambda$ となる．同図より従来手法と比較し，特に物体ウェッジ領域や上面部を含めて高精度な立体像推定を実現する．また計算時間は約 0.2 秒程度となり，実時間処理に適する．しかしながら，数値計算例と比較し，物体端点領域において推定精度の劣化が生じることが分かる．これは，目標以外からの不要なエコー及び直接波形の除去不完全性による周波数推定誤差に起因する．特に直接波除去の不完全性は，測定機器の揺らぎ及び信号発生器の不安定性に起因する．また実験で用いる信号の比帯域幅が比較的小さいために上記直接波の消え残りの影響が大きくなる．したがって，安定な信号発生器及び十分な比帯域幅を有する信号源が本手法での高精度推定のためには必要である．

6. む す び

本稿では周波数シフト補正を用いた高精度立体像推定法を提案した．本手法は直接的な擬似波面補正により高速・高精度立体像推定を実現することを数値計算及び実験により示した．数値計算においては，エッジ等を含めた形状推定精度において約 1/100 送信波長の推定精度を実現することを示している．また処理時間 Xeon 3.2 GHz プロセッサで約 0.2 秒であり，高速性と精度を同時に保持することを示した．更に実験データを用いて，本手法の有効性を確認し，実環境下においても高精度立体像推定が可能であることを示した．本手法は従来手法では達成困難な高速性，安定性及び精度を高いレベルで同時に実現する．しかし，目標が波長よりも小さいスケールでの表面変化を有する場合，上記性能を得ることは困難となり，複雑形状物体への拡張が今後の重要な課題となる．

謝 辞

本研究の一部は 21 世紀 COE プログラム (課題番号 14213201) 及び科学研究費補助金基盤研究 A(課題番号 17206044) による．

文 献

- [1] A. Massa, D. Franceschini, G. Franceschini, M. Pastorino, M. Raffetto and M. Donelli, "Parallel GA-based approach for microwave imaging applications," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. 53, no. 10, pp. 3118–3127, Oct, 2005.
- [2] D. Liu, G. Kang, L. Li, Y. Chen, S. Vasudevan, W. Joines, Q.H. Liu, J. Krolik and L. Carin, "Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. 53, no. 9, pp. 3058–3066, Sep, 2005.
- [3] 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.
- [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, "A fast algorithm for 3-dimensional imaging with UWB pulse radar systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.3, pp. 636–644, 2007.
- [7] S.A. Greenhalgh and L. Marescot, "Modeling and migration of 2-D georadar data: a stationary phase approach," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 9, pp. 2421–2429, Sep, 2006.
- [8] M. Converse, E.J. Bond, B.D. Van Veen and S.C. Hagness, "A computational study of ultra-wideband versus narrowband microwave hyperthermia for breast cancer treatment," *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, vol. 54, no. 5, pp. 2169–2180, May, 2006.
- [9] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "A Robust and Fast Imaging Algorithm with an Envelope of Circles for UWB Pulse Radars", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.7, pp. 1801–1809, July, 2007.
- [10] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "A Robust and Fast 3-D Imaging Algorithm without Derivative Operations for UWB Pulse Radars," *URSI. International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS) 2007*, Jul. 2007.
- [11] 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, Sept., 2006
- [12] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "A High-Resolution Imaging Algorithm without Derivatives Based on Waveform Estimation for UWB Radars", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.6, pp. 1487–1494, June, 2007.
- [13] 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.
- [14] K. Nishimura, T. Sato, T. Nakamura, and M. Ueda, "High Sensitivity Radar-Optical Observations of Faint Meteors," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E84-C, no.12, pp. 1877–1884, Dec., 2001.