

# 超広帯域マルチスタティックイメージングレーダのための SEABED法

阪本卓也\*, 佐藤 亨 (京都大学)

SEABED Algorithm for Ultra Wide-Band Multi-Static Imaging Radar Systems

Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

## Abstract

Ultra wide-band (UWB) radar is considered to be a promising candidate for the next generation imaging system in a variety of fields. UWB radar imaging method, SEABED (Shape Estimation Algorithm Based on Extraction of Directly Scattered Waves) has been of great interest because of its high-speed imaging capability. This method has been designed to employ a mechanical scanner that requires a long measuring time, preventing real-time operation. One solution for this problem is introduction of antenna array systems. By using an antenna array, multi-static data are obtained but cannot be effectively processed with the SEABED method because it was designed for mono-static data. A high-speed imaging method, namely bi-static SEABED, has been proposed for ultra wide-band multi-static radar data. This method employs a reversible transform called bi-static IBST derived for a fixed distance between transmitting and receiving antennas. This study derives another transform, namely common midpoint (CMP)-IBST, for a fixed midpoint between transmitting and receiving antennas. The performance of these methods are investigated through numerical simulations.

キーワード：SEABED, マルチスタティック, 超広帯域レーダ, 可逆変換, IBST  
(SEABED, multi-static, ultra wide-band radar, reversible transform, IBST)

## 1. はじめに

火災や原子力発電所の事故など、人間が災害現場へ近づくと困難な状況においてはセンサを搭載したロボット等の活躍が期待される。カメラなどの従来技術と異なり、超広帯域レーダ技術は高い距離分解能や立体形状イメージング機能を有するため、こうした多くの測定への応用が期待されている。超広帯域レーダを用いたイメージング技術を実現するため、多くの手法が提案されてきた [1] ~ [3]。その中でも、エコーの遅延時間および可逆変換 (IBST: Inverse Boundary Scattering Transform) による高速イメージングを実現する SEABED (Shape Estimation Algorithm Based on Extraction of Directly Scattered Waves) 法は、リアルタイムイメージングを実現するために有効な技術として注目されている [4], [5]。

SEABED 法 [4] は単一アンテナを直線走査して信号の送受信を行い、受信信号をもとに形状を推定する技術である。このシステムではイメージングに必要な計算自体は高速に行えるものの、測定に必要な時間が無視しえず、システム全体としてリアルタイム処理が実現されない。この問題を解消するためにアンテナアレイを用いたシステムが検討された [6]。このシステムでは高周波スイッチにより使用するアンテナを選

択することで、機械的走査を必要とせずに測定を実現できるように測定の高速度を実現する。このシステムでは、送信と受信を同一のアンテナで行うモノスタティックレーダだけでなく、送受信にそれぞれ異なるアンテナを使用するマルチスタティックレーダを構成することができる。マルチスタティックレーダ測定をさらに高速化するために送信信号が互いに直交するよう異なる符号による変調を行うことで、すべてのアンテナから同時に信号を送信する方法が開発された [7]。

このようにアレイアンテナを用いる場合、送受信を別のアンテナで行うバイスタティック測定データに対しては従来の SEABED 法は適用できなかった。そこで従来の BST を拡張した Bistatic-IBST が開発され、信号処理に適用された [6]。この Bistatic-IBST は、送信アンテナと受信アンテナの距離を一定としたまま両アンテナを走査する構成を想定している。しかし、この方法は両アンテナ間距離と測定データの関係を使用しておらず、データの有する情報の一部しか使われていない。本稿では、送受信アンテナ位置の中点を一定とした場合に成り立つ変換式 CMP (Common Mid-Point)-IBST を導出し、その特性を明らかにする。

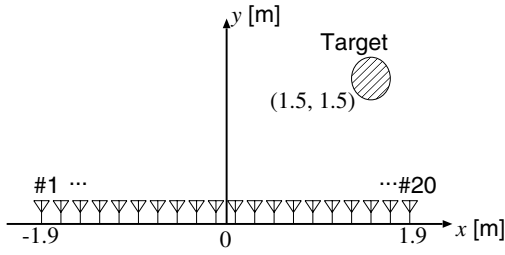


図1 システムモデル  
Fig.1 System model.

## 2. システムモデル

本稿では簡単のため2次元問題を想定する。直線状に等間隔で配置したアレイアンテナを想定し、アンテナベースラインを  $x$  軸と定義する。アンテナの配置と座標系を図1に示す。それぞれのアンテナは超広帯域特性を有し、送信機および受信機に接続され、全体でマルチスタティックレーダを構成する。第  $n$  番アンテナの座標を  $(X_n, 0)$  とし、目標は上半平面  $y > 0$  に位置すると仮定する。第  $m$  番目のアンテナで送信し、第  $n$  番目のアンテナで受信した時間領域信号を  $s(X_m, X_n; t)$  と定義する。ただし、この信号は受信信号に、送信波に整合するフィルタを適用した後の波形とする。つまり、受信波形が送信波と一致する場合には信号のピークに対応する遅延時間が伝搬経路に相当する。マルチスタティック測定により、 $N$  をアンテナ数とすると、受信される信号は  $N^2$  個の信号  $s(X_m, X_n; t)$  ( $m, n = 1, 2, \dots, N$ ) となる。送受信アンテナ位置  $X_m$  および  $X_n$  は離散量であるが、便宜上実数の値をとりうるとして  $s(X_t, X_r; t)$  と表示する。ここで  $X_t$  および  $X_r$  は送受信アンテナ位置である。

SEABED 法の特徴は受信信号の波形情報全体を用いずにピーク点のみを最初に抽出し、その情報のみで形状を推定する点にある。このことにより計算量を大幅に削減することを実現している。信号  $s(X_t, X_r; t)$  から推定されるエコーの遅延時間のうちのひとつ  $t = t_d$  により定まる変数  $Y$  を導入し、 $Y = ct_d/2$  と定義する。ここで  $c$  は電波の伝搬速度であり既知とする。モノスタティックレーダの場合には  $Y$  は長さの次元を有し、アンテナと散乱点の間の距離に相当する。 $Y$  は  $(X_t, X_r)$  に依存するため明示的に  $Y(X_t, X_r)$  と表すことにする。ただし、一般的には各送受信アンテナの組に応じて複数の  $Y$  の値が得られるが、ここでは簡単のために  $Y(X_t, X_r)$  が唯一つの値のみを有する一価関数と仮定する。この曲面  $Y(X_t, X_r)$  を疑似波面と呼ぶことにする。本稿で扱う問題は与えられたデータ  $Y(X_t, X_r)$  から目標の形状を推定することである。

## 3. 従来の Bistatic-IBST 変換式

本節では従来提案されてきた Bistatic-IBST [6] について説明する。送受信アンテナ  $X_t$  および  $X_r$  で受信された信号について、幾何光学的近似により疑似波面  $Y(X_t, X_r)$  の意味

を考える。この疑似波面は送信アンテナと散乱点  $(x, y)$  の距離  $\sqrt{(X_t - x)^2 + y^2}$  および受信アンテナと散乱点間の距離  $\sqrt{(X_r - x)^2 + y^2}$  の和の半分となる。このため、 $Y(X_t, X_r)$  が与えられると  $(x, y)$  の存在しうる場所は  $(X_t, 0)$  および  $(X_r, 0)$  を焦点とする楕円上となる。

この楕円を  $X_t$  および  $X_r$  で表現すると煩雑となるので、送受信アンテナの中点  $X_a = (X_m + X_n)/2$  および、送受信アンテナ位置の差の半分  $X_s = (X_m - X_n)/2$  を定義する。ここで  $X_s$  は両アンテナ間の距離ではなく、負の値もとることに注意されたい。これらの変数を用いて、 $(x, y)$  の存在しうる楕円は次式で表される。

$$G(x, y; X_a, X_s) = Y^4 - \{X_s^2 + y^2 + (X_a - x)^2\}Y^2 + X_s^2(X_a - x)^2 = 0 \quad (1)$$

散乱点  $(x, y)$  は式 (1) を  $X_a$  について偏微分した値も零とするため、

$$\frac{\partial G(x, y; X_a, X_s)}{\partial X_a} = 0 \quad (2)$$

が成り立つ。これらの式 (1) および (2) を連立して  $x$  について解くことで次式を得る。

$$x = X_a - \frac{2Y^3 \frac{\partial Y}{\partial X_a}}{Y^2 - X_s^2 + \sqrt{(Y^2 - X_s^2)^2 + 4X_s^2 Y^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial X_a}\right)^2}} \quad (3)$$

$y$  については式 (3) を  $y$  について解くことで次式で得られる。

$$y = \frac{\sqrt{Y^2 - X_s^2}}{Y} \sqrt{Y^2 - (x - X_a)^2} \quad (4)$$

ここで  $x$  の値は式 (3) で計算される値を用いる。式 (3) および (4) は Bistatic-IBST と呼ばれる変換式であり、マルチスタティック測定データを高速に画像化するバイスタティック SEABED 法に用いられる。

なお、式 (3) において  $X_s = 0$  とおくと次式が得られる。

$$x = X_a - Y \frac{\partial Y}{\partial X_a} \quad (5)$$

この式はモノスタティックレーダを想定した SEABED 法に用いられる IBST と一致する。この場合は式 (1) で表される楕円が円となる特別な場合に相当する。

## 4. 提案する Common-Midpoint IBST 変換式

本節では前節で求めた Bistatic-IBST とは別の変換式を求める。前節では散乱点  $(x, y)$  が式 (1) を  $X_a$  について偏微分した値も零とする条件を用いたが、本節では同式を  $X_s$  について偏微分した値が零となる条件

$$\frac{\partial G(x, y; X_a, X_s)}{\partial X_s} = 0 \quad (6)$$

を用いて式を導く。式 (1) を  $X_s$  について偏微分することで次

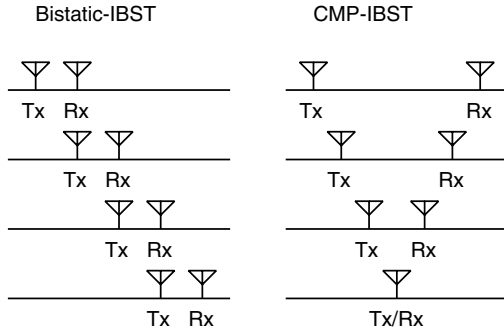


図2 Bistatic-IBST および CMP-IBST の想定するアンテナ走査  
Fig.2 Antenna scanning assumed for bistatic-IBST and CMP-IBST.

式を得る。

$$\frac{\partial G}{\partial X_s} = 2 \frac{\partial Y}{\partial X_s} Y^3 - X_s Y^2 - \{X_s^2 + y^2 + (x - X)^2\} \frac{\partial Y}{\partial X_s} Y - (x - X)^2 X_s^2 \quad (7)$$

式 (6) に式 (7) を代入し、 $x$  について解くことで次式を得る。

$$x = X_a - Y \sqrt{\frac{Y(X_s - Y \frac{\partial Y}{\partial X_s})}{X_s(Y - X_s \frac{\partial Y}{\partial X_s})}} \quad (8)$$

$y$  については Bistatic-IBST と同一の式 (4) により得られる。式 (8) および (4) を CMP (Common Mid-Point)-IBST と呼ぶことにする。これは、次節で述べるとおり、 $X_a$  を一定とする条件は両アンテナの中点を固定させたままアンテナ走査を行うことと等価であるためである。

## 5. Bistatic-IBST および CMP-IBST のデータ処理の違い

以上で説明した Bistatic-IBST および提案した CMP-IBST のでは、それぞれ送受信アンテナ座標の差および和をそれぞれ一定に保ったうえで変換式を導出している。これらはそれぞれ異なったアンテナ走査方法に対応していることを図 2 に示す。同図より、Bistatic-IBST では送受信アンテナを共通のプラットフォームに取り付け、両アンテナを同時に直線走査していることに対応する。この際、両アンテナ間の距離が零となる場合には従来の IBST で想定するモノスタティックレーダと一致する。一方、CMP-IBST では両アンテナの中点が一定となるように両アンテナを等距離だけ異なる方向へ走査することに対応する。

これらのアンテナ走査は、マルチスタティックレーダシステムを用いて得られるすべてのデータを異なる断面で切り出して使用することを意味する。図 3 にこれらの使用するデータセットを示す。横軸および縦軸はそれぞれ送信および受信アンテナ番号であり、各々の線分に沿って偏微分を計算し、イ

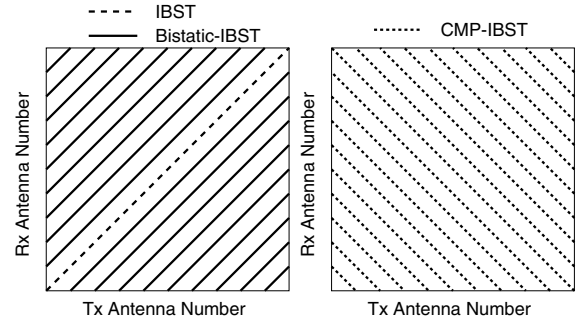


図3 IBST, Bistatic-IBST および CMP-IBST の使用するデータの区分  
Fig.3 Multistatic data sets used for IBST, bistatic-IBST and CMP-IBST.

メージングに用いられる。この図より IBST は Bistatic-IBST の特別な場合であることがわかる。一方で、CMP-IBST は従来使われてこなかったデータ区分を用いることがわかる。

## 6. 両変換式による画像化特性評価

本節では数値計算により前節で説明した Bistatic-IBST および本稿で新たに提案する CMP-IBST の両変換式による画像化例を示し、その精度を評価する。図 1 に示すとおり、目標はアンテナアレイの中心位置を原点とする座標系において中心 (1.5 m, 1.5 m)、半径 0.1 m の円形導体目標を想定する。アンテナ間隔は 0.2 m とし、20 素子のアレイアンテナを想定する。実際の測定においてはアンテナ特性、伝搬および散乱における波形の歪みにより測距精度が低下するが、本節では簡単のために信号に重畳する白色ガウス性雑音のみを考慮し、評価に用いる。信号対雑音比 (S/N) の大きい場合には S/N と測距誤差の自乗値は比例する。信号波形を仮定することでこの比例係数を求めることが可能であるが、本節では波形や帯域幅などの影響を除くことで、変換式本来の画像化特性を明らかにする。

図 4, 5, および 6 に雑音のない理想的な場合における IBST, Bistatic-IBST および CMP-IBST による画像化結果をそれぞれ示す。図中の実線は真の目標形状を示す。IBST については全データ  $20 \times 20 = 400$  信号のうちでモノスタティック測定による 20 信号のみを用いるため、推定点数が少なく推定形状が離散的な点で構成されていることがわかる。雑音のない環境では Bistatic-IBST および CMP-IBST の両手法による像はほぼ同じであることがわかる。いずれの手法でも目標形状下部の一部のみが画像化されているのは、アンテナアレイが目標の同図下側に配置されているためである。

図 7, 8, および 9 に測距誤差が 1 mm の場合における IBST, Bistatic-IBST および CMP-IBST による画像化結果をそれぞれ示す。この場合には IBST は測定点数が少ないことと誤差が IBST により非線形的に強調される効果により、推定像が劣化していることがわかる。一方、Bistatic-IBST および CMP-IBST ではいずれも劣化が見られるものの目標の概形

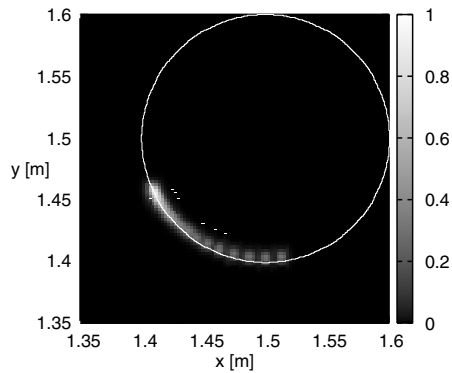


図 4 IBST による推定画像 (雑音無し)

Fig. 4 Image obtained using IBST for noiseless data.

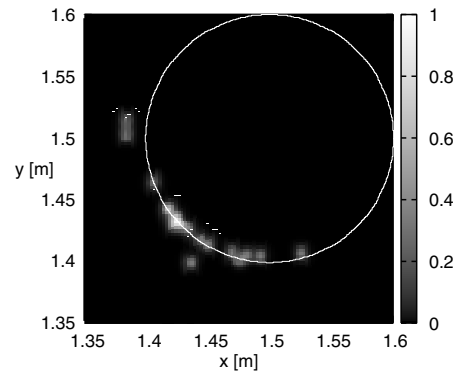


図 7 IBST による推定画像 (測距誤差 1 mm)

Fig. 7 Image obtained using IBST for ranging error of 1.0 mm.

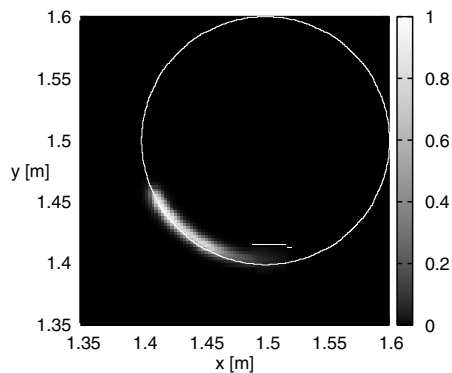


図 5 Bistatic-IBST による推定画像 (雑音無し)

Fig. 5 Image obtained using bistatic-IBST for noiseless data.

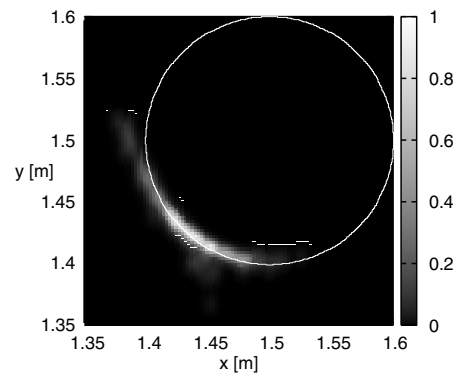


図 8 Bistatic-IBST による推定画像 (測距誤差 1mm)

Fig. 8 Image obtained using bistatic-IBST for ranging error of 1.0 mm.

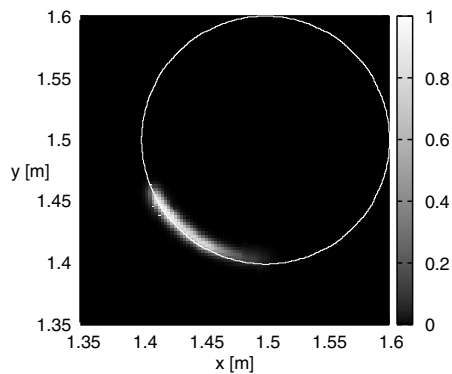


図 6 CMP-IBST による推定画像 (雑音無し)

Fig. 6 Image obtained using CMP-IBST for noiseless data.

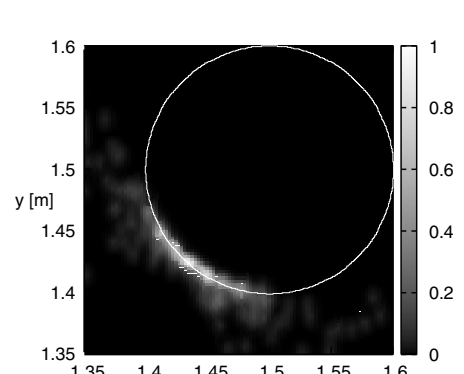


図 9 CMP-IBST による推定画像 (測距誤差 1mm)

Fig. 9 Image obtained using CMP-IBST for ranging error of 1.0 mm.

が推定されている。像劣化の程度は CMP-IBST のほうが大きい。

図 10, 11, および 12 に測距誤差が 10 mm の場合における IBST, Bistatic-IBST および CMP-IBST による画像化結果をそれぞれ示す。この場合にはいずれの手法においても目標の

おおよその位置のみが推定され、形状については推定されるに至らない。

図 13 に Bistatic-IBST および CMP-IBST の両手法による

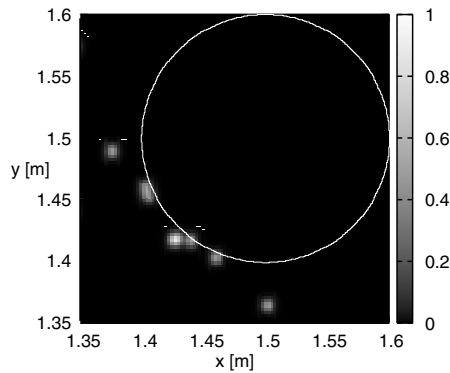


図 10 IBST による推定画像 (測距誤差 10mm)

Fig.10 Image obtained using IBST for ranging error of 10.0 mm.

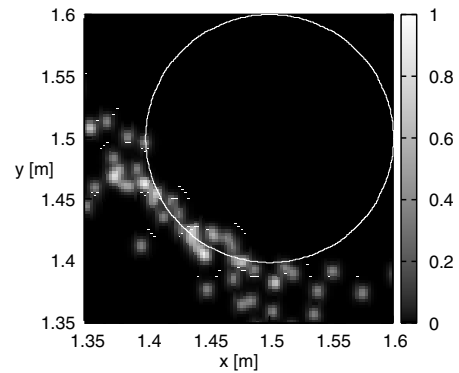


図 12 CMP-IBST による推定画像 (測距誤差 10mm)

Fig.12 Image obtained using CMP-IBST for ranging error of 10.0 mm.

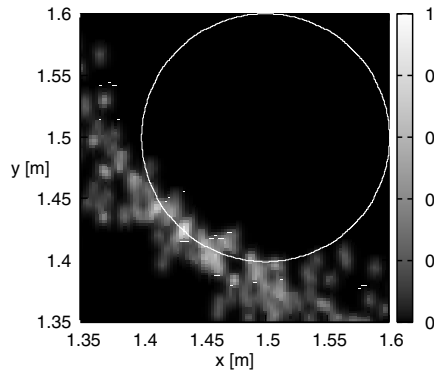


図 11 Bistatic-IBST による推定画像 (測距誤差 10mm)

Fig.11 Image obtained using bistatic-IBST for ranging error of 10.0 mm.

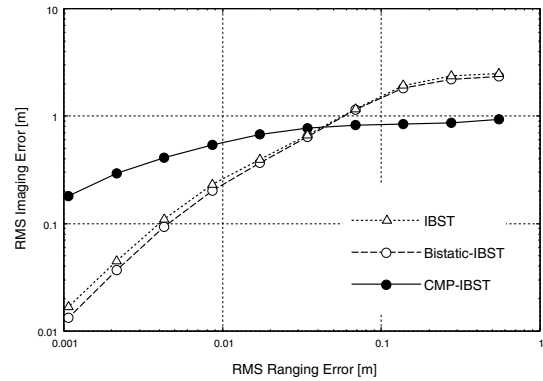


図 13 Bistatic-IBST および CMP-IBST による画像化精度

Fig.13 Imaging accuracy for bistatic-IBST and CMP-IBST.

推定像の誤差を示す。仮定する目標位置および形状はこれまでと同じである。目標形状を表す曲線上の点のうち各推定位置に最も近い点を選び、その点と推定位置間の距離を誤差と定義する。不規則成分は正規乱数を数値的に生成して誤差の評価に使用する。特に、乱数の種については 10,000 通り変化させ、各々得られる画像誤差を RMS (root-mean-square) により平均することで評価を行う。同図より、測距誤差が低い場合には CMP-IBST は Bistatic-IBST よりも大きな誤差を有することがわかる。一方、測距精度が悪化するに従い CMP-IBST の誤差は Bistatic-IBST の精度に近づき、測距精度が 4 cm を超えると両者の精度は逆転する。すなわち、提案法 CMP-IBST は S/N の低い劣悪な雑音環境下において従来法 Bistatic-IBST よりも高い精度でのイメージングを可能とすることがわかる。一方、モノスタティックレーダを想定した IBST は Bistatic-IBST とほぼ同程度の誤差となることも確認できる。本節で示したいいくつかの像においては SEABED の像は Bistatic-IBST よりも大きく劣化しているように見えるが、実際には IBST と Bistatic-IBST の主な違いは推定点

の個数のみであることがわかる。

## 7. まとめ

本稿では超広帯域マルチスタティックレーダのための画像化手法について検討した。従来知られていた変換式 IBST および Bistatic-IBST に加えて、新たな変換 CMP-IBST を導出し、その画像化特性を数値的に調べた。検討の結果、測距精度の高い場合には従来法と提案法の性能は同程度であるが、測距誤差に対しては手法に応じて推定像の劣化度が異なる。測距精度の高い場合には従来法の Bistatic-IBST が、測距精度の低い場合には提案法の CMP-IBST がそれぞれ高い画像化精度を実現することが示された。今後、これらの特性がどのような条件に依存するのかを解析的に調べることで、実際の測定データで考慮すべき波形歪などのほかの条件を考慮した実際の特性評価を行うことが必要である。

## 文献

- [1] A. G. Yarovoy, T. G. Savelyev, P. J. Aubry, P. E. Lys, L. P. Ligthart, "UWB array-based sensor for near-field imaging," IEEE Transactions on Microwave Theory and

Techniques, vol. 55, no. 6, part 2, pp. 1288-1295, June 2007.

- [2] Y. Wang, Y. Yang, A. E. Fathy, "Experimental assessment of the cross coupling and polarization effects on ultra-wide band see-through-wall imaging reconstruction," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 9-12, June 2009.
- [3] A. Nelander, "Switched array concepts for 3-D radar imaging," Proc. 2010 IEEE Radar Conference, pp. 1019-1024, 2010.
- [4] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," IEICE Transaction on Communications vol. E87-B, no. 5, pp. 1357-1365, May 2004.
- [5] T. Sakamoto and T. Sato, "A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems," Proc. 2004 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, vol. 2, pp. 2099-2102, June, 2004.
- [6] S. Kidera, Y. Kani, T. Sakamoto and T. Sato, "A fast and high-resolution 3-D imaging algorithm with linear array antennas for UWB pulse radars," IEICE Trans. on Commun., vol. E91-B, no. 8, pp. 2683-2691, Aug. 2008.
- [7] T. Sakamoto and T. Sato, "Code-division multiple transmission for high-speed UWB radar imaging with an antenna array," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 4, pp. 1186-1179, Apr. 2009.