

壁透過レーダのための高解像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-Resolution 3-D Imaging Algorithm

without Derivatives for UWB Through-the-Wall Radars

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

Abstract

Through-the-wall imaging techniques with UWB radars are promising candidates for reliable human detection, especially in disaster areas, where victims are buried under collapsed walls. These applications require high-resolution target imaging to identify a human body. We have already proposed a high-quality 3-dimensional (3-D) imaging algorithm in the form of Envelope, that is aimed at near field sensing for non-contact measurement. Envelope achieves real-time accurate 3-D imaging with group mapping from multiple observed ranges to target points, and offers a reliable image even in noisy situations. However, this method does not maintain its original quality for through-the-wall imaging because an observed range shift due to wall penetration causes a serious distortion in the image. This paper presents a high-resolution 3-D imaging algorithm by modifying the original Envelope, and which gives a more accurate object shape behind a wall. Furthermore, to enhance the resolution of the estimated images, this method is combined with a direct waveform compensation method, known as SOC (Spectrum Offset Correction). Numerical simulations and an experiment verify that our proposed method achieves high-resolution 3-D imaging for through-the-wall radar applications.

キーワード: UWB 壁透過レーダ, 高解像度立体像推定, 実験的検討, 修正球群の包絡面, 周波数シフト補正

Keywords: UWB through-the-wall radars, high-resolution 3-D imaging, experimental study, envelope of modified spheres, spectrum offset correction

1. はじめに

超広帯域 (Ultra Wide-band; UWB) 信号を用いた壁透過レーダは, 災害現場での救助等, 多くの応用に有望である. 上記用途には, 実時間性能・信頼性・高解像度を保有するレーダ画像化手法が必要となる. 従来の壁透過レーダは, 合成開口処理, 時間逆転または多次元最適化等に基づくため, 何れも膨大な計算時間を要し, また十分な解像度が得ることが困難である [1] ~ [4]. これに対し, 実時間処理を実現する画像化手法として, 我々は SEABED 法を提案している [5], [6]. SEABED 法は観測距離と目標境界に成立する境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform; BST) を用いて高速な画像化を実現する. しかし壁透過レーダにおいては, 壁伝搬遅延に起因する観測距離誤差のため画像化精度が劣化する. 同問題に対し, 壁厚みと比誘電率による距離補正を用いて, 目標形状を修正する手法が提案されている [7]. しかし同方法は, 壁入射角度に依存する距離補正量を近似しており, 正確な観測距離情報が与えられても厳密に目標境界を再現することができない. また SEABED 法は観測距離波

面の微分を用いるために, 不規則性雑音に対する推定像の不安定性が問題となる.

同問題に対して, 我々は Envelope 法を提案している [8], [9]. 本手法では, 目標境界が観測距離を半径, 観測位置を中心とする球群の包絡面上に存在するという原理を用いる. 同原理は微分を用いずに任意の立体境界を厳密に再現し, 従来の不安定性を本質的に解決する. しかし, 壁透過レーダにおいては, SEABED 法と同様の理由により, 同手法による推定像は劣化する. 本稿では, 従来の Envelope 法を拡張し, 壁面裏目標のための高速・高精度画像化アルゴリズムを提案する. 本手法は, 壁伝搬経路によって決定される修正球群の包絡面が, 目標境界と一致するという原理に基づく. 同原理は, 壁の比誘電率及び厚みが既知であれば, 正確な距離情報を用いて任意目標境界を厳密に決定できる. また本手法は, 散乱波形変化に起因する距離誤差に対する補正手法 SOC (Spectrum Offset Correction) 法 [9] を併用することで, 目標エッジ領域を含めて超波長解像度を実現する. 本稿ではまず 2 次元問題を仮定し, 同原理を 3 次元問題へ拡張する. 数値計算及び実験により, 本手法の特性評価を与

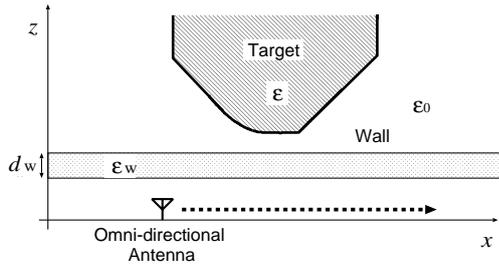


図 1 システムモデル.
Fig. 1 System model.

える .

2. 2次元問題

2.1 システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す . 明瞭な境界を有する任意凸形状目標を仮定する . 無指向性送受信素子を x 軸上で走査する . 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 . 比誘電率 ϵ_w , 厚さ d_w の平壁を , x 軸に平行に配置する . ϵ_w 及び d_w は既知定数とする . 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 . 素子及び目標物体が存在する空間を (x, z) で表わす . 目標は $z > 0$ に存在すると仮定する . 素子位置をそれぞれ $(x, z) = (X, 0)$ とし , $s'(X, Z')$ を受信電界とする . 但し $Z' = ct/2\lambda$, t は時間 , c 光速である . $s(X, Z')$ を送信波形を用いる整合フィルタの出力波形とする . X に対し , $s(X, Z')$ のピーク値を求め , これを Z とする . (X, Z) で構成される曲線を擬似波面と呼ぶ .

2.2 従来手法

我々は以前に , 高速画像化手法として SEABED 法を提案している [6] . 同手法は物体境界 (x, z) と擬似波面 (X, Z) の間に成立する可逆な境界散乱変換 (BST) を利用する . 逆境界散乱変換 (IBST) は ,

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

として表わされる . 同手法は観測距離とその微分を用いて直接的に目標境界を決定するため , 高速処理が可能である . 以下に SEABED 法の壁透過レーダにおける適用例を示す . 壁は $0.5 \leq z \leq 0.7$ に配置する . 壁の導電率は 2.0×10^{-3} S/m , 比誘電率は $\epsilon_w = 5.0$ とする . 素子走査範囲は $-2.5 \leq x \leq 2.5$ であり , 走査サンプル数は 101 点とする . 受信信号は FDTD (Finite Difference Time Domain) 法で生成する . 図 2 に各素子での整合フィルタ出力波形と抽出される擬似波面を示す . ここでは雑音を考慮しない . 壁面反射波に起因する擬似波面は除去する . 図 3 に SEABED 法による推定像を示す . 同図の通り , 壁伝搬遅延に起因する推定像の歪みが確認できる . この歪みに対する形状補正手法

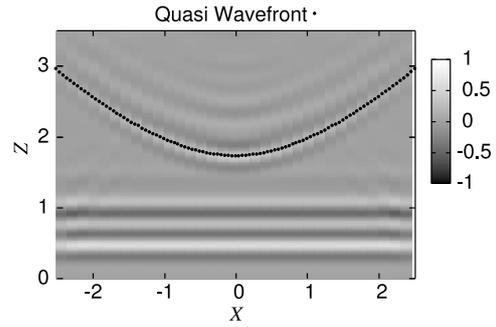


図 2 各素子での整合フィルタ出力と擬似波面

Fig. 2 Output of the matched filter and extracted quasi-wavefront for each antenna location.

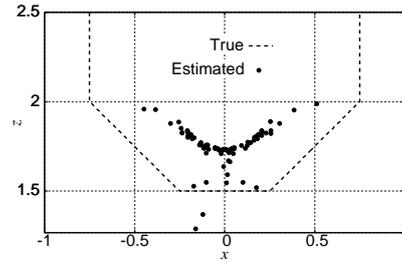


図 3 SEABED 法による推定像

Fig. 3 Estimated image with SEABED.

が提案されている [7] . しかし , 目標位置と入射角度に依存する距離補正量を近似するため , 正確な擬似波面を用いても , 目標境界面を正確に再現できない . また IBST における微分操作 $\partial Z/\partial X$ は , 微小な観測距離誤差を強調するため , 図 3 の通り推定像に揺らぎが生じる .

この問題に対し我々は既に , 高速かつ安定画像化手法として , Envelope 法を提案している [8] . 本手法は任意の物体境界が $(X, 0)$ を中心とし , Z を半径とする円群の外または内包絡線として表現されるという原理を利用する . 特に凸境界目標においては , その z 座標は各 x に対して次式で表現される .

$$z(x) = \max_X \sqrt{Z^2 - (x - X)^2} \quad (2)$$

図 4 に凸物体境界面と円群の外包絡線との関係を示す . 同手法は微分操作を排し , 任意の凸目標境界面に対して , 厳密に目標境界推定を実現する . 図 5 に Envelope 法を用いた推定像を示す . 但し , SEABED 法と同様に図 2 の擬似波面を用いる . 同図より微分に起因する不安定性は低減されるが , 壁伝搬遅延による推定像の劣化が確認できる . これは同距離誤差に起因する各円半径の増大に伴い , その円群の包絡線が真の目標境界の一部を覆うためである .

2.3 提案手法

前節の問題点を解決するため , Envelope 法を壁透過レーダモデルへ拡張する . 壁面透過において , 各仰角に対する伝搬経路は , 壁の比誘電率 ϵ_w 及び厚み d_w を用いてスネルの

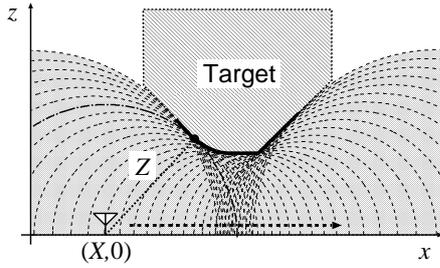


図 4 凸目標境界と円群の包絡線の関係

Fig. 4 Relationship between convex target boundary and envelopes of circles.

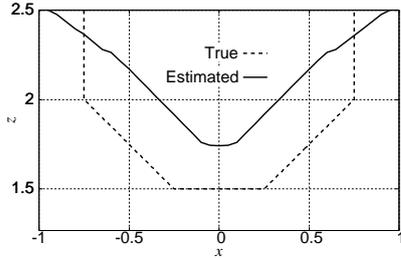


図 5 従来 Envelope 法による推定像

Fig. 5 Estimated image with the original Envelope.

法則から導出される。Envelope 法の原理を拡張し、本手法は目標境界 (x, z) を、次式で示す修正円の包絡線として表現する。

$$\left. \begin{aligned} x &= X + \{Z + d_w(1 - \epsilon_w)\Psi(\phi)\} \cos \phi \\ z &= d_w + \{Z - \epsilon_w d_w \Psi(\phi)\} \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

但し、仰角 ϕ は $0 \leq \phi \leq \pi$ であり、 $\Psi(\phi)$ は

$$\Psi(\phi) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_w - \cos^2 \phi}} \quad (4)$$

で定義される。図 6 に各仰角に対する伝搬経路と修正円を示す。特に凸境界目標は修正円群の外包絡線上に存在する。従って同目標境界の z 座標は、各 x に対して次式で表わされる。

$$z(x) = \max_x [d_w + \{Z - \epsilon_w d_w \Psi(\hat{\phi})\} \sin \hat{\phi}] \quad (5)$$

但し $\hat{\phi}$ は、各 x に関する $\cos \hat{\phi}$ の 4 次方程式、

$$\begin{aligned} &Z^2 \cos^4 \hat{\phi} - 2Z(x - X) \cos^3 \hat{\phi} \\ &+ \{(x - X)^2 - Z^2 \epsilon_w + (\epsilon_w - 1)^2 d_w^2\} \cos^2 \hat{\phi} \\ &+ 2(x - X)Z \epsilon_w \cos \hat{\phi} - (x - X)^2 \epsilon_w = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

の解から決定する。本手法を修正 Envelope 法と呼ぶ。

2.4 特性評価

図 7 に修正 Envelope 法による推定像を示す。但し、従来法と同様に図 2 の疑似波面を用いる。同図より提案手法は壁伝搬遅延に起因する推定像劣化を低減し、ほぼ正確な目標境

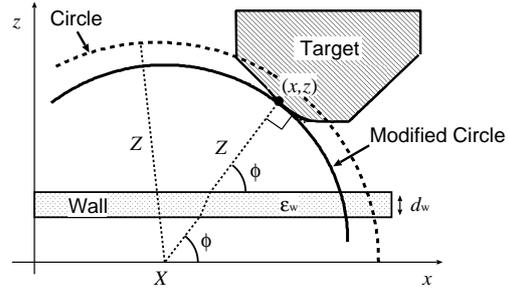


図 6 各仰角に対する壁伝搬経路と修正円

Fig. 6 Bent scattering path and modified circles.

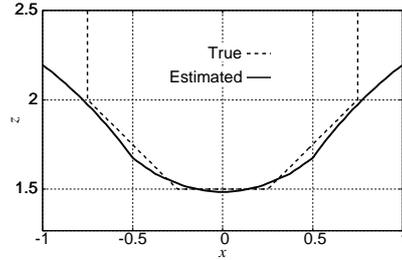


図 7 修正 Envelope 法による推定像

Fig. 7 Estimated image with the modified Envelope.

界を再現することが確認できる。しかし、同推定像では特に目標エッジまたは鏡面領域において推定精度の劣化が生じる。これは各散乱波形と送信波形の波形不整合に起因する観測距離誤差によるものである。同距離誤差を高速に補正する手法として、SOC 法を提案している [9]。SOC 法は波形不整合に起因する距離誤差 ΔZ を次式で近似する、

$$\Delta Z = (f_{tr}^{-1} - f_{sc}^{-1}) f_0 / W \quad (7)$$

但し $f_0 = c/\lambda$ であり、 f_{tr} 及び f_{sc} はそれぞれ送信及び受信信号の中心周波数である。 W は信号比帯域幅で決定されるパラメータであり、 $W = 4$ と固定する。図 8 は SOC 法を適用した後の推定像を示す。同図に示す通り、提案手法はエッジ領域も含めた高解像度境界推定を実現する。これは、同手法の原理が疑似波面 (X, Z) と壁面裏目標境界 (x, z) との対応関係を厳密に決定するためである。計算時間は Xeon 2.8 GHz プロセッサで約 0.2 秒であり、実時間処理を実現する。

3. 3次元問題

3.1 従来 Envelope 法

図 9 に 3 次元問題でのシステムモデルを示す。目標境界及び送信電流波形に関する仮定は 2 次元問題と同じである。無指向性送受信素子を $z = 0$ 平面で走査する。偏波は x 軸方向の直線偏波とする。比誘電率 ϵ_w 、厚み d_w の平面壁を $z = 0$ 平面に平行配置する。素子及び目標物体が存在する空間を (x, y, z) で表わす。素子位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ での受信電界に整合フィルタ適用後の出力波形を $s(X, Y, Z')$ と

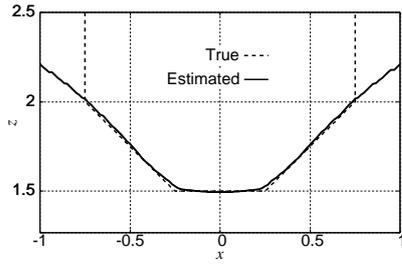


図 8 修正 Envelope 法による推定像 (SOC 法適用後)

Fig. 8 Estimated image with the modified Envelope and SOC.

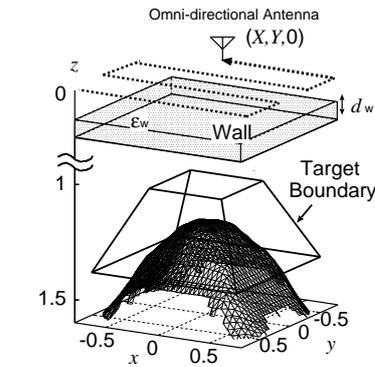


図 9 3次元システムモデル及び従来 Envelope 法による推定像

Fig. 9 System model and the estimated image with the original Envelope in 3-D problem.

する．各 X, Y に対する $s(X, Y, Z')$ のピーク値を Z とし，連結される曲面 (X, Y, Z) を擬似波面と呼ぶ．

Envelope 法の 3 次元モデルは以下の通りである．同手法では，目標境界が中心 $(X, Y, 0)$ ，半径 Z の球群の内及び外包絡面として表現されるという原理を用いる [9]．特に凸目標境界の z 座標は，与えられた (x, y) に対して次式で計算される．

$$z(x, y) = \max_{X, Y} \sqrt{Z^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2} \quad (8)$$

同手法は擬似波面の微分操作を排し，任意の凸立体境界を高速かつ安定に再現する．しかし壁面裏目標計測では，壁伝搬に起因する距離誤差が推定像の劣化を引き起こす．図 9 に同手法による推定像を示す．ここでは，台形目標を仮定し，平面壁は $0.35 \leq z \leq 0.49$ に設置する．壁の比誘電率は $\epsilon_w = 5.0$ ，導電率は $\sigma = 2.0 \times 10^{-3}$ S/m とする．素子範囲は $-1.75 \leq x, y \leq 1.75$ とし，走査サンプル数は x 軸， y 軸方向とも 51 点とする．同図に示す推定像は，壁伝搬遅延のために z 軸方向に大きな誤差を有している．また伝搬距離シフト量は壁入射角度に依存するために，目標形状の特徴抽出も困難となる．

3.2 修正 Envelope 法

前節の問題点を解決するため，Envelope 法を壁透過レーダモデルへ拡張する．3 次元問題でのスネルの法則及び平面

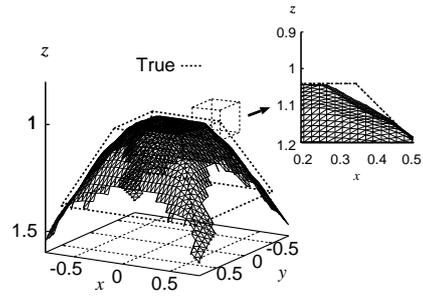


図 10 修正 Envelope 法による推定像 (SOC 適用後)

Fig. 10 Estimated image with the modified Envelope and SOC in 3-D problem.

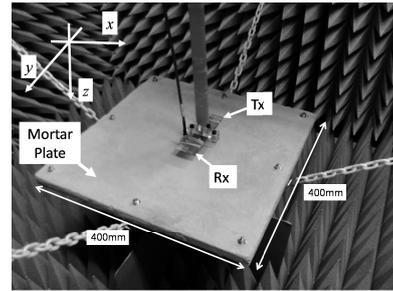


図 11 送受信素子とモルタル板の配置

Fig. 11 Arrangement of antennas and mortar plate.

壁の仮定から，各仰角と方位角から定まる散乱経路は同一平面に存在する．修正 Envelope 法は目標立体境界を次の修正球群の包絡面で決定する．

$$\left. \begin{aligned} x &= X + \{Z + d_w(1 - \epsilon_w)\Psi(\phi)\} \cos \phi \cos \theta \\ y &= Y + \{Z + d_w(1 - \epsilon_w)\Psi(\phi)\} \cos \phi \sin \theta \\ z &= d_w + \{Z - \epsilon_w d_w \Psi(\phi)\} \sin \phi \end{aligned} \right\} (9)$$

但し $0 \leq \theta \leq \pi$ 及び $0 \leq \phi \leq \pi/2$ である．同手法は，任意の壁面裏立体境界が同修正球群の内または外包絡面で表現されるという原理に基づく．特に凸立体目標境界の z 座標は，各 (x, y) に対して次式，

$$z(x, y) = \max_{X, Y} \{d_w + \{Z - \epsilon_w d_w \Psi(\hat{\phi})\} \sin \hat{\phi}\} \quad (10)$$

で表現される．但し $\hat{\phi}$ は，式 (9) の第 1, 2 式に，各 (x, y) を代入して数値的に求める．

3.3 数値計算による特性評価

図 10 に修正 Envelope 法による推定像を示す．但し SOC 法による距離補正を適用している．同図より壁伝搬遅延を考慮に入れた修正球群の包絡面と高精度な距離情報を用いることで，目標エッジ領域を含め，高解像度立体像推定が実現されることが確認できる．計算時間は Xeon 3.2 GHz プロセッサで約 4 秒である．また同手法の形状推定精度は，壁導電率に依存しないことを確認している．これは同手法が散乱強度を利用しないことに起因する．更に白色雑音環境下においては， $S/N \geq 25\text{dB}$ で同解像度を保持することを確認

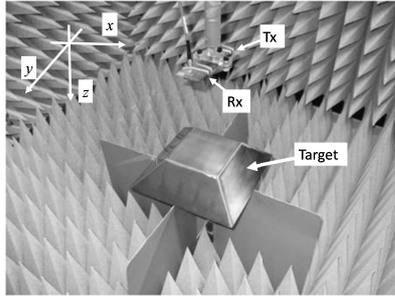


図 12 送受信素子と台形目標の配置

Fig. 12 Arrangement of antennas and trapezoidal target.

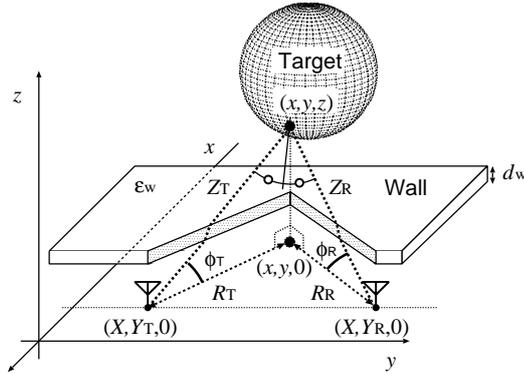


図 13 バイスタティックレーダにおける各散乱経路

Fig. 13 Scattering path and target boundary in bi-static model.

している．ここで、 S/N は整合フィルタ通過後の信号及び雑音平均電力の比として定義する．

3.4 実環境下での特性評価

3.4.1 実験環境

本節では実データに基づく各手法の特性評価を示す．中心周波数 3.3 GHz, 10dB 帯域幅 2.0 GHz の UWB 信号を用いる．送信中心波長は約 90 mm である．素子の指向性 3dB ビーム幅は、約 90° である．厚さ 17mm, 比誘電率 $\epsilon_w = 4.79$ のモルタル平面板を用いる．但し比誘電率は伝搬遅延量により計測している．図 11 及び 12 は、素子とモルタル板及び台形目標の配置を示す．モルタル板は走査面と平行に配置する．偏波は長軸対短軸比が 17 dB の楕円偏波であり、長軸方向は同図の y 軸方向である．バイスタティックレーダを仮定し、送受信素子間隔は y 方向に 75 mm である．これを $z = 0$ 平面内で $-200 \text{ mm} \leq x \leq 200 \text{ mm}$, $-150 \text{ mm} \leq y \leq 200 \text{ mm}$ 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．目標からの直接散乱波を抽出するため、壁のみの反射波を受信信号から差し引く．

3.4.2 バイスタティックレーダへの拡張

修正 Envelope 法を実データに適用するため、同手法をバイスタティックモデルへ拡張する．図 13 は同モデルにおける散乱パスと目標散乱位置の関係を示す．ここで送受信位置

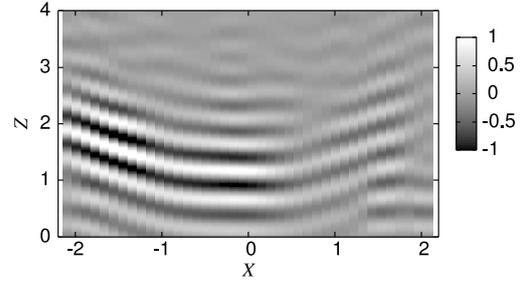


図 14 実データに基づく整合フィルタ出力波形 ($Y = 0.64$)

Fig. 14 Output of the matched filter at $Y = 0.64$ in the experiment.

座標を $(X, Y_T, 0)$, $(X, Y_R, 0)$ と定義する． ϕ_T 及び ϕ_R は、送受信位置での各仰角を示す．各散乱平面にスネルの法則を適用することにより、各伝搬距離 Z_T, Z_R は次式で表現される．

$$Z_{T,R} = \frac{z_{T,R} - d_w}{\sin \phi_{T,R}} + \epsilon_w d_w \Psi(\phi_{T,R}) \quad (11)$$

但し、 z_T, z_R は、 ϕ_T, ϕ_R に対する散乱位置の z 座標を示す．また次式が成立する．

$$R_{T,R} = \frac{z_{T,R} - d_w}{\tan \phi_{T,R}} + d_w \Psi(\phi_{T,R}) \cos \phi_{T,R} \quad (12)$$

但し、 $R_T = \sqrt{(X-x)^2 + (Y_T-y)^2}$ 及び $R_R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y_R-y)^2}$ はそれぞれ、着目する目標上の点 (x, y) と送受信素子までの距離である．式 (11) と (12) より次の関係式を得る．

$$\epsilon_w R_T \tan \phi_T - Z_T \sin \phi_T = \epsilon_w R_R \tan \phi_R - Z_R \sin \phi_R \quad (13)$$

式 (13) は各 ϕ_T に対して、 $\sin \phi_R$ に関する 4 次方程式となる．同方程式の解を用いて、 $\phi_R = g(\phi_T)$ と定義する．散乱中心の z 座標は送受信素子の双方からのパスを考慮し、二通りで表され、 z_T, z_R は次式を満たす．

$$z_T = d_w + \{Z_T - \epsilon_w d_w \Psi(\phi_T)\} \sin \phi_T \quad (14)$$

$$z_R = d_w + \{2Z - Z_T - \epsilon_w d_w \Psi(g(\phi_T))\} \sin g(\phi_T) \quad (15)$$

真の散乱中心は一点であるので z_T と z_R は当然一致するはずであり、仰角 $\hat{\phi}_T$ を次式、

$$\hat{\phi}_T = \arg \min_{\phi_T} |z_T - z_R| \quad (16)$$

で求める．各 (X, Y, Z) に対する修正球の z 座標は次式、

$$z_{(X,Y,Z)} = R_T \tan \hat{\phi}_T + d_w \{1 - \Psi(\hat{\phi}_T) \sin \hat{\phi}_T\} \quad (17)$$

となる．凸境界面の z 座標は各 (x, y) に対して次式で表現される．

$$z(x, y) = \max_{X,Y} z_{(X,Y,Z)} \quad (18)$$

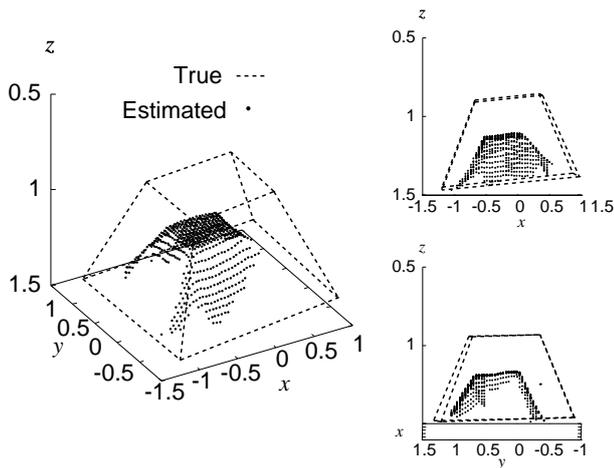


図 15 実データに基づく推定像 (従来 Envelope 法)

Fig. 15 Estimated image with the original Envelope in the experiment for the trapezoidal target.

3.4.3 実データに基づく適用例

図 14 に $X = 0$ における整合フィルタ出力波形を示す。同図における散乱強度の非対称性は、送受信素子指向性の非対称性に起因する。S/N は約 24 dB である。図 15 は従来 Envelope 法による立体境界及び投影図を示す。同図より z 軸方向において、壁伝搬遅延に起因する推定誤差が確認できる。図 16 は修正 Envelope 法による推定境界である。但し SOC 法による距離補正を適用している。同図より推定目標境界はエッジ領域を含めて、正確に目標境界を再現することが確認できる。但し $x \simeq 0.3$ また $y \simeq -0.5\lambda$ の領域においては、推定精度が劣化する部分の確認できる。これは、同領域からの散乱強度が十分得られないための劣化であり、送受信素子の指向性の非対称性に起因する。しかし同原因に基づく誤差は、対称性の優れた素子を用いることで解決されるため、提案手法における本質的な問題ではない。また比誘電率と壁厚さ等のパラメータ推定には、[1] 等の従来アルゴリズムを用いて決定可能である。

4. 結 論

本稿では、壁透過レーダのための高解像度画像化手法を提案した。本手法では、従来の Envelope 法の原理を拡張し、壁面裏目標境界が修正球群の包絡面によって表現することを利用する。同手法により、比誘電率及び壁厚みが既知であれば、目標エッジ領域を含めた高解像度境界決定を実現することを数値計算により示した。更にモルタル板を用いた実験では、同手法をパイスタティックモデルへ拡張し、実環境下においても高解像度立体画像化が可能であることを実証した。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 基盤研究 A(課題番

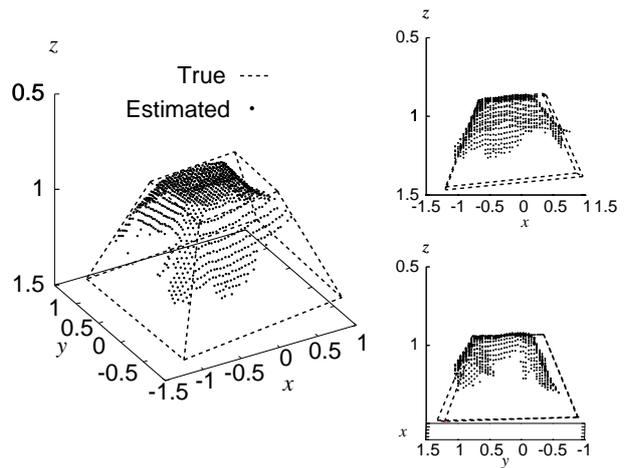


図 16 実データに基づく推定像 (修正 Envelope 法+SOC 法)

Fig. 16 Estimated image with the modified Envelope+SOC in the experiment for the trapezoidal target.

号 17206044) 及び特別研究員奨励費 (課題番号 19-497) による。

文 献

- [1] G. Wang and M. G. Amin, "Imaging Through Unknown Walls Using Different Standoff Distances," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, no. 10, pp. 4015–4025, Oct., 2006.
- [2] F. Ahmad, Y. Zhang and M. G. Amin, "Three-Dimensional Wideband Beamforming for Imaging Through a Single Wall," *IEEE Letters, Geosci. Remote Sens.*, vol. 5, no. 2, pp. 176–179, Apr., 2008.
- [3] V. Chatelee, A. Dubois, M. Yedlin, I. Aliferis, J. Y. Dauvignac, and C. Pichot, "Time Reversal of Experimental Ultra Wideband Microwave Data in a Through-the-Wall (TTW) Configuration," *Proc. of Electromagnetic Theory Symposium (EMTS) 2007.*, Jul, 2007.
- [4] J. Sachs, R. Herrmann, M. Kmec, M. Helbi, K. Schilling, "Recent Advances and Applications of M-Sequence based Ultra-Wideband Sensors," *Proc. of International Conference of UWB (ICUWB) 2007.*, Sep., 2007.
- [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. Hantscher, A. Reizezahn and C. G. Diskus, "Through-Wall Imaging with a 3-D UWB SAR Algorithm," *IEEE Signal Processing Letters.*, vol. 15, pp.269–272, 2008.
- [8] 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.
- [9] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "High-Resolution and Real-time UWB Radar Imaging Algorithm with Direct Waveform Compensations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 10, Oct, 2008 (in press).