

パルスレーダを用いた高分解能形状推定のための位相補正法

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 救助用ロボット等の状況測定手段の候補として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。この問題を解くため、我々は既に境界散乱変換に基づく形状推定法として SEABED 法を提案してきた。SEABED 法は変換の可逆性により一意かつ高速な形状推定が可能である利点を有する一方で、凹面目標からの散乱波の位相跳びにより推定精度に本質的な限界を生じるという問題がある。本稿では SEABED 法のための位相補正法を提案し、その適用例を示す。

キーワード 境界散乱変換, パルスレーダ, 形状推定, 位相補正

An phase compensation algorithm for high-resolution shape estimation algorithms with pulse radars

Takuya SAKAMOTO[†] and Toru SATO[†]

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

Abstract Radar imaging techniques are important and applicable to many fields including rescue robots. Estimating target shapes using the data obtained by scanning an omni-directional antenna, is known as one of ill-posed inverse problems. We have already proposed an efficient algorithm of shape estimation based on a reversible transform BST (Boundary Scattering Transform) between a delay time and a target shape. We named the algorithm SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves). The algorithm has a remarkable performance in estimating target shapes. However, phase rotations of scattered waves caused by concave surfaces cause a great deal of degradation in estimating accuracies. We propose a phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems in the present paper. The theory is presented first and numerical simulation results follow.

Key words Boundary scattering transform, UWB pulse radar, shape estimation, phase compensation

1. はじめに

救助用ロボット等に必要とされる状況測定手段としてパルスレーダは有望である。パルスレーダはカメラ等の光学的手法と異なり災害現場での濃い煙の中でも使用可能であるという利点を有する。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な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。この問題を解決するために様々な高精度な形状推定手法が提案されている [1] ~ [7]。パルスレーダではパルスの電力のみでなく、位相の情報を利用することにより、より高い精度での形状推定が可能となる。しかしながら、散乱波形の位相は目標の形状に依存するという問題がある。特に、凹面での散乱

はアンテナ位置に応じて $\pi/2$ から π の位相回転を生じることが知られている。現在、この現象はレーダ画像化の分野で大きな問題として取り上げられていない。これは、現在のシステムの形状推定精度が十分でなく、波長に比べて小さな推定誤差が無視しうるためである。しかしながら、今後のレーダの高精度化において、この問題はボトルネックとなり精度の限界を定めることが予想される。本稿では高精度パルスレーダによる形状推定において凹面での散乱波の位相回転を補償するアルゴリズムを提案し、適用例を示す。

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

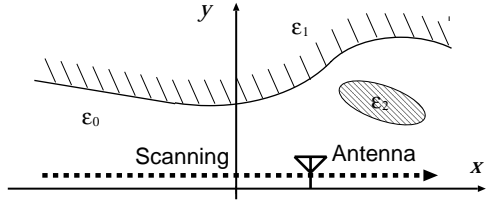


図1 システムモデル

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。図1にシステムモデルを示す。

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。 d -空間から r -空間への変換は形状推定に他ならない。

3. 凹面での散乱による位相回転

本節では凹面での散乱により信号の位相が回転する現象を説明する。本稿では2次元問題を扱うため、位相回転は $\pi/2$ のみとなる。散乱波はコースティックを通過すると位相が変化する。コースティックとは物理的に発散する領域のことである。

この位相回転の現象を説明するため、幾何光学を用いる。Lunenburg-Kline 展開を用いると、電界は次式のように表現できる [8], [9]。

$$E(\mathbf{r}) \simeq e^{-jk\Phi(\mathbf{r})} \sum_{m=0}^{\infty} (-jk)^{-m} E_m(\mathbf{r}) \quad (1)$$

ここで k は波数、 $E(\mathbf{r})$ は位置ベクトル \mathbf{r} の位置での電界である。 $\Phi(\mathbf{r})$ はアイコナルと呼ばれる量である。アイコナル一定の面は等位相面となり、アイコナルの勾配は伝播方向と直交する。

図2に示す通り、目標境界面の一部に着目するとアイコナルの勾配は目標境界面と直交する。これは、目標境界面に沿って等位相の電磁波がアンテナ方向に再放射されるためである。同図で、 E_0 は式(1)における0次の反射波である。2次元での TE モードを仮定しているため、電界はスカラー量で表現されている。幾何光学 (Geometric Optics; 以下 GO と略す。) 理論

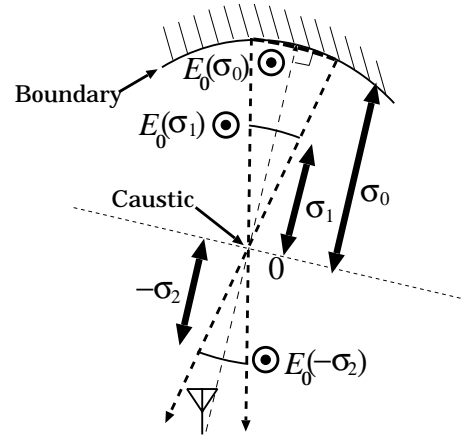


図2 凹面と位相回転

によると図2の $E_0(\sigma_1)$ は $E_0(\sigma_0)$ を用いて次式の通り表わされる。

$$E_0(\sigma_1) = \sqrt{\sigma_0/\sigma_1} E_0(\sigma_0). \quad (2)$$

同様に、 $E_0(-\sigma_2)$ は次式で表わされる。

$$E_0(-\sigma_2) = \sqrt{-\sigma_0/\sigma_2} E_0(\sigma_0). \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_0, \sigma_2 > 0$ であるため、式(3)の平方根の中身が負となっていることがわかる。これは、虚数と解釈することが可能であり、 $E_0(\sigma_2)$ の位相が $E_0(\sigma_0)$ の位相に対して $\pi/2$ 進んでいると考えられる。即ち、コースティックの通過前と通過後で位相が変化していることを意味する。この位相回転が生じる条件に着目し、位相補正を行なう必要がある。

3.1 位相回転の例

本節では前節で説明した位相回転の現象の例を示す。図3にアンテナ位置と受信波形の例を示す。波形は FDTD 法により作成したものである。アンテナはいずれも無指向性の送受信アンテナであり、モノスタティックシステムでの受信信号に整合フィルタを書けたものである。目標は完全導体であり、円形の下端に凹面状の窪みがある。アンテナ "a" は凹面状の窪みの内部にあり、アンテナ "b" は外部にある。位相回転が生じていない場合、整合フィルタ適用後の波形は送信波の自己相関関数となるはずである。波形 "a" はコースティック通過前であるため、中央にピークを有する。一方、波形 "b" のピークは $\lambda/4$ だけ中央からシフトしている。これは $\pi/2$ の位相回転が生じていることを示している。コースティックとアンテナの相対位置が重要であり、位相回転の補正のためには位相回転を生じる条件を求めることが必要である。

4. SEABED アルゴリズム

4.1 SEABED アルゴリズムの概要

SEABED アルゴリズムはコースティックの位置推定が容易であるという利点を有するため、SEABED アルゴリズムのための位相補正法を提案する。ここでは SEABED 法を簡単に説明する。

我々は境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform; 以

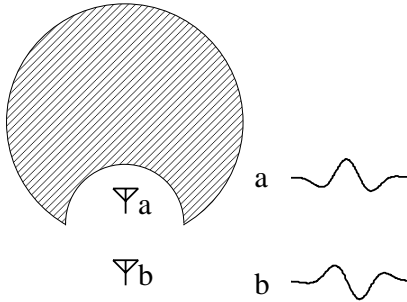


図3 アンテナ位置と受信信号

下BSTと略す。)に基づいたノンパラメトリックな形状推定法を推定してきた[10]。我々はこのアルゴリズムをSEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves)と呼ぶ。SEABEDアルゴリズム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BST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。我々は既に、SEABED法は極めて高速かつ高精度に目標形状を推定可能であることを明らかにしてきた。しかしながら、凹面での散乱波の位相回転により推定精度が大幅に悪化するという問題点がある。この問題を解決するために、我々は目標位置及び散乱波形の同時推定手法を提案した[11],[12]。この手法は目標位置を極めて高い精度で推定可能であるが、点目標にのみ適用可能であり、一般の形状推定に使用できない。そこで、一般の形状推定における位相補正法を開発する必要がある。

4.2 境界散乱変換

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。目標は明瞭な境界を有し、均一な誘電率で満たされた物体であると仮定する。また、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空気中であるとする。

境界散乱変換は次式で表わされる[10]。

$$X = x + ydy/dx \quad (4)$$

$$Y = y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \quad (5)$$

ここで (X, Y) は疑似波面上の点である。 (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。

我々は境界散乱変換の逆変換は次式で表わされることを明らかにした。

$$x = X - YdY/dX, \quad (6)$$

$$y = Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2}, \quad (7)$$

ここで $|dY/dX| \leq 1$ とする。式(6)及び(7)を逆境界散乱変換(Inverse Boundary Scattering Transform; 以下IBSTと略す。)と呼ぶ。

4.3 SEABEDアルゴリズムの適用手順

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

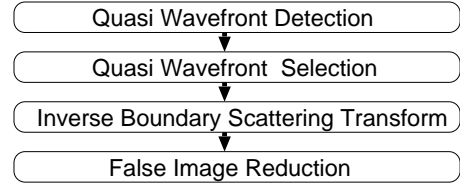


図4 SEABED法の概要

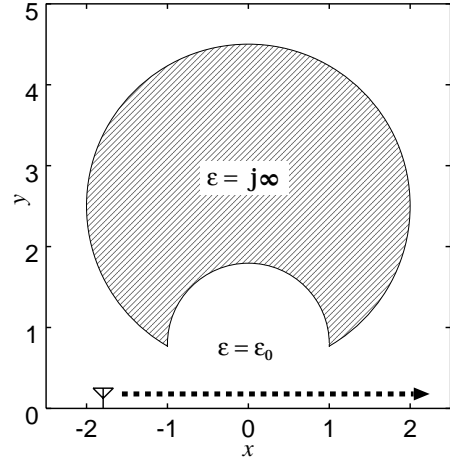


図5 目標形状

条件を満たすように選ぶ。後者の条件は式(7)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4にSEABED法の概要を示す。

4.4 SEABEDの適用例と問題点

本節ではSEABED法の適用例を示す。図5に適用例に用いる目標形状を示す。境界内部は完全導体で、外部は空気で満たされている。この形状は凹面、凸面、エッジ点が結合されたものであり、形状推定問題として難しいものの一つである。この形状推定が実現されれば、実際の環境でのほとんどの物体形状が可能であると考えられる。

適用例に用いる目標からの受信波形を図6に示す。同受信信号はFDTD(Finite Difference Time Domain)法により作成したものであり、簡単のため雑音は考慮していない。0.125λ間隔で39箇所のアンテナ位置で受信した信号をコンターマップで示している。次に、抽出される疑似波面を図7に示す。ここで、経験的な値 $T_r = 1.11$ を設定している。5つの疑似波面が抽出されていることが確認できる。最後に抽出された疑似波面にIBSTを適用し、目標形状を推定する。図8にSEABED法による目標形状推定結果を示す。破線及び実線はそれぞれ真の目標形状及び推定目標形状を示す。凹面部分での推定は他の部分と比較して精度が悪いことが分かる。これは凹面での散乱及びコースティック通過による位相回転が原因で生じたものである。

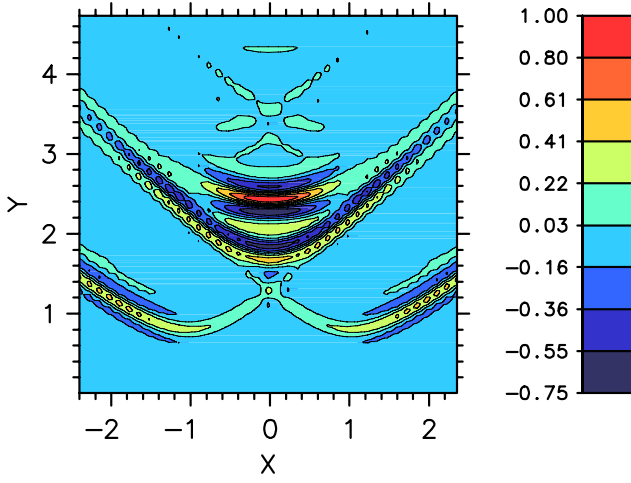


図6 受信信号

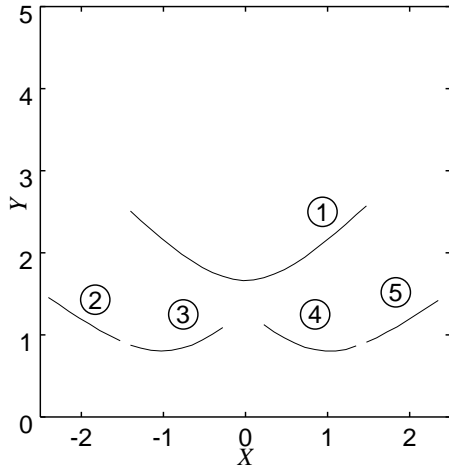


図7 抽出される疑似波面

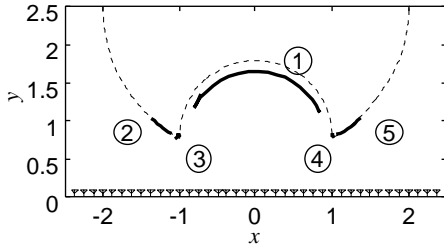


図8 SEABED法による目標形状推定

5. SEABED法のための位相補正法

5.1 境界散乱変換と位相補正

位相回転は目標形状に依存するため、位相回転の条件を疑似波面により表わすことが可能ならば位相補正が可能である。IBSTベクトル \mathbf{v}_{IBST} を次式で定義する。

$$\mathbf{v}_{\text{IBST}} = \begin{bmatrix} -Y dY/dX, \\ Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(6)及び(7)は次式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{v}_{\text{IBST}} \quad (9)$$

目標境界面のコースティック曲線は次式で表わされる。

表1 ϕ とアンテナ及びコースティックの相対位置

ϕ	shape
$-\pi/2$	plane
\vdots	inside of concave
0	on caustic of concave
\vdots	outside of concave
$\pi/4$	point target
\vdots	convex
$\pi/2$	plane

$$x_f = x - \frac{dy/dx}{d^2y/dx^2} \left\{ (dy/dx)^2 + 1 \right\}, \quad (10)$$

$$y_f = y + \frac{1}{d^2y/dx^2} \left\{ (dy/dx)^2 + 1 \right\}. \quad (11)$$

式(7)を式(5)に代入し、 dy/dx について解くことで次式を得る。

$$dy/dx = \frac{dY/dX}{\sqrt{1 - (dY/dX)^2}} \quad (12)$$

同様に、 d^2y/dx^2 は次式で表わされる。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\frac{d^2Y}{dX^2}}{\left\{ 1 - \left(\frac{dY}{dX} \right)^2 \right\}^{3/2} \left\{ 1 - \left(\frac{dY}{dX} \right)^2 - Y \frac{d^2Y}{dX^2} \right\}} \quad (13)$$

目標形状の1階及び2階の導関数が疑似波面及びその1階及び2階の導関数で表わされることが分かる。この関係を利用すると式(10)及び(11)の右辺を疑似波面及びその1階及び2階の導関数で次式の通り表現できることになる。

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ 0 \end{bmatrix} = \tan \phi \mathbf{v}_{\text{IBST}} \quad (14)$$

ここで曲率判定指数 ϕ を次式で定義する。

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{1 - (dY/dX)^2}{Y d^2Y/dX^2} \right\}. \quad (15)$$

コースティックはアンテナと目標境界上の点を結んだ直線上にあることがわかる。 ϕ はアンテナとコースティックの相対的な位置関係を表わすパラメータである。前に説明した通り、 $\pi/2$ の位相回転が生じる条件はアンテナがコースティックより外側に位置していることである。この条件は次の通り、疑似波面を用いて表現できる。

$$0 < \phi < \pi/4. \quad (16)$$

ϕ と目標形状の関係を表1に示す。図9に角度 ϕ と目標形状の関係を示す。図10では ϕ の物理的意味を \mathbf{v}_{IBST} 及び \mathbf{v}_c で説明している。ここで、 $\mathbf{v}_c = [x_f, y_f]^T - [X, 0]^T$ と定義している。

位相を補正するために、IBSTを次式の通り訂正する[13]。

$$x = X - \{Y + f(\phi)\} dY/dX, \quad (17)$$

$$y = \{Y + f(\phi)\} \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \quad (18)$$

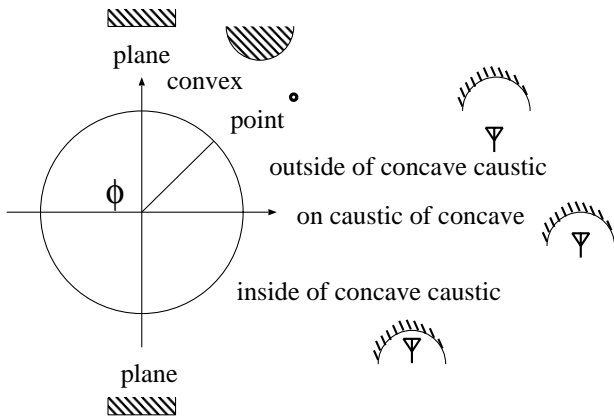


図9 ϕ と目標形状

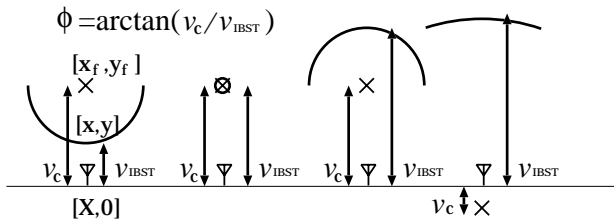


図10 アンテナとコースティックの位置と ϕ

ここで $f(\phi)$ は次式で定義する。

$$f(\phi) = \begin{cases} 1/8 & (0 < \phi < \pi/4) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (19)$$

ここで $\lambda/8$ の位相回転は往復での誤差 $\lambda/4$ をレンジ推定誤差に換算したものである。本節で示した通り、疑似波面から計算可能な量 ϕ により、アンテナとコースティックの位置関係が分かるのは興味深い。

6. 位相補正法の適用例

本節では前節で提案した位相補正法の適用例を示す。簡単のため、本節では雑音を考慮していない。図11に各々の疑似波面に対して計算した ϕ の値を示す。ここで ϕ の値は横軸にアンテナ位置 X をとって示している。疑似波面”2”及び”5”に対応する ϕ は正しい領域に存在することが分かる。一方、エッジ回折波”3”及び”4”に対応する ϕ は $\pi/4$ 付近に存在する。これは両形状が点目標に近いことを示しており、妥当な結果である。疑似波面”1”の ϕ は中央では $\pi/8$ 付近にあるものの両端では凸面の領域にあり、適切な推定ができていない。

こうして求めた ϕ を用いて位相補正法を適用し、目標形状を推定する。図12に位相補正法により推定される目標形状を示す。図8における凹面部の誤差の大部分が改善されている。しかし、”1”の両端は依然として誤差が残っている。更に、エッジ点の推定には新たに誤差が生じていることが確認できる。これは、エッジ点に対応した ϕ の値が部分的に $\pi/4$ よりも小さくなっているためである。

この問題を解決するために別の位相補正法を提案する。最初に、平均された ϕ を各々の疑似波面に対して計算し、その値に基づいて位相補正量を決定する。更に、アルゴリズムを

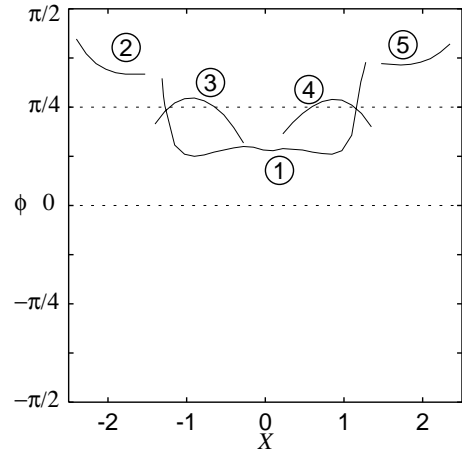


図11 疑似波面に対する ϕ

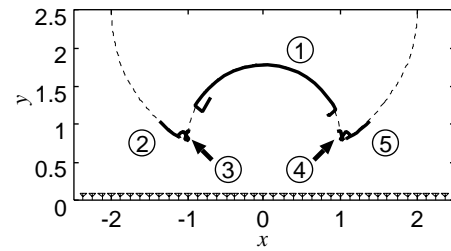


図12 位相補正を用いた形状推定

表2 平均 ϕ と形状判別

Quasi wavefront	ϕ [degree]	Estimated shape
#1	28.1	concave
#2	64.3	convex
#3	42.4	concave
#4	42.7	concave
#5	66.9	convex

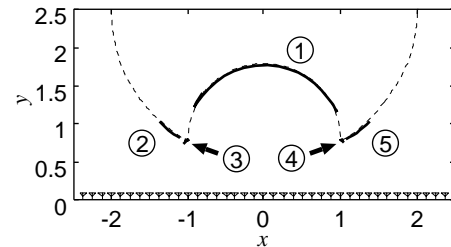


図13 マージンを設定した位相補正による推定形状

安定に動作させるためにマージンを設定する。我々は経験的に $5^\circ < \phi < 40^\circ$ を位相補正の条件とする。各々の疑似波面の平均 ϕ を表2に示す。図13に平均 ϕ による位相補正を用いた場合の推定目標形状を示す。 ϕ を平均することとマージンを設定することでアルゴリズムが安定して動作していることが分かる。提案位相補正法を用いることにより推定精度は分解能を犠牲にすること無く改善していることが確認される。

7. まとめ

高分解能形状推定アルゴリズムは搬送波の位相情報を用いることで精度を向上させることが可能である。しかしながら、散乱波の位相は目標形状に依存するため、一定の条件下で目標形

状の推定精度が劣化する。本稿では SEABED 法のための位相補正アルゴリズムを提案し、その適用例を示した。SEABED 法はパルスレーダのためのノンパラメトリックな高速形状推定法である。SEABED 法は最初に疑似波面の抽出を行なうため、位相補正のための条件判別に便利である。疑似波面から計算される曲率判定指数 ϕ を用いることでアンテナとコースティックの相対位置を知ることが可能である。曲率判定指数 ϕ は疑似波面及びその 1 階及び 2 階の導関数から計算される量である。我々は SEABED 法で使用される逆境界散乱変換を ϕ の値に応じて補正する位相補正法を提案した。単純な方法では ϕ の計算結果が不安定になる場合があることを指摘し、 ϕ の平均値及びマージンを使用した位相補正法について説明した。提案手法による推定形状はエッジ点を含めて極めて高い精度で形状推定を実現していることを明らかにした。

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] D. Nahamoo, S. X. Pan and A. C. Kak, "Synthetic aperture diffraction tomography and its interpolation-free computer implementation," *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, vol. 31, no. 4, pp. 218–229, 1984.
- [2] M. B. Dobrin and C. H. Savit, *Introduction to Geophysical Prospecting*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [3] J. V. Candy and C. Pichot, "Active microwave imaging : A model-based approach," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, no. 3, pp. 285–290, 1991.
- [4] P. Chaturvedi and R. G. Plumb, "Electromagnetic imaging of underground targets using constrained optimization," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp.551–561, 1995.
- [5] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura and T. Shinbo, "Automatic signal processing of front monitor radar for tunnelling machines," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 2, pp. 354–359, 1997.
- [6] 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.
- [7] 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. 12, pp. 1910–1916, 2001.
- [8] G. L. James, *Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves*, IEE Electromagnetic waves series 1, Peter Peregrinus Ltd., UK, 1980.
- [9] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius and J. A. G. Malherbe *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Artech House, Boston, 1990.
- [10] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for UWB pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE Trans. Communications*, vol. E87-B, no. 5, 2004.
- [11] T. Sakamoto and T. Sato, "An estimation method of target location and scattered waveforms for UWB pulse radar systems," *Proc. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toulouse, France, pp. 4013–4015, 2003.
- [12] T. Sakamoto and T. Sato, "An estimation method of target

- location and scattered waveforms for UWB pulse radar systems," *IEICE Trans. Communications*, vol. E87-B, no. 6, 2004.
- [13] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Communications*, (submitted).