

UWB パルスレーダによる高速画像化手法のための カルマンフィルタを用いた多干渉条件下での信号識別

関 鷹人[†] 木寺 正平[†] 阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†] 上原 康生^{††}
山田 直之^{†††}

[†] 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

^{††} トヨタ自動車株式会社

^{†††} 株式会社 豊田中央研究所

E-mail: tseki@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。SEABED 法の問題点として、多数の散乱点からの散乱波が干渉を起こしているような環境では、擬似波面抽出が難しいため適用できないという点が挙げられている。本稿では、カルマンフィルタを用いた新たな擬似波面抽出法を提案し、多干渉環境下における SEABED 法の特性を改善する。

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, カルマンフィルタ

Signal classification for an imaging algorithm for UWB pulse radars in a multiple interference environment with Kalman filter

Takato SEKI[†], Shouhei KIDERA[†], Takuya SAKAMOTO[†], Toru SATO[†], Yasuo UEHARA^{††}, and
Naoyuki YAMADA^{†††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University
606-8501 Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan

^{††} TOYOTA MOTOR CORPORATION

^{†††} TOYOTA CENTRAL R&D LABS, Inc.

E-mail: tseki@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 propose a new algorithm to improve SEABED performance against complex-shaped targets.

Key words UWB pulse radar, shape estimation, radar imaging, SEABED, Kalman filter

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。ここでの近傍とは装置の大きさや使用する周波数に依存する相対的なものであり、例えば装置 3m で波長 10cm の場合は 60cm 程度の範囲が近傍と考えられる。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。しかし、散乱点が多く、信号同士が干渉

を起こすような環境への適用は困難とされてきた [1] [2]. 本稿では、カルマンフィルタおよび干渉部分検出を用いて、SEABED 法を多干渉環境にも適用する方法を提案する。

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 Δr はパルス幅 Δt 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 Δr 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 Δr 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、 Δr 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気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気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

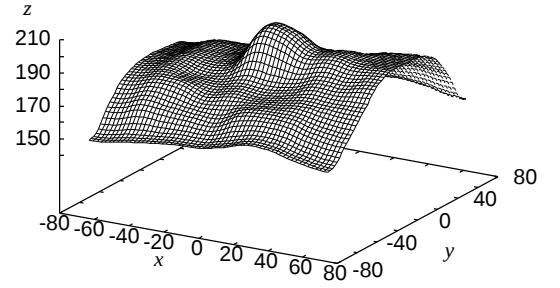


図 1 真の目標形状 (複雑な構造を有する顔面形状)

擬似波面と呼ぶ。但し c は空気中の光速である。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。

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

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 $z = 220\text{mm}$ 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。

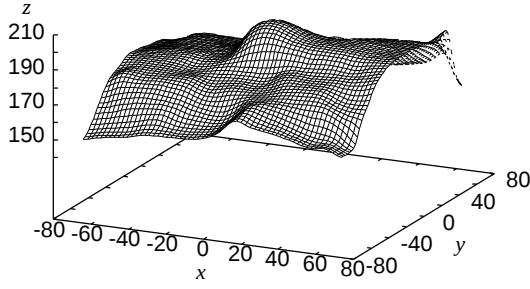


図 2 SEABED 法により推定される形状 (図 1 の形状の擬似波面を既知とする場合)

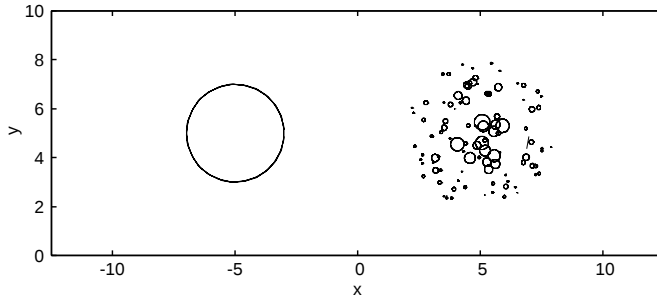


図 3 単純形状物体と複雑形状物体

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 左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すなわち擬似波面を抽出し IBST である式 (6) を適用すると図 5 が得られる。SEABED 法はこの

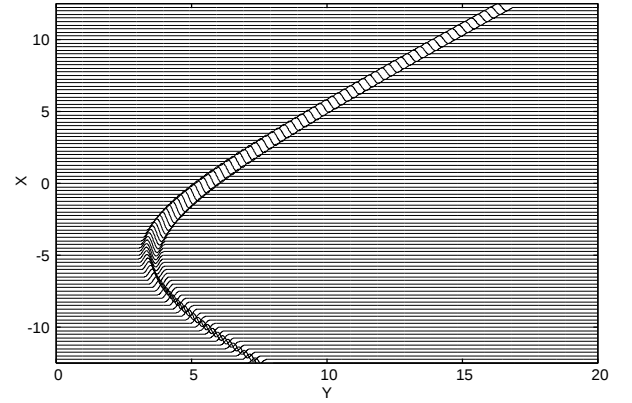


図 4 単純形状物体からの受信信号

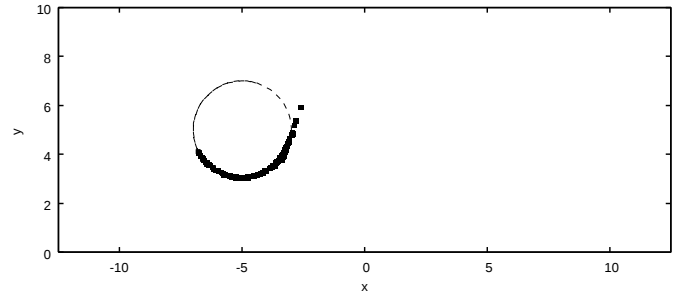


図 5 SEABED 法により推定される形状 (単純形状物体の場合)

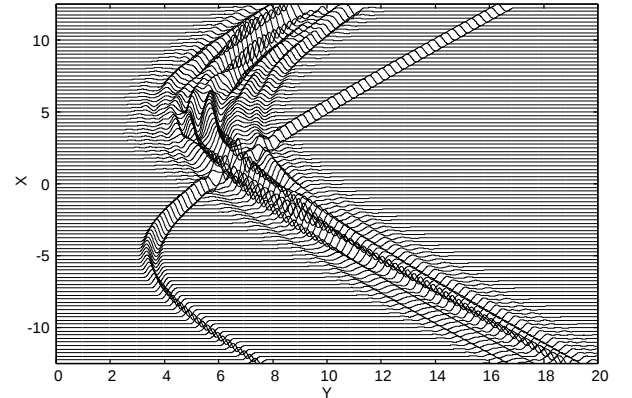


図 6 単純形状物体および複雑形状物体からの受信信号

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 左の円と図 5 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。

図 3 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、図では円の大きさで示されている。

図 6 に図 3 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 7 に示す。複雑な形状の物体では、

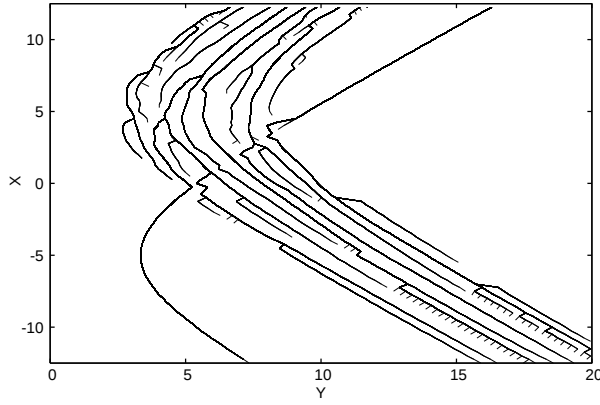


図 7 単純形状物体および複雑形状物体からの受信信号より推定された擬似波面

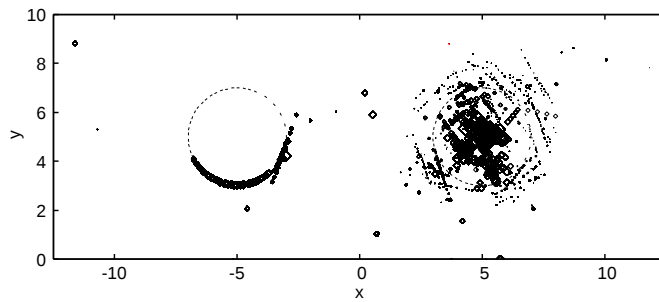


図 8 SEABED 法により推定される形状 (単純形状物体および複雑形状物体の場合)

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 8 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。

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. 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、多数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

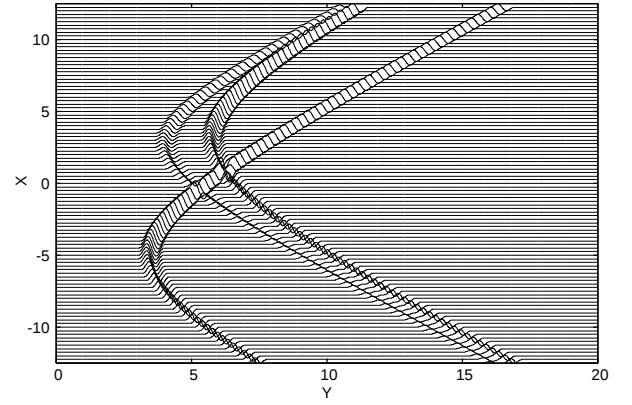


図 9 干渉点検出用受信信号波形

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。干渉検出法の動作を以下に示す。

- (1) 極値を取る点を受信信号 $s(X, Y)$ から抽出する。
- (2) 極値点の遅延時間および振幅を保存する。
- (3) 遅延時間および振幅を用いて再現波形 $s_r(X, Y)$ を生成する。
- (4) 残差信号 $r_{\text{int}}(X, Y) = s(X, Y) - s_r(X, Y)$ を計算する。
- (5) 残差信号 $r_{\text{int}}(X, Y)$ の振幅の大きな領域を適当な閾値で選び出し、干渉領域とする。

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かめた。図 9 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 10 に示す。図 9 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 10 で検出されていることがわかる。

7. カルマンフィルタ

本稿ではカルマンフィルタを用いて擬似波面の抽出を行う。本節ではカルマンフィルタについて簡単に説明する。カルマンフィルタとは、物体の状態が外乱により変動しその観測値にも誤差が含まれる場合において、物体の状態を推定するためのフィルタである。非定常信号に対する最適フィルタであることが知られており、軍用レーダによるトラッキングなどにも実際に用いられている。トラッキングにカルマンフィルタを用いる場合、物体の運動モデルを仮定し、その運動モデルより推定された次

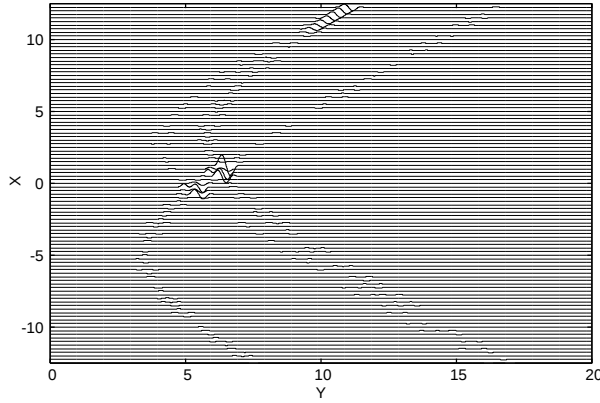


図 10 抽出された干渉点

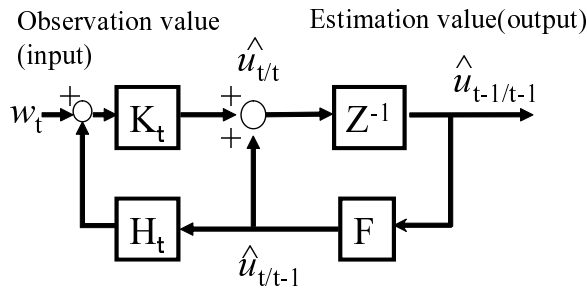


図 11 カルマンフィルタ

時刻の物体の状態と、実際に観測された値との差分を取り、これにカルマンゲイン K_t と呼ばれる行列をかけたものを推定値にフィードバックし、逐次的に状態を推定していく。図 11 にカルマンフィルタの簡易動作図を示す。

ここで w_t は観測ベクトル、 u_t は状態変数ベクトルであり、仮定する運動モデルにもとづいた値を取る。本稿では運動モデルは放物運動を仮定し、その時の u_t 、 w_t はそれぞれ以下で表される。

$$u_t = \begin{pmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{y}_t \\ \hat{\dot{x}}_t \\ \hat{\dot{y}}_t \end{pmatrix} \quad w_t = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで $\hat{\cdot}$ は推定値を、 $\dot{\cdot}$ は時間微分をそれぞれ表す。

8. カルマンフィルタによる擬似波面抽出

6. で切り分けられた干渉部分・非干渉部分から、カルマンフィルタによって干渉部分の擬似波面を非干渉部分の擬似波面の延長として推定する。非干渉部分では通常のカルマンゲインにより平滑化を行い、干渉部分でのデータは非白色の不要成分が大きいので、カルマンゲインをゼロにする。具体的には状態空間において状態遷移行列のみにより擬似波面を延長していく。カルマンフィルタにより一般の曲線を追跡するために、多項式モデルが頻繁に用いられる。本稿では次数を 2 としており、この場合には局所的な放物線近似と等価である。一方、干渉部分の

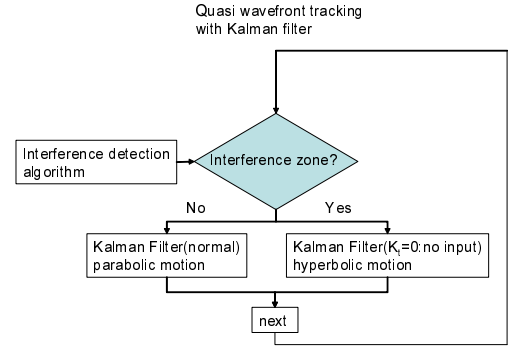


図 12 提案法

追跡については放物線ではなく双曲線近似を採用している。これは擬似波面が一般の曲線となる鏡面反射と異なり、エッジ回折波は必ず双曲線形の擬似波面となるためである。エッジ回折波は任意の方向から観測できるため、干渉に寄与することが多い。このため本稿の提案手法にはモデルの切り替えが有効に働くと考えられる。

非干渉部分における更新には、次の式 (9) であらわされる放物運動モデルを用いる。

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{t+1} \\ \hat{y}_{t+1} \\ \hat{\dot{x}}_{t+1} \\ \hat{\dot{y}}_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{y}_t \\ \hat{\dot{x}}_t \\ \hat{\dot{y}}_t \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで Δt はカルマンフィルタの 1 ステップに対応する単位時間である。実際の動作ではこの計算により算出されたものと実際の観測値の差分を取り、それにカルマンゲインをかけあわせたものをフィードバックする。これに対し、干渉部分では次の式 (10) に示される双曲線モデルで更新を行い、観測値との差分はとらずモデルのみによる更新となる点が違いである。

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_{t+1} \\ \hat{y}_{t+1} \\ \hat{\dot{x}}_{t+1} \\ \hat{\dot{y}}_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{y}_t \\ \hat{\dot{x}}_t \\ \hat{\dot{y}}_t \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで A は微分方程式より導かれる双曲線運動の加速度であり、次式であらわされる。

$$\ddot{y} = \frac{\dot{x}^2}{y} \left\{ 1 - \left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}} \right)^2 \right\} + \frac{\ddot{y}\dot{x}}{\dot{x}} \quad (11)$$

提案法の簡易動作図を図 12 に示す。

9. 提案法の適用

図 6 の受信信号に干渉部分検出を行い、単純形状物体からの信号で干渉を起こしていない部分を取り出す。その信号より取り出した擬似波面が図 13 の実線部分である。これを入力としてカルマンフィルタを用い、干渉部分の擬似波面を推定したものが同図の破線部分である。非干渉部分の擬似波面の延長とし

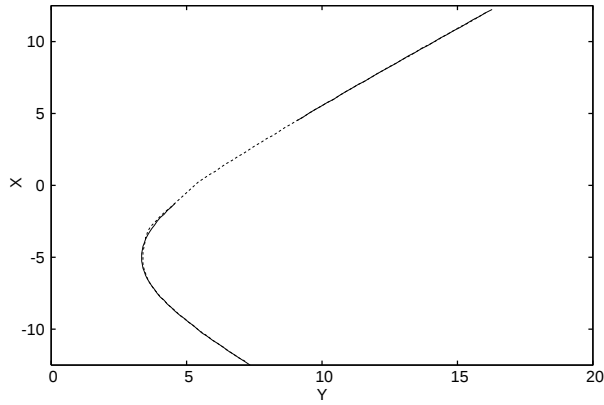


図 13 カルマンフィルタにより推定・内挿された擬似波面

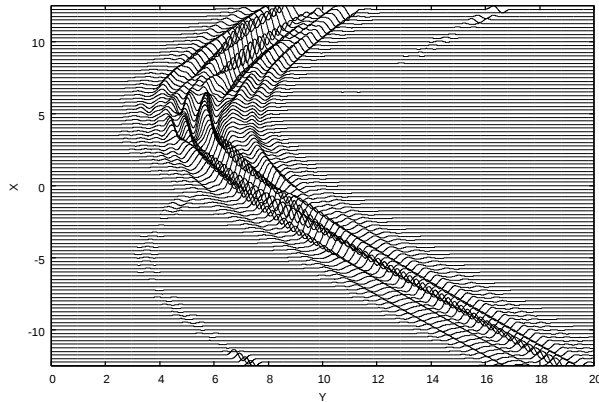


図 14 分離された複雑形状物体からの受信信号

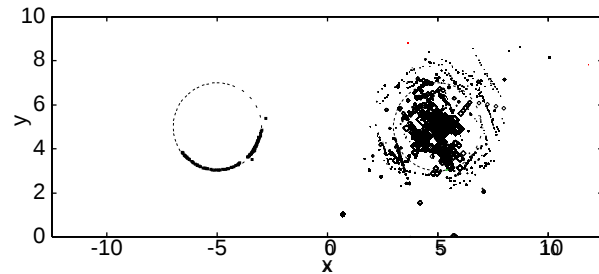


図 15 提案法を用いた推定像

て、なめらかに補完されていることがわかる。また、複雑な形状の物体にもこの擬似波面の情報をフィードバックさせるために、この擬似波面と振幅より単純形状物体単体からの受信波を再現し、全体より差し引くことで複雑形状物体と単純形状物体の信号を分離する。なお、複雑形状物体と単純形状物体が交差している部分の振幅情報は干渉により失われているため、これの推定にもカルマンフィルタを用いた。再現受信波を差し引き、複雑形状物体のみによる散乱波信号としたものを図 14 に示す。

この補完された擬似波面を用いて推定した像を図 15 に示す。先に示した図 8 と比べ、単純形状物体の歪みが改善されていることがわかる。また複雑形状物体と単純形状物体の信号を分離したため、いくつかの間違って推定されていた点が消えており、複雑形状物体に対しても改善がみられる。

10. まとめと今後の予定

本稿では複雑形状物体に対して SEABED 法を適用するための干渉部分検出とカルマンフィルタを用いた新たな方法を提案し、数値計算によって多干渉環境下での特性が改善されたことを示した。

今後の予定としては、数値計算だけではなく実験より得られたデータに対しても提案法を適用する。また、カルマンフィルタにより推定された擬似波面より受信信号を再現し、それを差し引くことにより干渉部分を逐次分解し、さらなる特性改善を行う。また、対象が運動している場合についても検討を進める。

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.