

多重反射環境での単一 UWB アンテナを用いた 周波数領域 DORT レーダイメージングの性能評価

阪本卓也*, 佐藤 亨 (京都大学)

Performance Evaluation of Frequency-domain DORT Imaging Method for UWB Radar
using a Single Antenna in Multipath Environments
Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

Abstract

Ultra Wide-Band (UWB) radar is a promising technology for a variety of applications including security systems. It is important to develop a cost-effective UWB radar system for it to be applied the system in practice. A high resolution UWB radar imaging method, frequency-domain DORT (Décomposition de Opérateur de Retournement Temporel), has been developed to realize a simple imaging radar based on a single element. The method has so far been investigated only for a point-like target; to clarify its feasibility, it is indispensable that its performance be evaluated for a finite-sized target. This paper applies the method to a finite-sized circular target to quantitatively estimate its accuracy and image sharpness. The results show that the method generates a sharp image for a target with a radius smaller than 70 mm.

キーワード：DORT, 時間逆転法, 超広帯域, レーダ, イメージング
(DORT, time reversal, ultra wideband, radar, imaging)

1. はじめに

超広帯域 (UWB) 信号を用いたレーダは数 cm と高い分解能を有し, セキュリティシステムを含む多くの応用が期待される技術である. UWB レーダを用いたイメージング手法として, 時間逆転法 (time reversal) が高い分解能を実現するとして注目を集めている. 時間逆転法はローレンツ (Lorentz) の可逆定理 (reciprocal theory) に基づく手法であり, 受信信号の時間波形の時間を正負逆転させた信号を受信アンテナから送信することで, 目標や送信アンテナ位置にて複数の波形がコヒーレントに強めあうことを利用する. 一般的に時間逆転法による逆伝搬は計算機により数値的に行われる. アレイアンテナを用いたレーダシステムへ適用する場合には, 古典的なアレイの開口長に対応する分解能を越える, 超高分解能を実現することが知られている.

時間逆転法の分解能をさらに改善するために DORT (French acronym for decomposition of the time reversal operator) 法が Devaney らにより開発された [1]. DORT 法は単一周波数のアレイアンテナを想定し, バイスタティック観測により得られた測定値からなる行列を特異値分解することで複数の伝搬経路を独立に取りだし, 高い分解能を実現した [2], [3]. ここで使用される行列は行および列にそれぞれ送信素子および受信素子番号が対応する. しかし, DORT 法に使用できる行列

の構成方法はこの形に限定されず, Teixeira らは行と列にそれぞれ素子番号および周波数を対応させた行列を使用し, 広帯域信号に対応した DORT 法を構成した [4].

セキュリティシステムへの応用を考慮すると, レーダシステムの簡易化, 低コスト化は必須であり, 少数のアンテナのみによる UWB レーダイメージング技術が必要となる. その一方で従来の時間逆転法の研究の多くはアレイ素子を想定しており, 実用を考えた場合には素子数の削減が必須の課題となる. Sakamoto and Sato は DORT 法を単一素子に適用できるように拡張し, 行列を周波数領域のみで構成する周波数領域 DORT 法を提案した [5]. 周波数領域 DORT は既知の多重反射環境において高い分解能を実現することが数値計算および実験により明らかになっている.

DORT 法はその性質上目標を点近似しているため, 有限の大きさの目標への適用は想定されていない. オリジナルの DORT については, モデルと実際の環境の差異について性能への影響が報告されている [6]. これまで, 周波数 DORT 法の非点状目標に対する特性は明らかにされていない. この手法の実用性を評価する上で, 目標の大きさを変えた場合のイメージング性能を評価することは必要不可欠である. そこで本稿では数値計算により目標の大きさとイメージング性能の関係を明らかにする. 円状目標の半径を 1mm から 100mm まで変化させ, 得られる画像の分解能や精度を定量評価する.

2. システムモデル

図1に本稿で想定するシステムモデルを示す．TH波を想定した2次元問題を想定し，点状金属目標の位置を推定することを目的とする．ここで距離はすべて送信パルスの中心波長 λ で正規化されている．中心周波数は4.0GHzを想定するため，ここでは $\lambda = 75.0$ mmとなる．受信波形はFDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いて計算する．吸収境界には6層のPML(Perfect Matched Layer)を使用し，グリッド幅は1.0mmとする．

DORT法では数値的に伝搬や散乱を計算し，イメージングに使用する．2次元のスカラー波のグリーン関数は次式で表される．

$$G(\omega, r, r') = -\frac{j}{4} H_0 \left(\frac{\omega}{c} |r - r'| \right), \quad (1)$$

ここで H_0 は第一種Hankel関数であり， r と r' 伝搬経路の両端点である．点目標による散乱はBorn近似を用いて次式で表される．

$$S(\omega) = \int \omega^2 \sigma(r') G^2(\omega, r, r') dr', \quad (2)$$

ここで $\sigma(r')$ は位置 r' における比誘電率である．想定するレーダシステムは単一の送信アンテナ T_x および受信アンテナ R_x により構成される．さらに，完全導体で構成される平板 W および点状の完全導体目標 P を想定する．送信パルスはモノサイクルパルス $s_T(t)$ とし，これはUWB信号の条件を満たす．

アンテナ T_x ， R_x と平板 W の相対位置は既知であるとする． T_x から R_x への直接波 $s_D(t)$ および平板 W からの反射波 $s_W(t)$ は実際の測定に先立ちちもって測定され，メモリに保存される．波形 $s_D(t)$ と $s_W(t)$ は受信された信号 $s_0(t)$ から減算され， $s(t) = s_0(t) - s_D(t) - s_W(t)$ のとおりに直接波と平板からの反射波を含まない信号が得られる．

DORT法においてはこの信号 $s(t)$ は次の4つの波形を含むと想定する．

- $s_1(t)$ T_x - P - R_x ,
- $s'_2(t)$ T_x - P - W - R_x ,
- $s''_2(t)$ T_x - W - P - R_x ,
- $s_3(t)$ T_x - W - P - W - R_x ,

ここで $s'_2(t)$ と $s''_2(t)$ はいずれも同じ伝搬経路を通るものの，それぞれ異なる方向の伝搬に対応する．このため，これらの反射波はシステムが完全にLorentzの可逆定理を満たす場合には分離不可能である．このため新たな変数 $s_2(t) = s'_2(t) + s''_2(t)$ を導入することで，以降では3通りの伝搬経路のみ考慮する．また，このモデルは高次の多重反射波を無視するが，FDTDで生成される実際の波形には多くの多重反射成分が含まれる．

3. 従来の時間逆転法およびDORT法

時間逆転法はLorentzの可逆定理を使用し，簡易な信号処理により実現される．時間逆転法の処理を以下で説明する．前

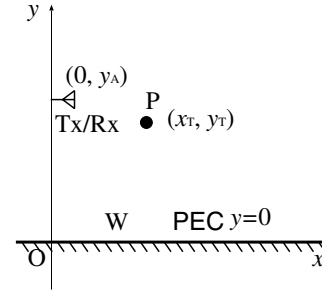


図1 本稿で想定するシステムモデル

節のとおりに送信アンテナ T_x から目標を経由してアンテナ R_x にて受信される信号を $s(t)$ とする．信号が T_x にて送信される時刻を $t = 0$ とする．このとき，時間逆転信号 $s(-t)$ を受信アンテナ R_x から送信すると送信アンテナ T_x において時刻 $t = 0$ に強い信号が受信される．

次に，想定したシステムの媒質におけるグリーン関数 $G(\omega, r, r')$ を導入する．このグリーン関数には平板 W による反射も含まれる．このとき，受信信号 $s(t)$ のフーリエ変換 $S(\omega)$ は送信波形 $s_T(t)$ のフーリエ変換 $S_T(\omega)$ を用いてある定数係数を無視して次式のとおりに表される．

$$S(\omega) = \omega^2 G^2(\omega, r, r') S_T(\omega), \quad (3)$$

ここで，送受信アンテナ T_x と R_x の位置はいずれも r とし，点状目標の位置を r' としている．ここで点目標からの散乱は前節で述べたとおりにRayleigh散乱を仮定する．また，時間領域における時間逆転は周波数領域における複素共役と等価である．このため，時間逆転法により得られる像 $I_{TR}(x)$ は目標の反射係数を簡単のため $\sigma = 1.0$ とし，次式で得られる．

$$\begin{aligned} I_{TR}(x) &= \int S^*(\omega) S_T(\omega) G^2(\omega, r, x) d\omega, \\ &= \int \omega^2 |S_T(\omega)|^2 G^{*2}(\omega, r, r') G^2(\omega, r, x) d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

式(5)における像の値 $I_{TR}(x)$ は $x = r'$ が満たされた場合に最大となる．これは，この条件が成り立つ場合には被積分関数が実数となるためである．このように，上記の古典的な時間逆転法は一種の整合フィルタと見ることもできる．

DORTは時間逆転法に特異値分解を導入することで分解能を向上させた拡張法である．DORTは送受信信号として正弦波を想定し，アンテナアレイの任意の2素子を送受信素子に指定してデータを取得する．測定データを用いて，行と列にそれぞれ送信素子および受信素子に対応させた空間-空間行列 K_{SS} を生成する．行列 K_{SS} の要素 $k_{i,j}$ は i 番目および j 番目の素子をそれぞれ送受信素子とした場合に受信される複素信号値とする．

ここで $k_{i,j}$ は次式で表される．

$$k_{i,j} = \sum_{l=1}^K \sigma_l g_{i,l} g_{l,j} \quad (6)$$

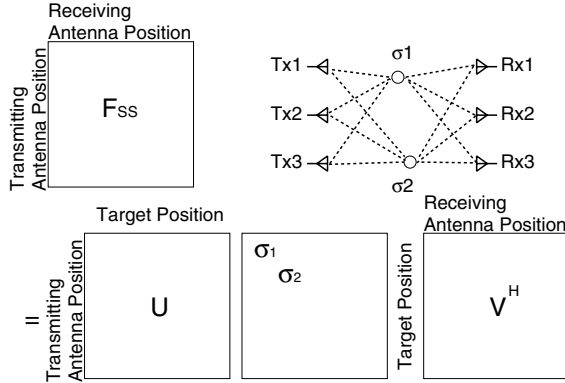


図 2 従来の DORT における空間-空間行列の特異値分解

ここで $g_{i,l}$ は i 番目のアンテナから l 番目の点目標までの伝搬経路に対応するグリーン関数である．また， σ_l は l 番目の目標の散乱断面積に比例する．式 (6) の行列 K_{SS} は次式のように 3 行列の積に一意に分解することができる．

$$K_{SS} = U \Sigma V^H \quad (7)$$

ここで U と V の要素はそれぞれ $g_{i,l}$ と $g_{l,j}$ と表される．すなわち，グリーン関数は U および V の 2 つの要素に分解され， U は送信アンテナから目標までの伝搬経路を， V は目標から受信アンテナまでの伝搬経路をそれぞれ表す． Σ は対角行列であり，要素を σ_l とする．これは l 番目の目標の散乱断面積に比例する値である．以上の処理により，古典的な MUSIC 法と同様に Σ の対角要素のうち小さい成分を用いることで雑音部分空間を構成し，画像化を実現することができる．この処理の概要は図 2 に示される．本手法は複数アンテナおよび正弦波信号という条件下では高い性能を有することが知られているが，超広帯域信号および単一素子という本稿の条件下で使用するためには拡張が必要となる．

4. 周波数領域 DORT 法

周波数領域 DORT 法は前節の DORT 法の行列の生成法を修正することで，単一アンテナのみで高分解能イメージングを実現する [5]．周波数領域の受信信号 $S(\omega)$ の離散角周波数 $\omega_1, \dots, \omega_N$ における値を $S_1, \dots, S_N$ とする．行列 K_{FF} は次式で表される．

$$K_{FF} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & \cdots & S_L \\ S_{L+1} & S_{L+2} & \cdots & S_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{N-L+1} & S_{N-L+2} & \cdots & S_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで ω および $\Delta\omega$ は荒い周波数 (coarse frequency) および細かい周波数 (fine frequency) をそれぞれ表す．この近似のもとで，各伝搬経路におけるグリーン関数は 2 つの行列に分解される．これらの行列は周波数領域 DORT 法で用いられる．まず，周波数領域 DORT は K_{FF} に特異値分解を適用し，

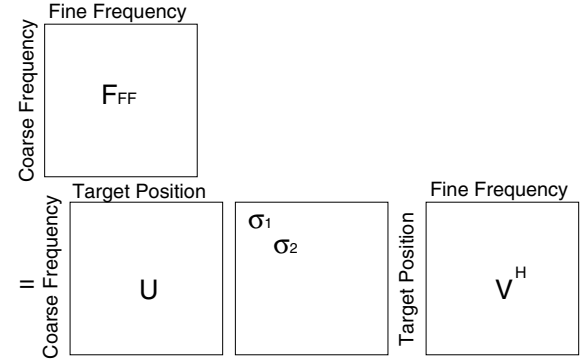


図 3 Singular value decomposition of a space-space matrix in the proposed DORT.

法においてグリーン関数は次式で表される．

$$G(\omega + \Delta\omega, r', r) \simeq -\frac{j}{4} \frac{\exp(j \frac{\omega + \Delta\omega}{c} |r - r'|)}{\sqrt{\frac{\omega + \Delta\omega}{c} |r - r'|}} \quad (9)$$

$$\simeq -\frac{j}{4} \frac{\exp(j \frac{\omega}{c} |r - r'|)}{\sqrt{\frac{\omega}{c} |r - r'|}} \quad (10)$$

$$\cdot \exp(j \frac{\Delta\omega}{c} |r - r'|) \quad (11)$$

ここで ω および $\Delta\omega$ は荒い周波数 (coarse frequency) および細かい周波数 (fine frequency) をそれぞれ表す．この近似のもとで，各伝搬経路におけるグリーン関数は 2 つの行列に分解される．これらの行列は周波数領域 DORT 法で用いられる．

まず，周波数領域 DORT は K_{FF} に特異値分解を適用し，

$$K_{FF} = U \Sigma V^H \quad (12)$$

のとおり分解する．ここで Σ は特異値を要素として有する対角行列である．ここで左および右特異行列は荒い周波数および細かい周波数にそれぞれ対応する．従来の DORT 法のとおり，特異値のうちで小さい $L - PK$ 個を選び，それに対応する特異ベクトルで構成される $L - PK$ 次元の雑音空間を計算する．ここで P は各々の点目標に対応する伝搬経路の数を表す．また， K は目標の数である．本稿では単一の目標のみを仮定し， $P = 3$ および $K = 1$ とする．こうして左および右特異ベクトル $u_{PK+1} \dots u_N$ and $v_{PK+1} \dots v_N$ を計算し，雑音部分空間を構成する．ここで右特異ベクトルと左特異ベクトルでそれぞれ別の空間が各々の伝搬経路に対して定義できる．まず，左特異ベクトルにより作られる雑音部分空間から像が次式で計算される．

$$I_L(x) = \frac{1}{\sum_{i=PK+1}^L \sum_{p=1}^P |u_i^H g_p(x)|^2 / |g_p(x)|^2}, \quad (13)$$

ここで g_p は L 次元ベクトルであり，それぞれの要素は各周波数 $\omega_1, \omega_{L+1}, \dots, \omega_{N-L+1}$ における p 番目の経路に対応した

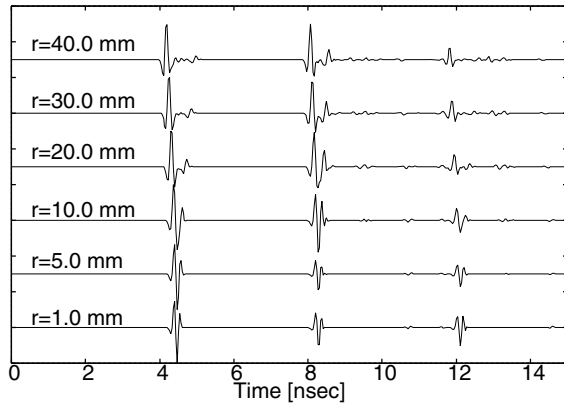


図 4 異なる半径の完全導体円筒を目標とした場合の受信信号

グリーン関数である．同様にして，右特異ベクトルを用いて別の像 $I_R(x)$ が計算される．

左特異ベクトルにより生成される像是分解能が高いものの，いくつかの虚像が生じる．一方，右特異ベクトルにより生成される像是低分解能であるものの，虚像は生じない．これらの特徴を利用し，周波数領域 DORT ではこれらの像の積を計算することで $I_{DORT}(x) = I_L(x)I_R(x)$ のとおり最終的な推定像を計算する．

5. 様々な目標の大きさに対するイメージング手法適用

本節では提案法を適用して得られる像について詳細に検討する．図 1 に示すとおり，平板 W は x 軸に配置し，送受信アンテナは同一のアンテナを兼用し， y 軸上に配置される．中心周波数 4GHz のモノサイクルパルスを送信し，受信信号から目標像を計算する．目標は (600.0mm, 750.0mm) の位置に，アンテナは (0.0mm, 600.0mm) の位置に配置する．まず，雑音のない理想的な環境下での検討を行う．周波数領域 DORT 法には正方形行列の次元 $L = 10$ ，周波数要素数 $N = 100$ および雑音部分空間の次元 $L - PK = 7$ を想定する．すなわち， 10×10 行列である K_{FF} に特異値分解を適用し，得られた特異値のうち小さいものから 7 個を選択し，これらに対応する右特異ベクトルと左特異ベクトルを用いてイメージングを行う．

半径 r の円筒導体目標からの受信信号を図 4 に示す．上記の 3 個の経路に対応したエコーが確認できる．目標の半径が大きくなるにつれ，これらのエコーの受信時刻は早まる．一方で大きな半径の目標に対応したエコーの後方にはクリーピング波がみられる．ここで，周波数領域 DORT に用いられるグリーン関数は点状目標を仮定して構成されているため，こうした大きな半径の目標により生じる散乱波形の Rayleigh 散乱との差異は含まれず，画像劣化の原因となる．

古典的時間逆転法による像を図 5 に示す． r が小さい場合には 3 個の波形が目標位置で干渉し強めあっていることがわかる．しかし， r が大きくなるにつれ 3 波は同一点で干渉しなくなり，最大値は大きな振幅の 2 波の干渉部分に表れる．ま

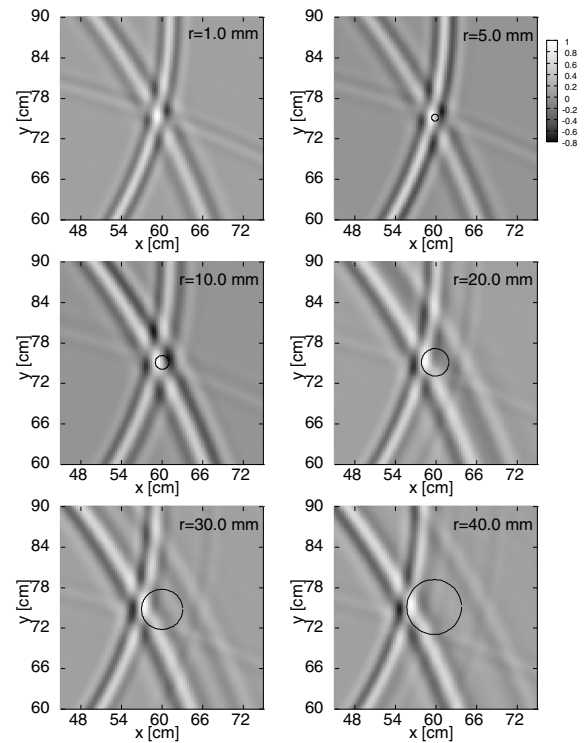


図 5 異なる半径の完全導体円筒を目標とした場合の古典的時間逆転法の推定像

たクリーピング波に対応した応答も見られる．この推定目標位置は， r が大きい場合には目標の表面の散乱中心付近となっていることがわかる．

次に周波数領域 DORT のイメージングの性能を調べる．左特異ベクトルから生成される推定像 $I_L(x)$ を図 6 に示す． $r = 1.0\text{mm}$ および $r = 5.0\text{mm}$ の場合には実際の目標位置が高い分解能で推定されている一方で，不要な虚像が複数点確認される．一方で $r = 10.0\text{mm}$ の場合には実際の目標位置での応答が弱まり，虚像が大きな値を示す． $r \geq 20.0\text{mm}$ の場合には再び実際の目標位置および虚像が同程度の強度で表れるが，分解能が低下している．

右特異ベクトルから生成される推定像 $I_R(x)$ を図 7 に示す．この場合は不要な虚像は生じていないものの，分解能は先述の $I_L(x)$ と比べて低い．この場合もやはり大きな r に対して分解能の劣化が見られ， $r \geq 30.0\text{mm}$ において分解能が顕著に悪化していることがわかる．

周波数領域 DORT の最終的な画像はこれら二通りの画像の積 $I_{DORT}(x) = I_L(x)I_R(x)$ として得られ， $I_L(x)$ の高い分解能と $I_R(x)$ の虚像抑圧効果の双方により虚像のない高い分解能画像が得られる．周波数領域 DORT により得られる画像を図 8 に示す．同図より， r の小さい範囲では高い分解能の画像が得られることがわかる．一方， r の大きい範囲では分解能が劣化していることと虚像が消しきれていない点を確認できるが，おおよその目標位置は確認できるため，イメージング手

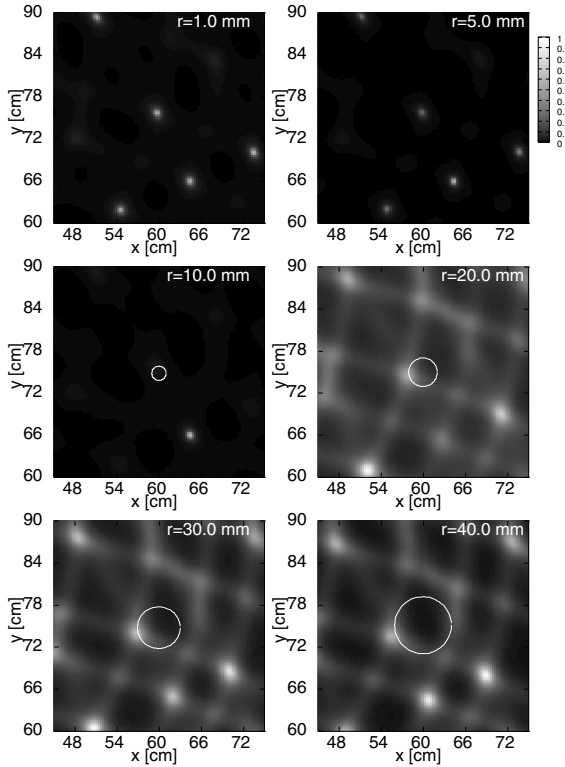


図 6 異なる半径の完全導体円筒を目標とした場合の周波数領域 DORT の左特異ベクトルからの推定像

法として全く機能しなくなるわけではない。

6. イメージング精度および分解能の評価

図 9 にマイグレーション法と周波数領域 DORT 法の目標位置推定誤差を示す。同図では 1.0mm から 100.0mm まで半径 r を変化させた完全導体目標に対する推定位置 x_E と目標の中心位置 x_T を用いて誤差 $e(r)$ を

$$e(r) = ||x_E - x_T| - r| \quad (14)$$

と定める。すなわち推定位置と、目標の表面上で推定位置に最も近い点の距離を誤差とする。同図よりマイグレーション法はどの半径 r に対しても 10.0mm 未満の精度を維持しているのに対し、周波数領域 DORT 法は目標半径が大きくなるにつれ誤差が増加していることがわかる。これは目標からの散乱経路が点目標でないため、モデルとの相違により部分空間と想定するグリーン関数の直交性が成り立たなくなっていることが理由である。さらに、目標半径が大きくなることで生じるクリーピング波などの波形の変化もイメージング性能を劣化させる原因と考えられる。また、周波数領域 DORT は $r = 10.0$ mm において大きな誤差を生じている。これは図 8 にて見られるように虚像の位置を誤って推定値としていることによる。これは図 6 に示す左特異ベクトルからの推定像に実際の目標位置に像が表れていないことが原因である。

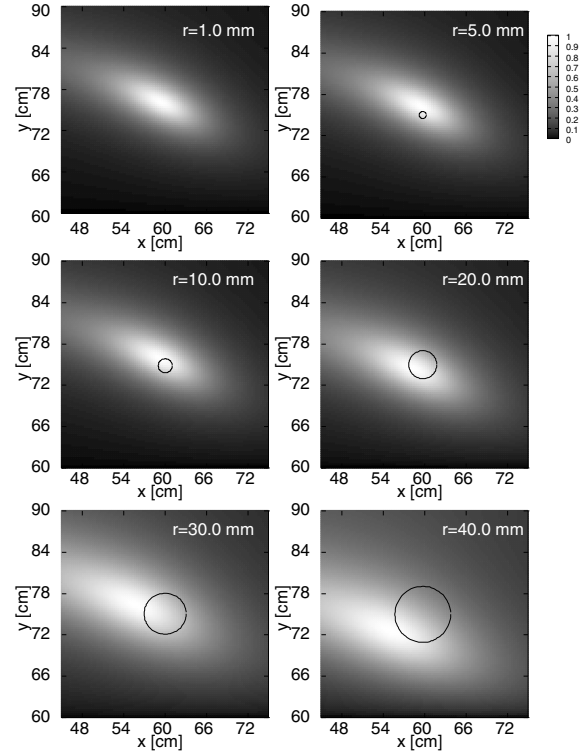


図 7 異なる半径の完全導体円筒を目標とした場合の周波数領域 DORT の右特異ベクトルからの推定像

次に、推定像の明瞭さを Muller and Buffington's sharpness metric (MB sharpness) [7] により評価する。 p 次の MB sharpness metric の値 h_p は次式で表される。

$$h_p = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_m^p \quad (15)$$

ここで I_m は画像のピクセルを並べたベクトルであり、最大ピクセル値が 1 となるように正規化された値である。また M は画像に含まれるピクセル数である。 p は統計量の次数を表し、2 次を超える高次の統計量を選択することにより画像の明瞭さの指標が計算される。ここで、この値が小さいほど画像が明瞭であることを表す。ここでは $p = 4$ とし、各手法により生成される像の明瞭さを評価する。図 10 に推定像の 4 次の sharpness metric を示す。同図より、周波数領域 DORT は小さい r に対して高い明瞭さを有し、特に $r \leq 10.0$ mm においては特に明瞭度が高い。また、 $r \leq 70.0$ mm においてはマイグレーション法よりも明瞭度が高く、逆に $r > 70.0$ mm においてはマイグレーション法の明瞭度の方が高い。マイグレーション法はほとんど r には依存せずに一定の明瞭度を示している。

7. ま と め

本稿では時間逆転法的一种である周波数領域 DORT 法によ

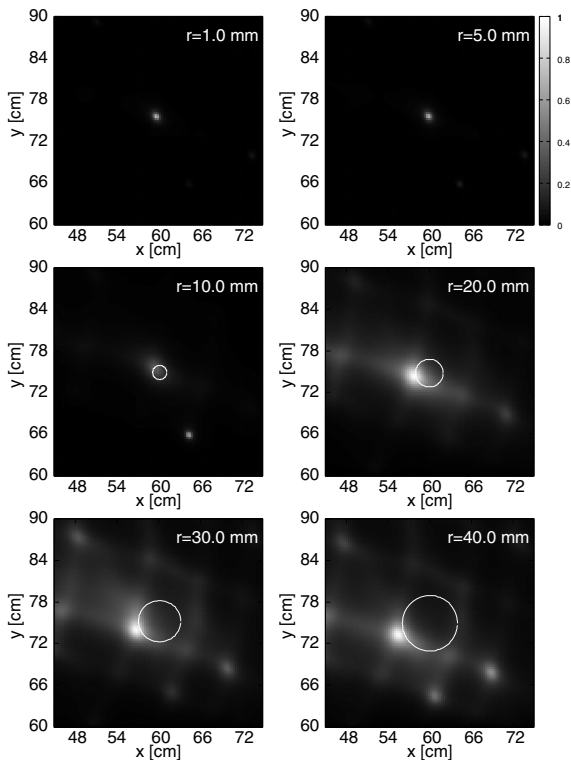


図 8 異なる半径の完全導体円筒を目標とした場合の周波数領域 DORT の推定像

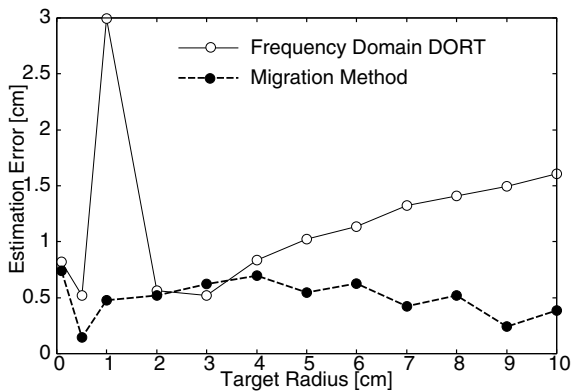


図 9 マイグレーション法と周波数領域 DORT 法の目標位置推定精度

るイメージング性能を様々な大きさの目標に対し調べ、評価を行った。周波数領域 DORT 法は、従来の DORT 法を拡張し、単一目標のみで構成される UWB レーダシステムに適用可能な高分解能手法である。この手法は点状目標による電波散乱を想定し、周波数領域で得られる測定行列の特異値分解を行い、部分空間どうしの直交性を利用して画像化を行うものである。これまでにこの点状目標というモデルに合致しな

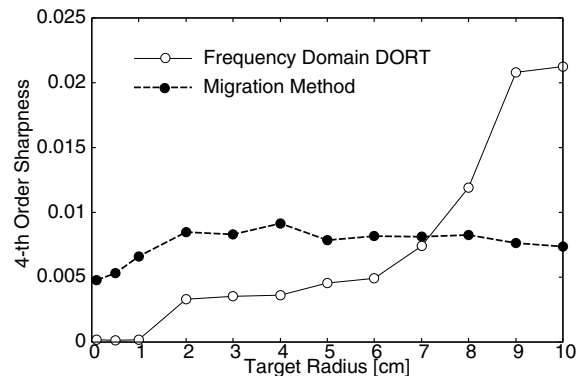


図 10 マイグレーション法と周波数領域 DORT 法の 4 次の MB sharpness metric

い場合のイメージング性能は報告されていない。本稿では FDTD 法により円筒の半径を 1mm から 100mm まで変化させ、時間逆転法および周波数 DORT の画像を生成した。生成された画像から分解能や精度を求め、性能を定量評価した。

文 献

- [1] A. J. Devaney, "Time reversal imaging of obscured targets from multistatic data," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. 53, no. 5, May 2005.
- [2] D. M. Fromm, C. F. Gaumond, J. F. Lingeitch, R. Menis, D. C. Calvo, G. F. Edelmann, E. Kim, "The effect of coherence and noise on the decomposition of the time reversal operator," Proc. MTS/IEEE OCEANS, pp. 1210–1215, 2005.
- [3] P. Simko, J. Saniie, "Computational time reversal ultrasonic array imaging of multipoint targets," Proc. IEEE ultrasonic symposium, pp. 1208–1212, 2007.
- [4] M. E. Yavuz and F. L. Teixeira, "Space-frequency ultrawideband time-reversal imaging," IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, no. 4, Apr. 2008.
- [5] T. Sakamoto and T. Sato, "Time-reversal UWB imaging with a single antenna in multi-path environments," 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 2177–2181, 2009.
- [6] M. E. Yavuz, F. L. Teixeira, "On the sensitivity of time-reversal imaging techniques to model perturbations," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, pp. 834–843, 2008.
- [7] R. A. Muller and A. Buffington, "Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening," J. Optical Society of America, vol. 64, no. 9, pp. 1200–1210, 1974.