

# UWB パルスレーダのための高速画像化手法の 複雑形状物体への適用

関 鷹人<sup>†</sup> 木寺 正平<sup>†</sup> 阪本 卓也<sup>†</sup> 佐藤 亨<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院 情報学研究科

〒 606-8501 京都大学大学院 情報学研究科 通信情報システム専攻 佐藤研究室

E-mail: †seki@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし UWB パルスレーダのための画像化手法である SEABED 法は、従来手法では不可能であった高速処理を実現する技術であり、ロボット等のリアルタイム用途への応用が期待される。これまで SEABED 法の特性検討は比較的単純な形状の目標についてのみに行われてきた。本稿では、人間の顔面などの複雑な形状の目標に対する SEABED 法の特性について検討する。

キーワード 超広帯域パルスレーダ, 形状推定, レーダ画像化, SEABED 法

## Application of fast imaging algorithms with UWB pulse radars to complex-shaped targets

Takato SEKI<sup>†</sup>, Shouhei KIDERA<sup>†</sup>, Takuya SAKAMOTO<sup>†</sup>, and Toru SATO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University  
606-8501 Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan

E-mail: †seki@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** We have developed a fast radar imaging algorithm SEABED for UWB pulse radar systems. The SEABED can estimate target shapes within a short time, which is suitable for realtime applications including robotics. We have investigated the performance of the SEABED only for simple shapes. In this paper, we apply the SEABED to complex-shaped targets, and evaluate its limitation.

**Key words** UWB pulse radar, shape estimation, radar imaging, SEABED

### 1. はじめに

ロボットや車などの近傍の状況を観測する手段として、レーザや CCD カメラなどの光学的手法が実用化されている。これらに対し、レーダでの近傍観測には、データ取得速度、観測機器の小型化、ロバスト性などにおいて利点があると考えられる。特に濃い煙・埃、霧、生い茂る草木などの周辺状況の中でもロバストかつ高精度な測定が可能である。中でも近傍界の超高解像度測定には UWB(Ultra Wide Band) パルスレーダが有望視されている。

可逆な変換である境界散乱変換に基づいた UWB パルスレーダを用いた高速画像化手法である SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves) 法は、従来手法では不可能であった高速処理を実現する技術であり、ロボットや車載等のリアルタイム用途への応用が期待される [1] [2]。本研究では、バンパーや壁面など

を模擬した滑らかな表面形状を持つ目標物体、及び人体や樹木などを模擬した複雑な形状の目標物体に対する SEABED 法の特性について検討する。

### 2. UWB パルスレーダ

UWB パルスレーダは、従来のレーダシステムと異なる特徴を有する。パルスレーダの距離分解能  $\Delta r$  はパルス幅  $\Delta t$  を用いて次式により表される。

$$\Delta r = c\Delta t/2 \quad (1)$$

パルスレーダでは一般に送信中には受信を行えないため、最小観測距離は式 (1) で定まる  $\Delta r$  より小さくすることはできない。しかし超短パルスを用いる UWB レーダでは  $\Delta r$  は数 cm 程度であり、至近距離の測定が可能である。逆に送信電力は制限され、広帯域であるため雑音電力も大きく、S/N 比の制約から遠距離の測定は困難である。このため、UWB パルスレーダ

は広い指向性を持つアンテナを使用し、近距離目標を測定するのに有利である。SEABED 法では、無指向性アンテナを走査しながら信号の送受信を繰り返し、受信信号を用いて目標位置のみでなく、目標形状を推定する。アンテナの走査範囲は前述のアンテナ幅  $D$  とほぼ等価であるため、方位分解能は目標距離とアンテナ走査範囲で決まる。近距離の測定は方位分解能の点でも有利である。例えば、中心周波数 5GHz、比帯域 100% のパルスを用いる UWB パルスレーダでは、 $\Delta r$  は 3cm となり、最小観測距離が短く、高い分解能が得られることがわかる。このように距離分解能及び方位分解能の双方を高めることで、近距離の目標に対してレーダによる形状推定を実現できることが UWB パルスレーダシステムの特徴である。

従来、地下探査レーダで用いる広帯域パルスは法律上の問題で空气中で用いることが不可能であったが、2002 年に米国連邦通信委員会が超広帯域 (UWB) 信号の標準を定めたことにより新たな道が開かれることとなった。比帯域 20% 以上または帯幅域 500MHz 以上と定義される UWB 信号を用いることで地下探査レーダのような高距離分解能測定が空气中へ応用可能となるため、注目を集めている。

### 3. SEABED 法

SEABED 法は、目標形状とパルスの伝播遅延の間に境界散乱変換 (Boundary Scattering Transform) と呼ばれる可逆な変換関係があることを利用するものである [1] [2]。電磁波が伝播する媒質が一定であり、伝播速度が既知で、なおかつ目標物に明瞭な境界があるという拘束条件を用いることで、高速かつ高精度な画像化を実現している。地下探査のように物体の反射係数などが連続的に変化する環境では条件が満たされないため使用できないが、ロボットや車載を考えた場合、一般的にこの条件は満たされていると考えられる。UWB パルスの送受信は単一の無指向性アンテナを用いて行なうモノスタティックシステムを想定する。アンテナは  $x$ - $y$  平面上を走査し、各々の場所でパルスの送受信を行う。アンテナ位置  $(X, Y, 0)$  で時刻  $t = Z/2c$  に受信された信号を  $s(X, Y, Z)$  とする。 $s(X, Y, Z)$  の等位相面を擬似波面と呼ぶ。但し  $c$  は空气中の光速である。目標物体やアンテナ位置など  $(x, y, z)$  で表される空間を実空間 (r-domain),  $(X, Y, Z)$  で表される空間をデータ空間 (d-domain) と呼ぶ。ここで目標物体の境界  $(x, y, z)$  と擬似波面  $(X, Y, Z)$  との間には次式に示す境界散乱変換が成り立つことが知られている [1] [2]。

$$\begin{cases} X = x + z\partial z/\partial x \\ Y = y + z\partial z/\partial y \\ Z = z\sqrt{1 + (\partial z/\partial x)^2 + (\partial z/\partial y)^2} \end{cases} \quad (2)$$

この変換には逆変換である逆境界散乱変換 (Inverse Boundary Scattering Transform) があることがわかっており、次式で表される。

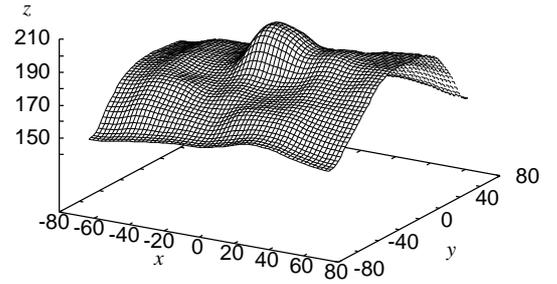


図 1 真の目標形状 (複雑な構造を有する顔面形状)

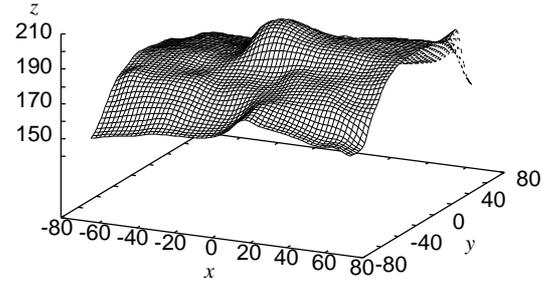


図 2 SEABED 法により推定される形状 (図 1 の形状の擬似波面を既知とする場合)

$$\begin{cases} x = X - Z\partial Z/\partial X \\ y = Y - Z\partial Z/\partial Y \\ z = Z\sqrt{1 - (\partial Z/\partial X)^2 - (\partial Z/\partial Y)^2} \end{cases} \quad (3)$$

SEABED 法は式 (3) の右辺を計算することによりアンテナの受信信号から、反復に基づかず直接的に画像を得ることが可能である。これらの利点により SEABED 法は高速かつ高精度なレーダ画像化を実現することができる。

### 4. 擬似波面が既知な場合における SEABED 法の特性

複雑な形状の一例として図 1 に示す人間の顔面形状を真の目標形状とする [3]。ただしアンテナは  $z = 220$  の面上を走査するものとする。本節に限り、距離の単位は mm としている。このように複雑な形状の物体に SEABED 法を適用する際に問題となるのが、擬似波面の抽出である。これは、あるアンテナ位置を通り、目標境界面に直交する直線が多数あるために、目標境界面上の多くの点からの散乱波同士が干渉し、単純な処理により同位相面を分離して抽出することが困難であるためである。ただし、真の擬似波面が既知であるという仮定の下では、逆境界散乱変換により図 2 に示す通り、目標形状の推定が可能である。ここでは簡単のため、推定形状が一価関数になることを仮定し、推定像に対しガウス関数による平滑化を行っている。このように、擬似波面が既知であれば、SEABED 法により高速・高精度な画像化が可能である。

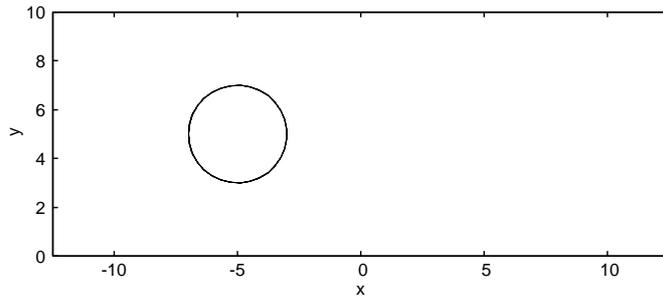


図 3 単純形状目標物体

## 5. 擬似波面が既知でない場合における SEABED 法の特長

擬似波面が既知でない場合の SEABED 法の特長について、単純な形状の物体および複雑な形状の物体に対して検討する。ここでは 2 次元モデルを用いて検討を行う。2 次元問題の場合、アンテナは平面でなく  $x$  軸上を 1 次元走査する。ここで、式 (2) および (3) はそれぞれ

$$\begin{cases} X &= x + ydy/dx \\ Y &= y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x &= X - YdY/dX \\ y &= Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{cases} \quad (5)$$

となる。

### 5.1 単純な目標物体に対する SEABED 法の特長

ここでは擬似波面が既知でない場合の SEABED 法の特長について検討する。図 3 に滑らかな表面を持つ円モデルを示す。これは、電柱やバンパー、壁面などの滑らかな境界面を持つ物体を模擬したモデルである。 $x$  軸上をアンテナが走査し、各々の点でパルスを送受信する。以下では距離は全て送信パルスの中心波長で正規化している。図 4 に各アンテナ位置での受信信号を並べて示す。この図の横軸は時間に対応し、アンテナ座標から目標までの距離に比例するため、横軸を散乱点までの距離  $Y$  としている。縦軸  $X$  はアンテナ座標であり、この図は各々のアンテナ座標で受信された時間波形を縦に並べた図となっている。この受信信号から、目標からのエコーの等位相線を抽出したものが図 5 であり、擬似波面に対応する。この擬似波面に IBST である式 (6) を適用すると図 6 が得られる。SEABED 法はこのようなプロセスで受信信号から物体の形状を推定する。図 3 と図 6 を比較することにより、物体のアンテナ走査軸側が正しく推定されていることがわかる。

### 5.2 複雑な形状物体に対する SEABED 法の特長

ここでは、複雑な形状物体が存在するモデルに対しての SEABED 法の特長を調べる。

#### 5.2.1 複雑形状物体と単純形状物体が離れている場合

図 7 に本節で用いる目標形状を示す。左側の円は前節で扱った単純な形状の目標であり、右側の点群は樹木や人体などの複雑な表面形状を持つ物体を模擬している。これらの点群には、そ

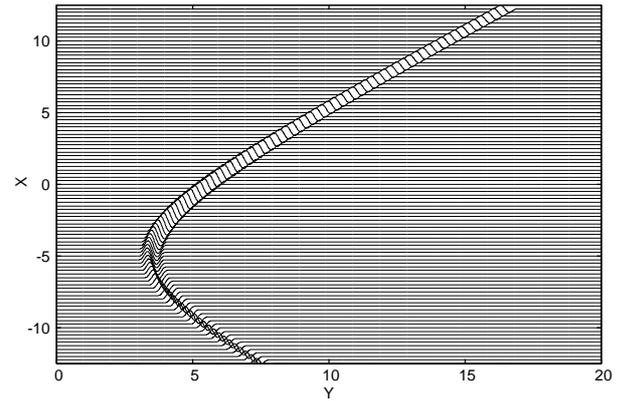


図 4 単純形状物体からの受信信号

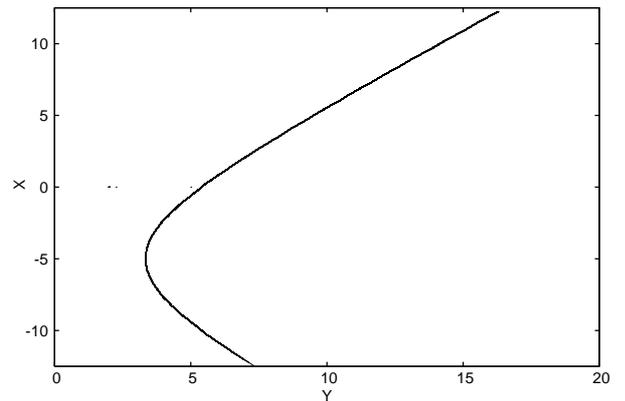


図 5 抽出された擬似波面 (単純形状物体の場合)

れぞれ異なった反射係数が設定されており、図では円の大きさを示されている。

図 8 に図 7 に示すモデルからの受信信号波形を示す。この受信信号から極値を抽出し、最も近い点同士をつなぐという方法で推定された擬似波面を図 9 に示す。複雑な形状の物体では、あるアンテナ位置を通り、目標境界面に直交する直線が多数あるために、目標境界面上の多くの点からの散乱波同士が干渉し、単純な処理により同位相面を分離して抽出することが困難である。この擬似波面は、上記の単純な方法で抽出されたものであるため、干渉を起こした部分の擬似波面を正確に抽出することができていない。図 10 に SEABED 法を用いて推定した結果を示す。この図より、左方の滑らかな円のアンテナ側は正しく推定されていることがわかる。しかし右側の複雑形状物体を模

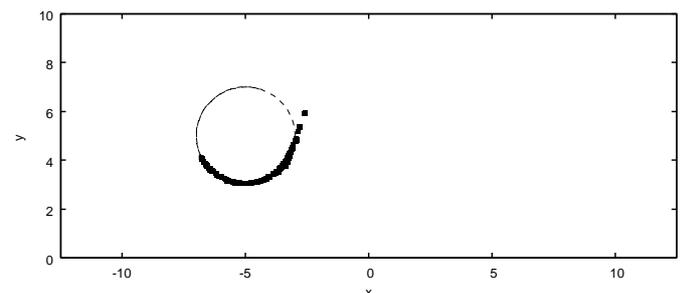


図 6 SEABED 法により推定される形状 (単純形状物体の場合)

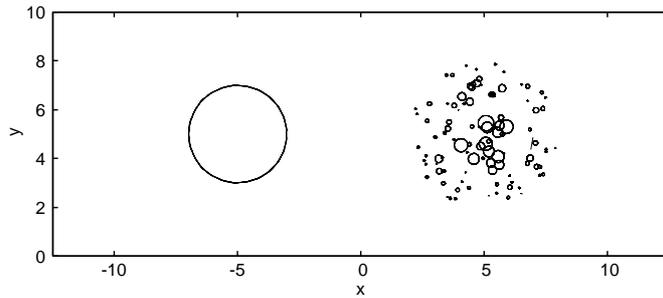


図 7 単純形状物体と複雑形状物体

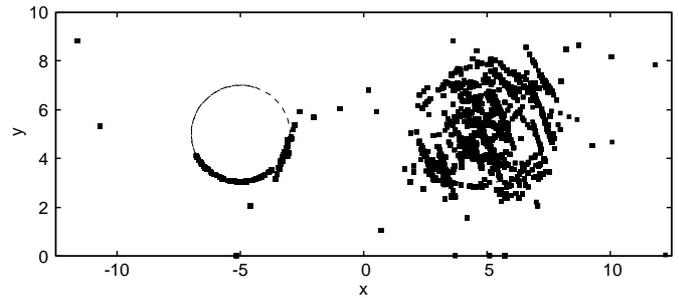


図 10 SEABED 法により推定される形状 (単純形状物体および複雑形状物体の場合)

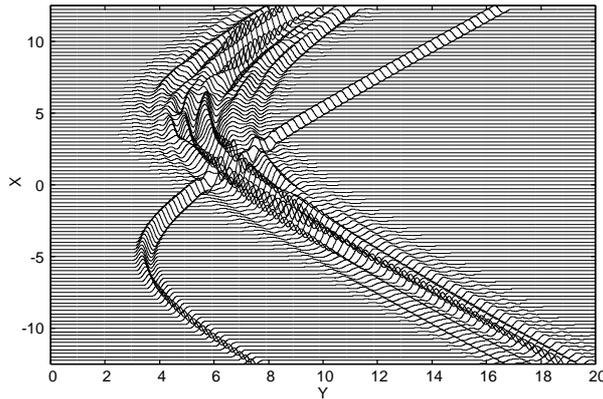


図 8 単純形状物体および複雑形状物体からの受信信号

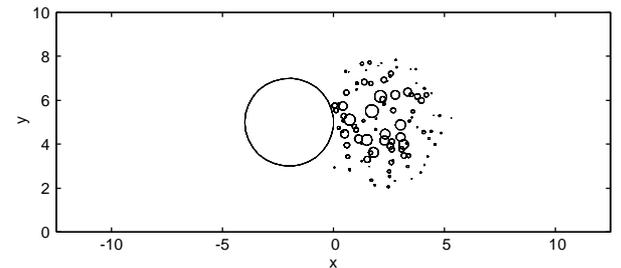


図 11 複雑形状物体と単純形状物体が接近したモデル

擬した点群は推定によっておおよその位置はわかるものの、正しく推定できていないことがわかる。これは、干渉によって擬似波面の抽出が正確に行えないことが原因であり、複雑な形状の物体に SEABED 法を適用する際に問題となる。

### 5.2.2 複雑形状物体と単純形状物体が接近している場合

干渉による影響が更に大きいケースとして、複雑形状物体と単純形状物体が接近している場合について調べる。本節で仮定する目標形状は図 11 に示される。

このモデルからの受信信号を図 12 に、それより推定された擬似波面を図 13 にそれぞれ示す。前述の図 8、図 9 と比べて両物体からの擬似波面が接近しているのがわかる。また、先ほどと同様にこの擬似波面は単純な従来法により抽出されたもので

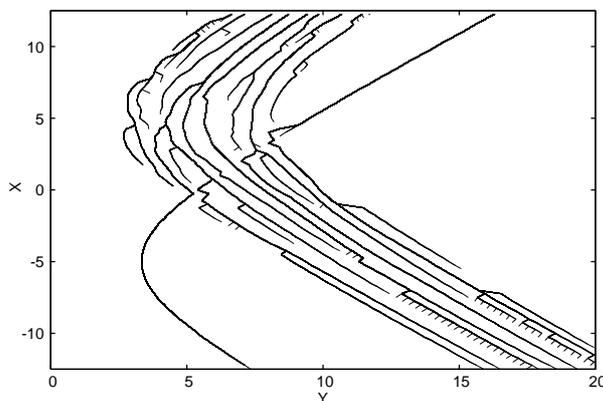


図 9 単純形状物体および複雑形状物体からの受信信号より推定された擬似波面

あり、干渉の影響によって不正確な擬似波面となっている。この擬似波面から推定される像を図 14 に示す。これより、単純形状物体の推定像が劣化していることがわかる。

このように、SEABED 法は擬似波面が正確であれば、高速で高精度な推定が可能であるが、多数の散乱点を持つような複雑な形状の物体である場合は、各散乱点からの散乱波形同士が干渉を起こし、その結果受信信号が真の擬似波面と異なる位置にピークを持ち、擬似波面の正確な抽出が困難となる。

## 6. 複雑形状物体の推定像表示法

前節までの推定像は、擬似波面抽出の際に極大値のみを抽出しそれらをつなげるという単純な方法を用いていたため、受信信号の持つ信号強度といった情報が切り捨てられていた。受信信号からの信号強度情報を用いて、推定像に反映させることによって複雑形状物体の大きさをおおよそ正しく推定できることを示す。

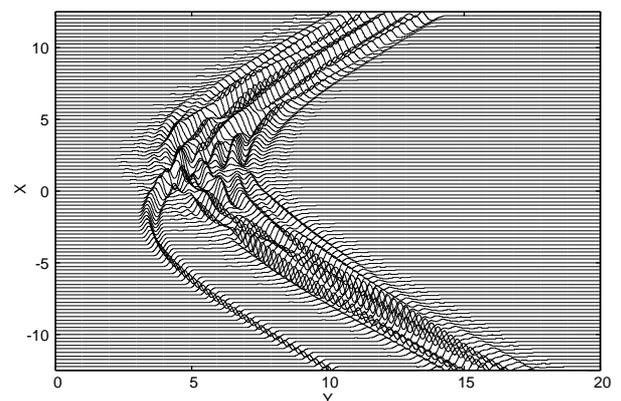


図 12 近接した目標物体からの受信信号

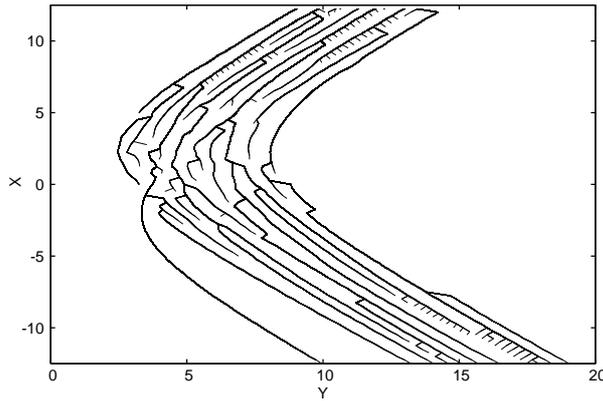


図 13 近接した目標物体からの受信信号から抽出された擬似波面

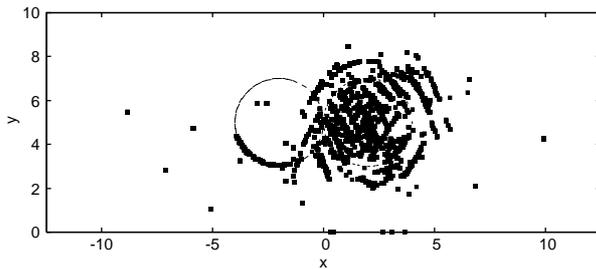


図 14 推定された目標形状 (近接モデルの場合)

図 15 に 5.2.1 節で用いたモデルの推定像に強度情報を反映した図を示す。円の半径が図 8 の振幅の大きさに対応しており、円の半径の変化が大きい場合には干渉を起こしている部分からの推定点である可能性があると考えられる。図 15 を見ると、左方の円のアンテナ面側は点の大きさも揃っており、非干渉点からの推定点であると考えられる。一方、右方の複雑形状物体は、点の大きさが図 7 と対応していない部分があり、干渉を起こしているものと考えられる。

同様に 5.2.2 節で用いたモデルの推定像に強度情報を反映した結果を図 16 に示す。この図より、左方の円のアンテナ面側の推定像は、右半分の点の大きさが不ぞろいになり、干渉を起こしているものと考えられる。このことは点線で示された本来の円からもずれた位置に点があることからわかる。右方の円は図 11 と見比べることで、干渉による推定点があることが確認できる。

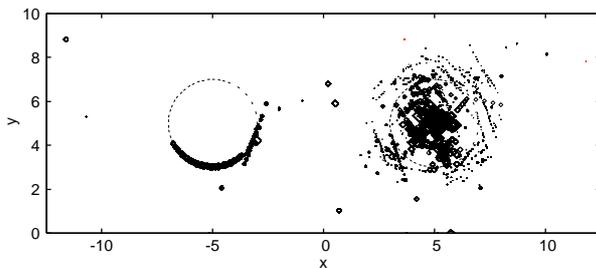


図 15 強度情報を反映した推定像

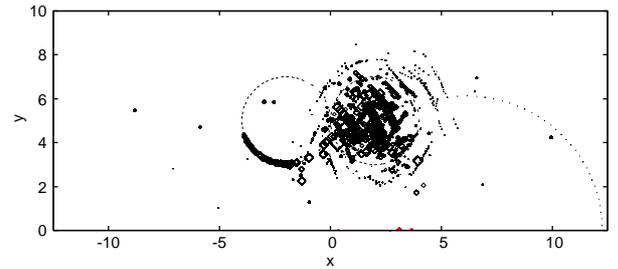


図 16 強度情報を反映した推定像 (近接モデルの場合)

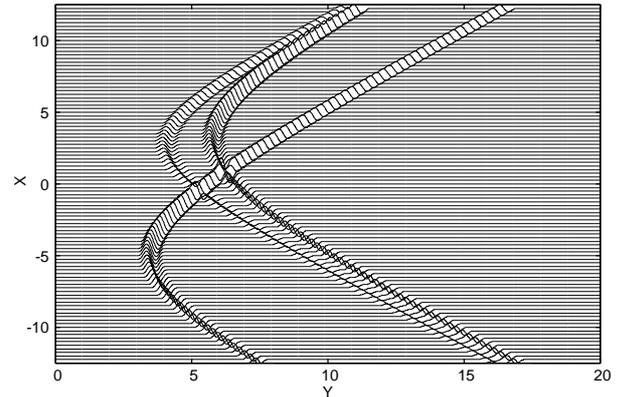


図 17 干渉点検出用受信信号波形

## 7. 干渉検出

これまでに述べてきたように、複雑な形状の物体に対して SEABED 法を適用するためには、正確な擬似波面の抽出が不可欠である。本節では、正確な擬似波面抽出の妨げとなっている、多散乱点からの干渉を起こしている部分を検出する方法について検討する。

干渉点検出として、送信波形と受信信号波形を比べ、干渉していなければ波形そのものは変わらず、振幅のみが変わるという点を利用し送信波形との比較により受信信号の干渉点を検出した。受信信号  $s(X, Y)$  より信号のピーク値のうちで閾値を超えるものの  $X, Y$  の値を抜き出し、 $X_i, Y_i$  とする。各ピーク位置  $X_i, Y_i$  に対し、次式を最小化する  $a_i$  を求める。

$$\text{minimize} |a_i \max_Y \{r(Y)\} - s(X_i, Y_i)|^2 \quad (6)$$

こうして、干渉部分を表す信号  $s_{\text{int}}(X, Y)$  を次式の通り得る。

$$s_{\text{int}}(X, Y) = s(X, Y) - \sum_i a_i r(Y - Y_i) \delta(X - X_i) \quad (7)$$

ここで  $\delta(X)$  はディラックのデルタ関数である。

検出対象として、干渉点が明らかな受信信号を用意し、干渉点の検出が正確かどうかを確認した。図 17 に対象とした受信信号を示す。この図の各アンテナ座標における受信信号時間波形と、送信信号波形との比較によって干渉していると思われる部分を抽出した。結果を図 18 に示す。図 17 で信号どうしが交差し、明らかに干渉を起こしている点が図 18 で検出されていることがわかる。

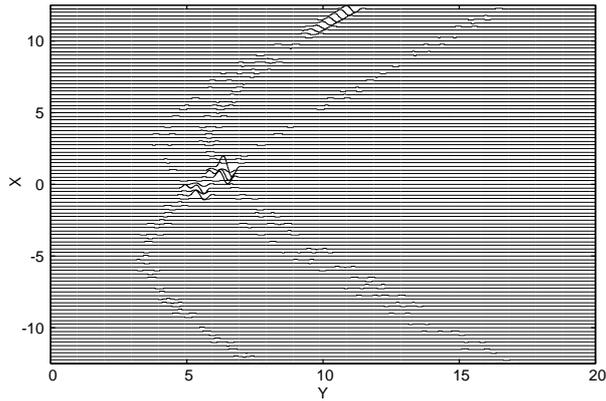


図 18 抽出された干渉点

## 8. まとめと今後の予定

本稿では複雑形状物体に対する SEABED 法の特性を検討した。複雑形状物体については、およその位置が推定可能であり、単純形状物体の形状推定は非干渉アンテナ位置で可能であることがわかった。複雑形状物体からの受信信号は干渉を起こし、その為擬似波面の抽出が困難になることがわかった。受信信号の強度情報を用いて、推定像を改善した。また、送信波形と受信信号波形の比較により受信信号の干渉部分を抽出した。

今後の予定としては、SEABED 法の特性を改善するため、波形重畳を考慮した新たな擬似波面抽出手法の開発が必要である。現在、波形の連続性を考慮した擬似波面抽出アルゴリズムを開発中である。

### 文 献

- [1] 佐藤 亨, 阪本 卓也, “UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-B, No.12, pp.2311-2325, Dec. 2005
- [2] T. Sakamoto and T. Sato, “A Target Shape Estimation Algorithm for Pulse Radar Systems Based on Boundary Scattering Transform,” IEICE Commun., vol. E87-B, no. 5, May, 2004.
- [3] T. Sakamoto and T. Sato, “A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems,” IEEE AP-S Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, vol. 2, June 2004.