

UWB パルスレーダシステムのための 境界散乱変換を用いた目標形状推定法

阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学情報学研究科通信情報システム専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

あらまし 地上を移動するロボット等の状況測定手段の候補として UWB パルスレーダの利用が有望である。無指向性アンテナを走査して得られる信号から目標形状を推定する問題は幅広い応用範囲を有する一方、不良設定逆問題の一つとして知られている。我々は直接散乱波の遅延時間と目標形状の間に可逆な変換である境界散乱変換が存在することを明らかにし、既に境界散乱変換に基づいた目標形状推定手法を提案している。本研究では提案する目標形状推定手法の適用可能範囲を明らかにし、その特性を明らかにする。

キーワード 境界散乱変換, UWB パルスレーダ, 形状推定, 不良設定逆問題

A Target Shape Estimation Algorithm Based on Boundary Scattering Transform for UWB Pulse Radar Systems

Takuya SAKAMOTO[†] and Toru SATO[†]

[†] Department of Communications and Computer Engineering,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

Abstract Environment measurement is an important issue for various applications including household robots. Radars utilizing ultra-wide-band (UWB) pulses are promising candidates in a near future. Estimating target shapes using waveform data, which we obtain by scanning an omni-directional antenna, is known as one of ill-posed inverse problems. We have shown the existence of a reversible transform BST (Boundary Scattering Transform) between a delay time and a target shape. We have already proposed a shape estimation algorithm based on the inverse BST. In this paper, we investigate the range of applicable conditions for the algorithm.

Key words Boundary scattering transform, UWB pulse radar, shape estimation, ill-posed inverse problem

1. はじめに

室内ロボット等への応用が期待される立体状況測定手段のための技術は非常に重要である。また、近距離の無線利用に適する UWB(Ultra Wide Band) の基準が米国で定められ、UWB パルスの利用が注目を集めており、立体状況測定手段の候補として UWB パルスレーダの利用が有望である。

無指向性アンテナをスキャンしながらパルスの送受信を行うことで得られるデータから実際のターゲット形状を推定する問題は不良設定 (ill-posed) 逆問題の一つとして知られている。この逆問題に対するアルゴリズムとして有効なものひとつに、モデルフィッティング法がある。モデルフィッティング法では、物体の幾何学的な形状をパラメータを用いて表現し、仮定したモデルからの散乱波と実際の受信信号が近づく方向へモデルを逐次改善する。モデルフィッティング等のパラメトリックな手法は形状推定に有効ではあるものの計算時間や安定性等の問題

を有することが既に明らかになっている [1]。それらの問題を解決するためのノンパラメトリックな手法も提案されている [2]。しかしながら従来法による形状推定の特性は十分ではない。

我々は直接散乱波の遅延時間と目標形状の間に可逆な変換である境界散乱変換が存在することを明らかにし、境界散乱変換に基づいた目標形状推定手法を提案してきた [3], [4]。この手法を SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法と呼ぶ。SEABED 法では受信された波形画像から抽出された直接散乱波の遅延時間変化から目標形状への可逆な変換 (境界散乱変換) が存在することを利用する。従来、音響探査などの分野で広く用いられてきた手法にマイグレーション処理がある。マイグレーション処理は一般の目標や媒質に適用可能である利点を有する一方で再構成像の分解能が波長オーダーに制限される。一方、SEABED 法は明確な境界を有する目標、均質媒質及び直接散乱波の存在が必要となるが、変換関係を用いて受信波形が

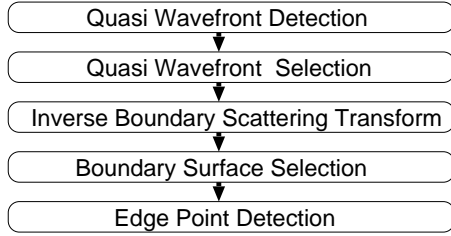


図1 SEABED法の概略図

ら目標境界面形状を一意的に推定可能であるという利点を有する。

但し、境界散乱変換を単純に実際のデータへ適用すると虚像を生じるなどの問題が生じる。SEABED法は多重散乱により生じる虚像の除去法やエッジ点抽出法などの信号処理法を併用し、それらの問題を解決するものである。我々はSEABED法が均質媒質内で高精度な目標形状推定を実現することを明らかにした。しかしながら、不均質媒質内の目標に対するSEABED法の特性は不明である。本稿ではSEABED法を不均質媒質内の目標からの散乱波に適用した場合の特性を調べ、その適用可能範囲を明らかにする。

2. システムモデルとアルゴリズム

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平面内に存在すると仮定する。目標及びアンテナが存在する空間をr-空間、r-空間で集合を表現するとき、その表現をr-領域での表現と呼ぶ。r-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r-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d-空間と呼び、d-空間で集合を表現するとき、その表現をd-領域での表現と呼ぶ。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。SEABED法は $s(X, Y)$ を用いて目標形状を推定する問題を扱う。SEABED法の概略を図1に示す。

3. 境界散乱変換と逆境界散乱変換

3.1 境界散乱変換

本節では抽出した疑似波面から目標形状に変換する手法について説明する。まず、目標形状を表わす曲線と疑似波面の間に可逆な変換関係が存在することを示す。この変換を用いること

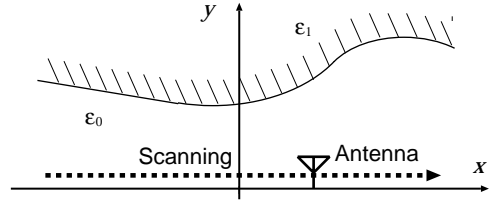


図2 素子の配置と座標および目標形状の例

で疑似波面から目標形状を得ることが可能となる。ここでは2次元問題に関して検討を行なうが容易に3次元問題へも拡張可能である。また、アンテナの走査は直線とするがこれも任意の曲線に沿った走査に対応する変換も同様に導くことが可能である。

本稿では目標の複素誘電率の変化が複数の区分的に微分可能な曲面の集合で表わされる場合を想定する。即ち、目標の複素誘電率 $\varepsilon(x, y)$ が次式の条件を満たすと仮定する。

$$|\nabla \varepsilon(x, y)|^2 = \sum_{q \in H} a_q \delta(y - g_q(x)) \quad (1)$$

ここで $g_q(x)$ は微分可能な1価関数であり、 $q = \{(x, y) | y = g_q(x), x \in J_q\} \in H$ とする。但し、関数 $g_q(x)$ の定義域を J_q とする。また、 a_q は $q \in H$ に依存する正の定数であり、 H は q 全体の集合である。 H の要素を目標境界面と呼ぶ。前節で述べた通り $y > 0$ とする。r-空間の座標の取り方及び複素誘電率の分布の例を図2に示す。式(1)は図のような複素誘電率が有限個の任意の領域に分割される場合を含む一般的な条件である。

d-空間の部分集合 P を次式で定義する。

$$P = \{(X, Y) | \partial s(X, Y) / \partial Y = 0\} \quad (2)$$

連結な閉集合 $p \subset P$ を考える。領域 I_p を $I_p = [\min_{(X, Y) \in p} X, \max_{(X, Y) \in p} X]$ で定義する。任意の $X \in I_p$ に対し $(X, Y) \in p$ を満たす Y が唯一存在するとき p に対し定義域 I_p を有し、 $Y = f_p(X)$ を満たす1価関数 $f_p(X)$ が存在する。 $f_p(X)$ が微分可能かつ $|df_p(X)/dX| \leq 1$ を満たす p の集合を G と定義する。本稿では G の要素を疑似波面(Quasi Wavefront)と呼ぶ。

式(1)が満たされる場合、境界からの直接散乱波は目標境界面の情報を保持している。以下では簡単のため、直接波の伝播経路は全て真空であるとするが、一般の媒質でも伝播速度が一定で既知であれば以下の議論が成り立つ。 p が q からの直接散乱波に対応すると仮定する。アンテナから q の表わす曲線へ下ろした垂線の長さ ρ とアンテナ位置の関係を用いることで p 上の点 (X, Y) は次式で表現される。

$$\begin{cases} X &= x + y dy/dx \\ Y &= y \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{cases} \quad (3)$$

但し、 $y > 0$ 及び $Y > 0$ を仮定する。この変換を境界散乱変換(Boundary Scattering Transform; BST)と呼ぶ。但し、 (x, y) は q 上に存在する点である。境界散乱変換の例を図3に示す。上図がr-領域における複素誘電率の変化であり、下図が対応す

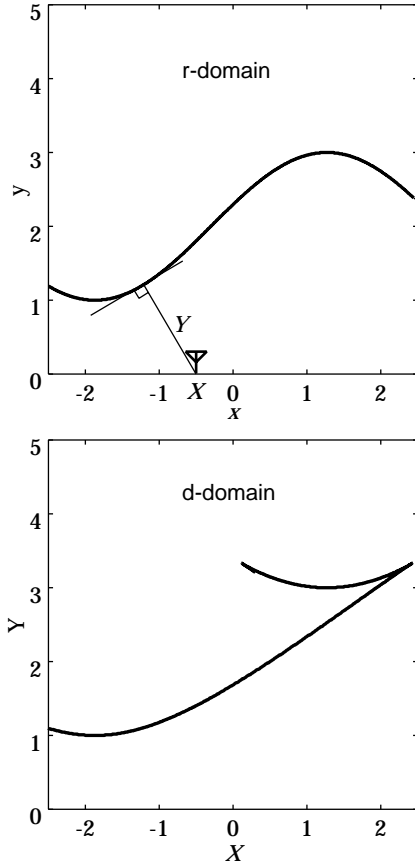


図3 境界散乱変換の例

るd-領域の疑似波面である。図より単一の目標境界面から複数の疑似波面が生成される場合のあることが確認できる。

3.2 逆境界散乱変換

境界散乱変換の逆変換を得ることが可能であれば受信波形からターゲットの形状推定が可能となる。アンテナの位置 X に対し、目標境界面は中心 $(X, 0)$ 、半径 Y の円周上に存在する。 X を変化させた場合に得られる複数の円に対し、その包絡線が目標形状を表わすと考えられる。この処理を以下で定式化する。

与えられた (X, Y) に対応する各円周上の点を (x_c, y_c) とし、次式で円群 $C(x_c, y_c; X, Y)$ を定義する。

$$C(x_c, y_c; X, Y) = \{(x_c, y_c) | y_c > 0, F_C(x_c, y_c; X, Y) = 0\} \quad (4)$$

但し、 $F_C(x_c, y_c; X, Y)$ は次式で表わされる。

$$F_C(x_c, y_c; X, Y) = (x_c - X)^2 + y_c^2 - Y^2 \quad (5)$$

円群 $C(x_c, y_c; X, Y)$ の包絡線 E_C 上の点を (x_e, y_e) とすると次式が成り立つ。

$$E_C(x_e, y_e; X, Y) = \{(x_e, y_e) | y_e > 0, F_C(x_e, y_e; X, Y) = 0, \partial F_C(x_e, y_e; X, Y) / \partial X = 0\} \quad (6)$$

E_C を表わす方程式は次式で表わされる。

$$\begin{cases} x_e = X - Y dY/dX \\ y_e = Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式(3)を式(7)に代入し、次式を得る。

$$y_e^2 - y^2 + (x_e - x)^2 - 2(x_e - x)y dy/dx = 0 \quad (8)$$

式(8)は任意の関数 $g_q(x)$ 及び任意の x に対し成り立つことから $x = x_e, y = y_e$ となる。即ち境界散乱変換の逆変換は次式で与えられる。

$$\begin{cases} x = X - Y dY/dX \\ y = Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{cases} \quad (9)$$

この変換を逆境界散乱変換 (Inverse BST; IBST) と呼ぶ。逆境界散乱変換が存在するための条件は疑似波面が区分的に微分可能であること及び $|dY/dX| \leq 1$ が成り立つことである。この不等式条件が必要な理由は条件が成り立たない場合、逆境界散乱変換の結果得られる y の値が実数とならず、不合理であるためである。一般に単一の目標境界面は境界散乱変換により複数の疑似波面へ移される。しかしながら、全ての疑似波面を見つけることが可能であれば逆境界散乱変換により目標境界面が再構成可能である。このため、複数の疑似波面への分割は実用上問題とならない。

4. SEABED 法の処理手順

4.1 疑似波面抽出と評価値

前節で説明した通り $p \in G$ はターゲットからの直接散乱波に対応する疑似波面を表現する曲線群を表わしている。SEABED 法では最初に疑似波面を抽出する。一般に、抽出された疑似波面の中には雑音により生じたもの、振動的な部分を抽出したもの、及び多重散乱により生じたものが含まれており、これらの不要な疑似波面を取り除く処理が必要である。 $p \in G$ に対し評価値 w_p を次式で定義する。

$$w_p = \left| \int_{X \in I_p} s(X, f_p(X)) dX \right|^2 \quad (10)$$

この評価値は疑似波面上における受信信号の振幅が大きく、しかも $f_p(X)$ の定義域が広い範囲に渡るものについて大きな値をとる。評価値 w_p を用いることにより疑似波面の抽出結果の中から雑音により生じる有意でない疑似波面を除去することが可能となる。次に、雑音に起因する疑似波面が有意な疑似波面の近くにある場合にその評価値が大きくなる問題を解決するために疑似波面分割アルゴリズムを適用する [3], [4]。

4.2 疑似波面と逆境界散乱変換

前節で得られた疑似波面に逆境界散乱変換を適用することにより目標形状の推定が可能となる。但し、各疑似波面の導関数は B-スプラインによる平滑化によって計算する。逆境界散乱変換により大まかな目標形状の推定が実現されるものの、実際の目標境界面以外に虚像が生じることがある。これは凹面境界などの多重散乱に起因するものであり、虚像の除去が必要となる。SEABED 法では疑似波面の評価値をお互いの位置関係によって更新する虚像除去法を用いる [3], [4]。

4.3 均質媒質内の目標に対する SEABED 法適用例

本節では SEABED 法の適用例を示す。図4に本節で適用例

として用いる信号の生成に用いる目標形状を示す。図の境界面内側は完全導体であり、境界面外側は均質媒質であるとしている。また、下方にあるシンボルはデータを取得するアンテナの位置を表わしている。図5に受信波形 $s(X, Y)$ を示す。横軸が時間、縦軸がアンテナの位置を表わす。この波形はFDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いて計算された目標からの応答である。アンテナの位置は 0.0125λ 間隔の39点とし、それぞれの位置から信号を送信した場合の受信波を示している。また、雑音のない理想的な条件を仮定している。図より単一の双曲線状の波形が確認できる。

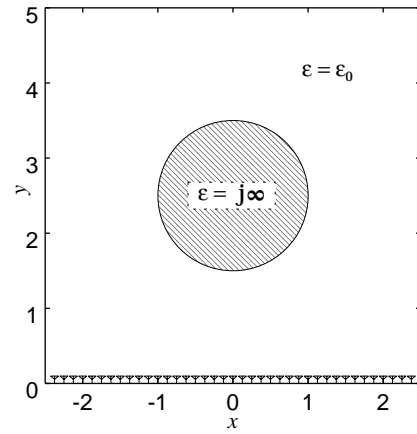


図4 適用例に用いる目標形状

受信信号から抽出される疑似波面 p の全体である $\cup p$ を図6に示す。前節で述べた通り、疑似波面 p は集合 P の内、逆境界散乱変換が存在するための導関数の大きさに関する条件 $|dY/dX| \leq 1$ を満たす集合である。同図より受信信号の遅延変化のおおまかな変化が抽出されていることが確認される。一方で不要な応答や複数のパスが生じている部分も存在する。こうして得られる疑似波面内、最大の評価値から -5dB 以上の疑似波面のみを逆境界散乱変換を適用する。逆境界散乱変換を適用して得られる推定目標形状を図7に示す。同図の実線は真の目標形状を、破線は推定形状を示す。図より、目標のアンテナ側の境界面が高い精度で推定されていることが確認できる。推定されていない境界面の部分が存在するのは直接散乱波が得られないことが理由である。

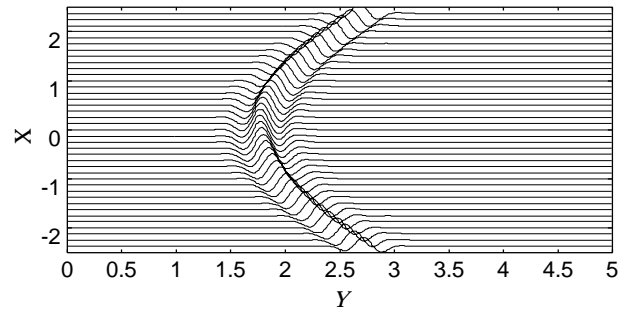


図5 均質媒質内の目標に対する受信信号 $s(x, y)$

5. 不均質媒質内の目標に対する SEABED 法の特 特性

5.1 ランダム媒質内の目標に対する SEABED 法の特 特性

前節では均質媒質内の目標に対する SEABED 法の適用例を示し、高精度な推定が可能であることを示した。本節では不均質媒質内の目標に対し、SEABED 法を適用し、その特性を明らかにする。最初にランダム媒質の場合を、次節で層状媒質の場合を調べる。目標形状は均質媒質の場合と同様に円形の完全導体を用いる。図8に示すとおり、ランダムな比誘電率のゆらぎを持つ媒質を仮定する。図に示す誘電率分布は正規ランダム画像を送信信号の半波長に対応する波数でのカットオフを有するフィルタに通して得たものである。比誘電率は1を平均として約0.5の標準偏差で分布しており、平均の比誘電率が1であることは既知であると仮定する。図の中央で比誘電率が1となっている部分は導体目標の分布する領域に対応する。ランダム媒質内の目標から得られる受信信号を図9に示す。均質媒質の場合と比較して多くの不要応答が得られる。特に、目標手前側の誘電率ゆらぎからの散乱波は目標からの散乱波よりも大きな電力を有する部分も確認できる。また、 $1 \leq X \leq 2$ において目標からの散乱波が得られていないのは目標近傍に大きな誘電率変化を持つ媒質が存在していることによる。図9から抽出される疑似波面を図10に示す。不要な疑似波面が多く抽出されることが確認される。しかしながら、不要な疑似波面の多くは滑らかに連続しておらず、それらの評価値が小さくなることで目標との区別が可能である。均質媒質の場合と同様に最大の評価値から -5dB 以上の疑似波面のみを逆境界散乱変換を適用す

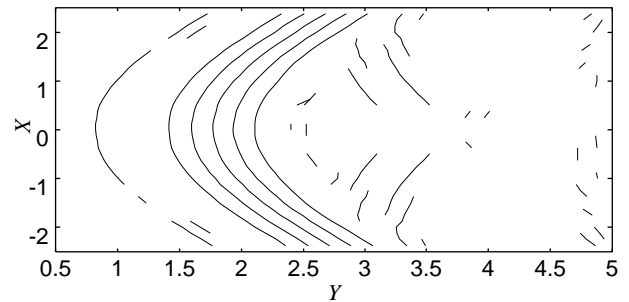


図6 受信信号 $s(x, y)$ からの疑似波面の抽出

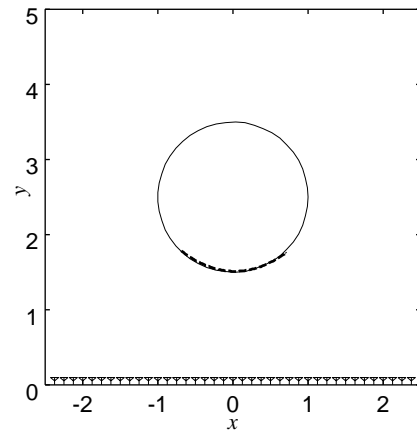


図7 抽出疑似波面の逆境界散乱変換

る。逆境界散乱変換を適用する際、平均比誘電率が1であることを用いる。逆境界散乱変換により得られる推定目標形状を図11に示す。図の実線は真の目標形状を、破線は推定形状を示す。図より、均質媒質と比較すると推定精度が劣化するもの的大まかな形状が推定されていることが分かる。また、不要応答は評価値が小さくなることにより全て除去されている。逆境界散乱変換を適用する評価値の閾値を -10dB にする場合、図に示す推定形状以外に媒質の影響による虚像が生じることが確認される。このことから閾値の決定が重要であることがわかる。しかしながら、ランダム媒質に対しても概ね安定な目標形状推定が可能であることが確認できる。

5.2 層状媒質内の目標に対する SEABED 法の特長

次に層状媒質内の目標に対する SEABED 法の適用例を示す。前節と同様の完全導体目標を図12に示す通り層状の比誘電率分布を有する媒質内に分布させる場合を想定する。図に示す誘電率分布は y 軸方向にのみ変化する正規ランダム系列を送信信号の半波長に対応する波数でのカットオフを有するフィルタに通すことで得られる。与える比誘電率は平均が1であり、前節と同様に逆境界散乱変換を適用する際にはこれを既知と仮定する。層状媒質内の目標から得られる受信信号を図13に示す。アンテナの近くの層から大きな振幅の散乱波が生じている。一方目標からの散乱波はランダム媒質内の場合と比較して形状が保たれていることがわかる。同図から抽出される疑似波面を図14に示す。目標が抽出されているのが確認できる一方、層状部分の散乱波に対応する部分も抽出されている。抽出された疑似波面の内、最大の評価値から -5dB 以上のものに逆境界散乱変換を適用して得られる推定目標形状を図15に示す。図の実線は真の目標形状、破線は推定形状を示す。層状媒質内の目標に対しても目標形状が問題なく推定されていることがわかる。ただし、目標とアンテナの間の層状媒質の影響で全体的にアンテナ側へのオフセットが生じていることがわかる。また、媒質に与える正規ランダム系列によっては稀に層状媒質の位置のみが推定され、推定目標形状が虚像として除去される場合が確認された。このことから、不均質媒質内の目標に SEABED 法を適用する場合には虚像除去アルゴリズムを慎重に用いる必要があることがわかる。しかしながら、層状媒質に対しても SEABED 法により概ね安定な目標形状推定が可能であることがわかる。

6. ま と め

本研究では UWB パルスレーダのための目標形状推定法を提案した。モノスタティックレーダを走査することで目標形状を推定する問題は不良設定逆問題の1つとして知られている。我々は直接散乱波の遅延時間と目標形状との間に可逆な変換関係である境界散乱変換が存在することを明らかにし、境界散乱変換を用いた目標形状推定法 SEABED 法を既に提案してきた。SEABED 法は高精度な目標形状推定が可能であることが明らかとなっている。しかしながら SEABED 法は均質媒質を前提としており、不均質媒質内の目標形状推定に関してはその特性が不明であった。本稿ではランダム媒質及び層状媒質内の目標に対し SEABED 法を適用し、その特性を調べた。

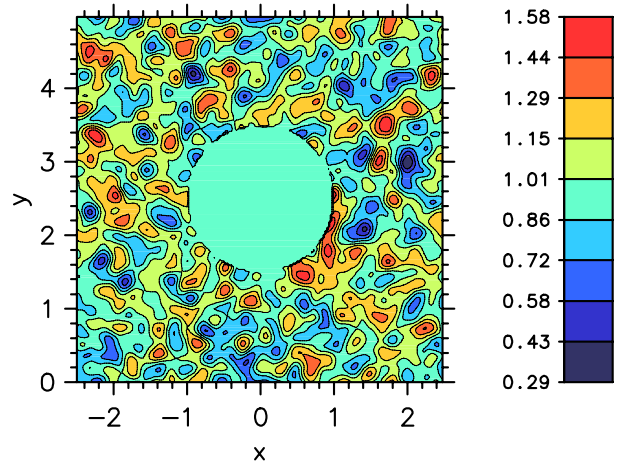


図8 ランダム媒質の比誘電率分布

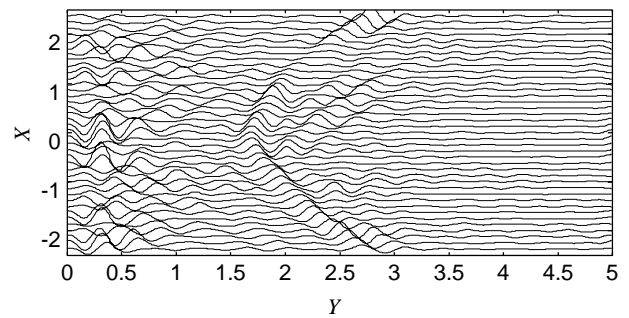


図9 ランダム媒質内の目標に対する受信信号 $s(x, y)$

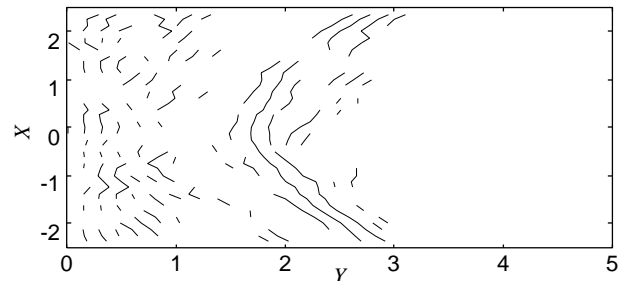


図10 受信信号 $s(x, y)$ からの疑似波面の抽出

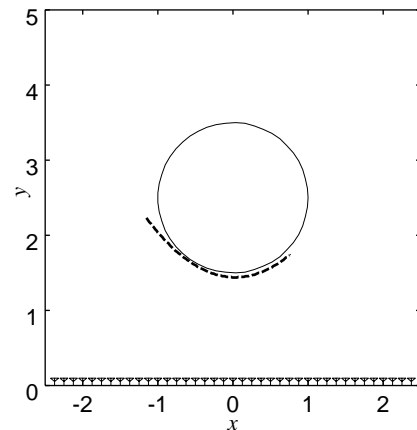


図11 抽出疑似波面の逆境界散乱変換

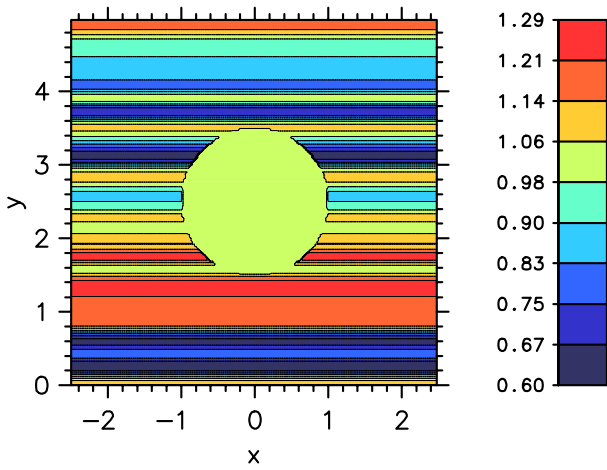


図 12 層状媒質の比誘電率分布

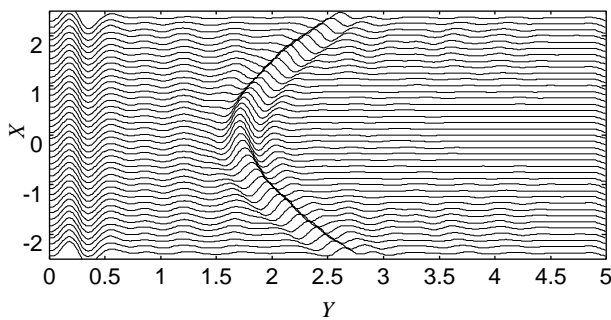


図 13 層状媒質内の目標に対する受信信号 $s(x, y)$

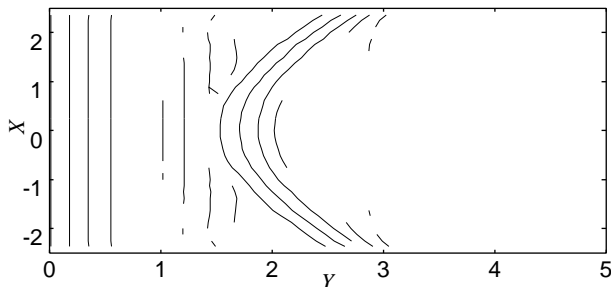


図 14 受信信号 $s(x, y)$ からの疑似波面の抽出

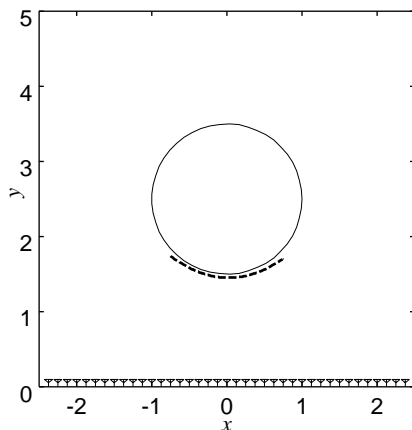


図 15 抽出疑似波面の逆境界散乱変換

本稿ではまず、SEABED 法の概要を説明した。SEABED 法では、最初に受信信号のうち目標境界面やエッジからの直接波を複数の疑似波面に分解する。次に、疑似波面と目標形状の一部は可逆な変換関係にあることを利用し、逆変換を用いて目標形状を推定する。また、多重散乱波などの直接波以外の波形により生じる虚像を除去するための評価値を用いる。

ランダム媒質の場合には多くの不要応答が存在するが、目標境界面の疑似波面が滑らかに繋がっていることを利用して目標のみを抽出することが可能となる。この際、逆境界散乱変換を適用する評価値の閾値が重要であることも確認した。層状媒質の場合、目標の疑似波面が乱れることはないものの層状媒質の影響で推定形状の精度が劣化する。しかしながら、ランダム媒質及び層状媒質のいずれに対しても SEABED 法による目標形状推定は概ね良い結果が得られることを確認した。

謝 辞

本研究の一部は 21 世紀 COE プログラムによる (Grant No. 14213201)。

文 献

- [1] 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.
- [2] 堀田誠司, 佐藤亨, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2000-183, SANE2000-164(2001-01).
- [3] 阪本卓也, 佐藤亨, UWB パルスレーダシステムのためのノンパラメトリックな目標形状推定法, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2003-36.
- [4] T. Sakamoto and T. Sato, A target shape estimation algorithm for UWB pulse radar systems based on boundary scattering transform, *IEICE Trans. Commun.*, submitted.