

UWB レーダのための多重散乱波開口合成に基づく 影領域イメージング

木寺 正平[†] 阪本 卓也[†] 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学大学院 情報学研究科
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町
E-mail: †kidera@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし UWB(超広帯域) レーダは高い距離分解能を有し、各種工業製品の非接触精密計測、救助用ロボット及びセキュリティシステム等の近距離空間計測に適する。地表面計測等で利用される合成開口レーダは精度・安定性に優れ、近距離画像化技術としても有用である。一方、多数の凹凸面を有する複雑目標または複数目標の場合、同手法では影領域の増大及び多重散乱波による虚像が問題となる。一般に多重散乱波は単散乱波と異なる位相停留経路を通過し、単散乱データとは独立な目標境界の位置情報を保有する。本稿では二重散乱データを合成開口処理に適用することで、直接的な影領域画像化手法を提案する。提案手法は周囲環境の先見情報を必要とせず、且つ従来の画像化範囲を飛躍的に拡大することを数値計算により示す。

キーワード UWB レーダ, 多重散乱波, 合成開口レーダ, 影領域画像化, 複雑・複数目標

Shadow Region Imaging Algorithm Based on Aperture Synthesis of Multiple Scattering Waves for UWB Radars

Shouhei KIDERA[†], Takuya SAKAMOTO[†], and Toru SATO[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University
Yoshida Honmachi, Sakyou-ku, Kyoto, 606-8501, Japan
E-mail: †kidera@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract Ultra-wide band (UWB) pulse radars have an immeasurable potential for a high-range resolution imaging in the near field and are applicable to an accurate spatial measurement for rescue robots or security systems. SAR (Synthetic Aperture Radar) algorithm can create an accurate and stable target image in the near field. However, in the case of complex or multiple targets, this algorithm suffers from an increased shadow region or a false image caused by multiple scattering data. In general, a stationary phase path of a multiple scattering wave is different from that of a single scattering one, then multiple scattering data includes an independent information of target surfaces. This paper proposes the shadow region imaging algorithm based on the aperture synthesis for multiple scattering data. The performance evaluations in numerical simulation reveal that the proposed method remarkably enlarges a visible range of target surfaces without a priori information of surrounding environment.

Key words UWB radars, Multiple scattering wave, SAR, Shadow region imaging, Complex or multiple targets

1. はじめに

UWB パルスレーダは数 cm から数 mm 程度の高い距離分解能を有し、救助用ロボット・セキュリティシステム等に要求される不可視状況下の室内計測、アンテナ鏡面・航空機体等の非接触精密計測に適する。上記用途のために実時間処理と高解像度画像化を実現する画像化アルゴリズムが複数提案されてお

り [1] ~ [6], その有効性が実証されている [3], [5] しかし、何れの手法も単散乱データのみを画像化に利用するため、複雑境界目標及び多数の目標が存在する場合では、多重散乱波に起因する虚像が問題となる。また目標形状及び配置状況によっては、影領域の増大に伴う目標再現領域の狭小により、形状推定が著しく困難となる。一方、多重散乱波は単散乱波と異なる位相停留経路を通過するため、目標の散乱中心位置に関する独立な情

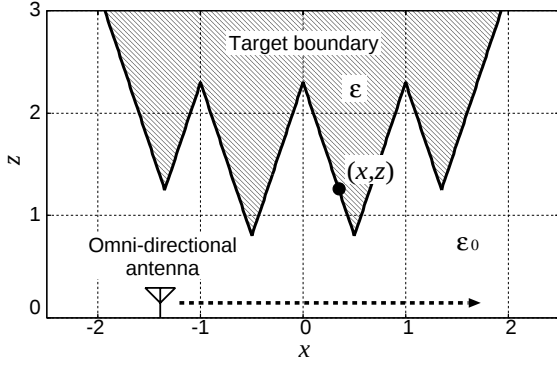


図1 システムモデル
Fig.1 System model.

報を保有している．現在までに多重散乱データを用いた目標位置推定手法が複数提案されている [7]～[9]．Moura らは多重散乱波を用いた時間逆伝搬法に基づき，多干渉状況における目標検出確率を高めることを実証したが，同方法は目標位置検出を考慮しない [8]．また同原理を利用した単一素子での高精度目標位置推定法が提案されているが，目標以外の周囲環境が既知であることを仮定し，また形状も点目標に制限される [9]．

地表面計測等で有用である合成開口法 [10] は，近距離画像化においても高い安定性と精度を保持する．本稿では，合成開口法の原理を二重散乱データに拡張し，直接的な影領域画像化手法を提案する．提案手法は周囲環境に関する先情報が必要であり，一般の複雑形状・複数目標に対して画像化再現領域を拡大させる．本稿では複数目標及び複雑目標境界の二例を用いて，提案手法の有効性を数値計算により示す，

2. システムモデル

図1にシステムモデルを示す．2次元問題・TM波を仮定する．明瞭な境界を有する任意形状目標を仮定する．無指向性送受信素子を x 軸上で走査する．伝搬速度は既知かつ一定とする．送信電流はモノサイクルパルスとし，その中心波長 λ で空間を正規化する．素子及び目標物体が存在する空間を $r = (x, z)$ で表わす．目標は $z > 0$ に存在すると仮定する．素子位置をそれぞれ $r = (X, 0)$ とし， $s'(X, Z')$ を受信電界とする．但し $Z' = ct/2\lambda$ ， t は時間， c は光速である． $s(X, Z')$ を Wiener フィルタの出力波形とする．

3. 従来手法

3.1 近傍界合成開口レーダ

合成開口レーダ [10] は近傍界計測においても，安定性・精度等において優れた性能を保持する．同手法は，アンテナ位置を中心，伝搬距離を半径とする同心円上に各受信信号強度を空間積分することで近距離目標画像を得る．同画像 $I_1(r)$ は次式で与えられる．

$$I_1(r) = \int_{X \in \Gamma} s \left(X, \sqrt{(x-X)^2 + z^2} \right) dX \quad (1)$$

但し， Γ は素子走査領域である．目標境界は $I_1(r)$ の強度が卓越する部分より抽出可能である．同手法を従来手法と呼び，以

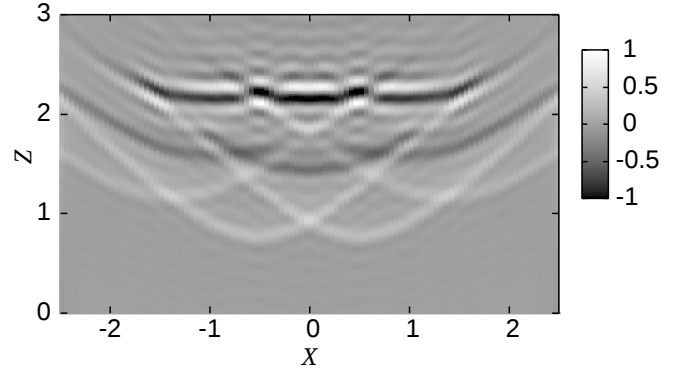


図2 複雑目標における Wiener フィルタ出力波形
Fig.2 Output of Wiener filter from the complex target.

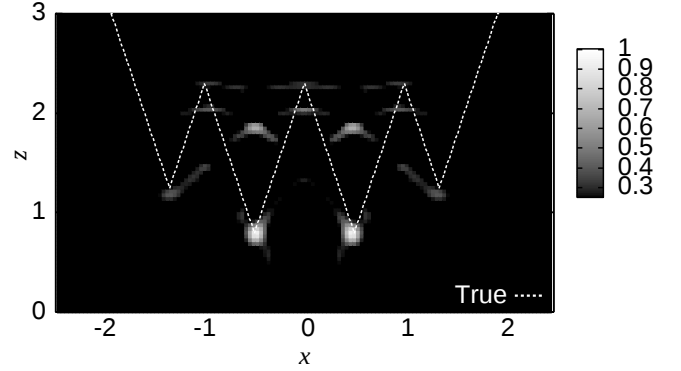


図3 従来手法による合成処理画像 $I_1(r)$ (複雑目標)
Fig.3 Estimated image with the conventional method for the complex target.

下にその特性を示す．

図1の目標を仮定する．但し，目標内部の比誘電率は1.0，導電率は 1.0×10^6 S/m である．図2に同目標における Wiener フィルタ受信出力 $s(X, Z')$ を示す．但し，素子走査域は $-2.5 \leq X \leq 2.5$ であり，等間隔で101点の受信データを用いる．同図において，前方では単散乱に起因する同位相信号，後方では二重散乱に起因する逆位相信号が確認できる．図3に従来手法による推定画像を示す．但し，同画像はその最大強度で正規化している．同図より，従来手法では目標の先端部分のみが強調され，形状推定に有意な画像を得ることができない．これは，目標側面勾配が急峻であるため，同側面からの卓越した散乱波が得られないことに起因する．また目標後方には，多重散乱波に起因する虚像が確認される．次に複数目標における特性評価を示す．図4に二円と長方形形状を有する複数目標からの Wiener フィルタ受信出力を示す．図5に従来法による推定画像を示す．同図より，二円及び長方形境界の下部領域のみが画像化され，特に長方形形状に関する有意な画像が得られない．これは前例と同じく，各素子で長方形側面からの直接散乱が受信されないことに起因する．

3.2 単散乱波による境界再現解析

前節での問題を数値的に評価するため，本節では単散乱に基づく目標再現範囲を解析的に導出する．再構成可能な目標境界領域は，素子走査領域により制限される．これは，各目標境界

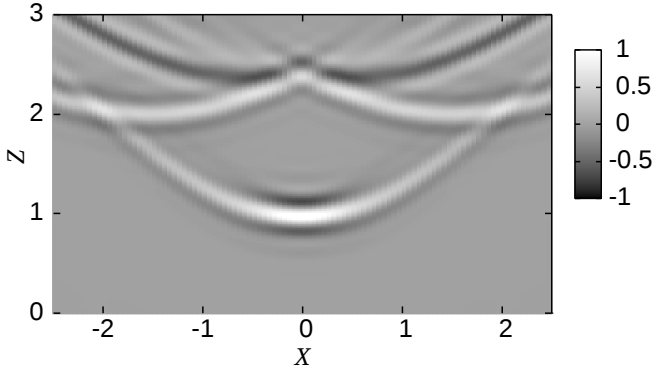


図 4 複数目標における Wiener フィルタ出力波形

Fig. 4 Output of Wiener filter from the multiple targets.

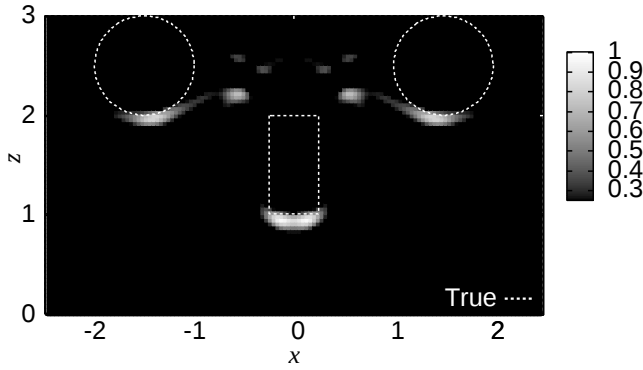


図 5 従来手法による合成処理画像 $I_1(r)$ (複数目標)

Fig. 5 Estimated image with the conventional method for the multiple targets.

からの散乱波が位相停留経路を満たす方向へ強く散乱されるという条件に基づく．特に単散乱波の場合，各素子では目標境界と直交する方向から卓越した散乱波を受信する．同問題の解析には目標境界と距離曲線間の可逆関係を示す境界散乱変換 (BST) が有用である [1]．しかし同変換は，複数または複雑目標の配置によって遮断される散乱経路を考慮しない．同種目標が存在する場合，位相停留経路が遮断され，影領域が増大する．図 6 に複数・複雑目標が存在する場合の，経路遮断と可視・不可視境界点の例を示す．以下では，同遮断条件を考慮し，単散乱波による境界再現範囲を導出する．ここで，複数の目標内部領域を $(x, z) \in T_i$ と定義する．単散乱によって再現される目標境界点を p_s とする．前述の位相停留条件により p_s は次式を満たす．

$$p_s = \{(x, z) \mid X \in \Gamma, \partial d_1(X, x, z)/\partial x = 0\} \quad (2)$$

ここで $d_1(X, x, z) = \sqrt{(x - X)^2 + z^2}$ であり，更に目標内部による経路遮断条件を考慮し， p_s は以下の条件を満たす．

$$sp_s + (1 - s)p_X \notin \bigcup_{i=1}^N T_i \quad (3)$$

但し， $p_X = (X, 0)$ ， N は目標の総数， s は $0 \leq s \leq 1$ での任意変数である．図 7，8 に複雑及び複数目標における単散乱波での境界再現領域を示す．図 7 から，単散乱データを用いる場

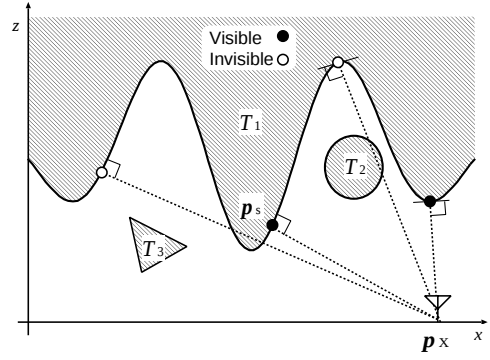


図 6 複雑・複数目標における可視・不可視境界点 (単散乱波)

Fig. 6 Visible and invisible points for complex and multiple targets with single scattered wave.

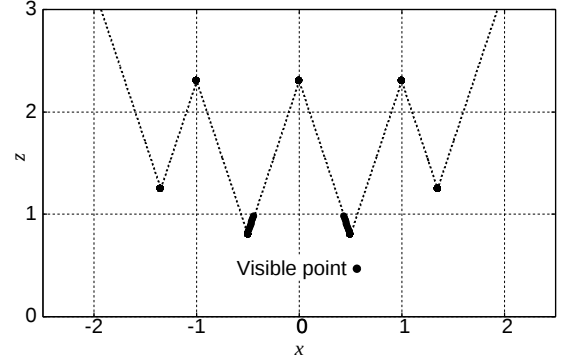


図 7 単散乱波による複雑目標再現領域

Fig. 7 Visible image for complex target with single scattered wave.

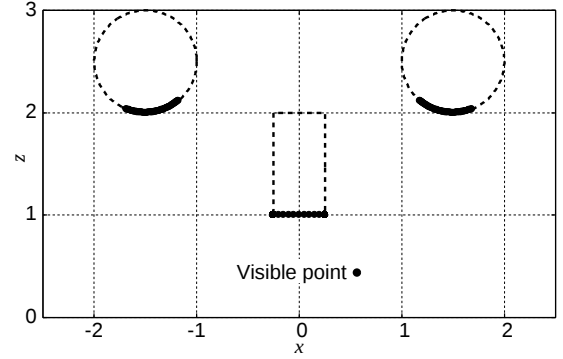


図 8 単散乱波による複数目標再現領域

Fig. 8 Visible image for multiple targets with single scattered wave.

合は，凹凸面の先端部分のみが再現可能であり，他は全て影領域となることわかる．これは，同側面部分において，直交条件及び散乱経路の非遮断条件を同時に満たす境界点 p_s が極めて少ないためである．また図 8 においては，同様の理由により，長方形目標の側面が再現不可能であることがわかる．

4. 提案手法

4.1 二重散乱波による境界再現解析

本節では多重散乱波を用いた画像化の有効性を示すため，二重散乱による境界再現領域を解析する．二重散乱波が通過する目標境界上の二つの散乱中心位置を p_s, p_d と定義する．図 9

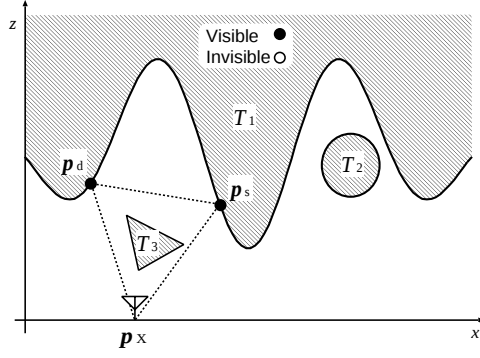


図 9 複雑・複数目標における可視・不可視境界点 (二重散乱波)

Fig. 9 Visible and invisible points for complex and multiple targets with double scattered wave.

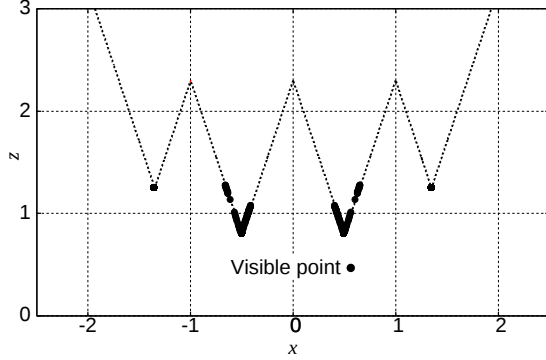


図 10 二重散乱波による複雑目標再現領域

Fig. 10 Visible image for complex target with double scattered wave.

に二重散乱経路における可視目標点对 (p_s, p_d) を例示する．位相停留条件により同点对は次式を満たす．

$$(p_s, p_d) = \left\{ (x, z, x', z') \left| \begin{array}{l} X \in \Gamma, \\ \frac{\partial d_2(X, x, z, x', z')}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial d_2(X, x, z, x', z')}{\partial x'} = 0 \end{array} \right. \right\} \quad (4)$$

但し， $d_2(X, x, z, x', z')$ は p_s, p_d, p_X を頂点とする三角形周囲距離である．また散乱経路の非遮断条件は以下となる．

$$\left. \begin{array}{l} sp_s + (1-s)p_X \\ sp_X + (1-s)p_d \\ sp_d + (1-s)p_s \end{array} \right\} \notin \bigcup_{i=1}^N T_i \quad (5)$$

s は $0 \leq s \leq 1$ での任意変数である．図 10 に複雑目標における二重散乱経路を考慮する境界再現領域を示す．同図より，二重散乱波による散乱点对を考慮することで目標側面における再現領域の増大が可能であることがわかる．同領域では，三角側面と先端エッジ上を通過する散乱経路が，二重散乱における位相停留となる．また図 11 に複数目標における境界再現領域を示す．同図から，長方形目標の側面を通過する経路が多数存在し，各素子では同側面からの受信信号が卓越すると予測される．

4.2 画像化アルゴリズム

前節の解析に基づき，本節では二重散乱波を用いた影領域画像化法を提案する．本手法では，従来法による推定画像 $I_1(r)$ を初期画像とし，二重散乱波を用いた合成開口処理を次式で定義する．

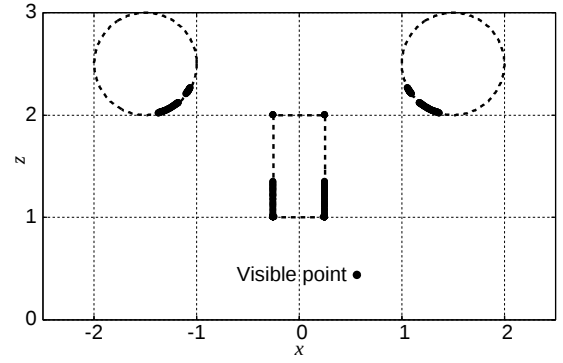


図 11 二重散乱波による複数目標再現領域

Fig. 11 Visible image for multiple targets with double scattered wave.

$$I_2(r) = - \int_{r' \in R} \int_{X \in \Gamma} I_1(r') s(X, d_2(X, r, r')/2) dX dx' dz' \quad (6)$$

但し， $r' = (x', z')$ ， R は空間探索領域である．同式右辺の負符号は，二重散乱波の単散乱に対する位相逆転に基づく．更に $I_1(r)$ 及び $I_2(r)$ の各画像においては，正值領域が有意な目標境界を表現するため，提案手法による推定画像 $I(r)$ を以下で定義する．

$$I(r) = \sum_{i=1}^2 I_i(r) H(I_i(r)) \quad (7)$$

但し $H(x)$ は，ヘビサイド関数である．同手法は，画像化において単散乱画像 $I_1(r)$ のみを用いており，目標の先見情報なしに任意の目標境界を再現する．

5. 数値計算による特性評価

図 12, 13 に図 2 の受信データを用いた場合の二重散乱データによる合成画像 $I_2(r)$ 及び提案手法による合成画像 $I(r)$ を示す．但し，両画像ともに最大強度で正規化している．図 12 より，二重散乱波の合成処理を用いることで，目標の側面が再現されることが確認できる．これは，同側面での二重散乱における散乱点对の一方が，目標先端部分に存在し，初期画像において同領域近傍が強調されていることに起因する．また図 13 の合成画像 $I(r)$ では，境界先端部分及び側面が強調され，従来手法と比較して，形状推定に有意な推定画像が得られている．また図 14, 15 に図 4 の受信データを用いた場合の $I_2(r)$ 及び $I(r)$ を示す．図 14 より従来では影領域となる長方形境界側面部分も画像化可能であることがわかる．これは，長方形側面を通過する多数の二重散乱データが，提案手法により合成処理されるためである．また図 15 では，円及び長方形の両方ともに従来の画像化範囲を拡大されることがわかる．同手法は，周囲環境に関する先見情報及びかつ目標形状のモデル化が不要であり，同特性評価は従来技術に対する優位性を例証する．

次に白色雑音環境下での特性評価を行う．図 16, 17 は，それぞれ複数目標，複雑目標における白色雑音環境下での提案手法による合成画像を示す．両例とも平均 SN 比は約 20dB である．同図より，雑音データ合成に起因する画像劣化により，相

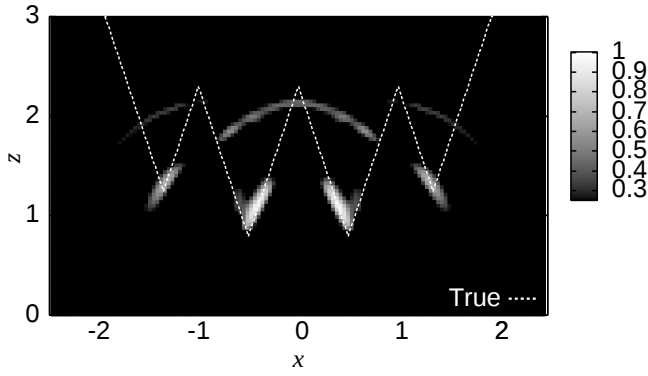


図 12 二重散乱波を用いた推定画像 $I_2(\mathbf{r})$ (複雑目標)

Fig.12 Estimated image with double scattered waves for the complex target.

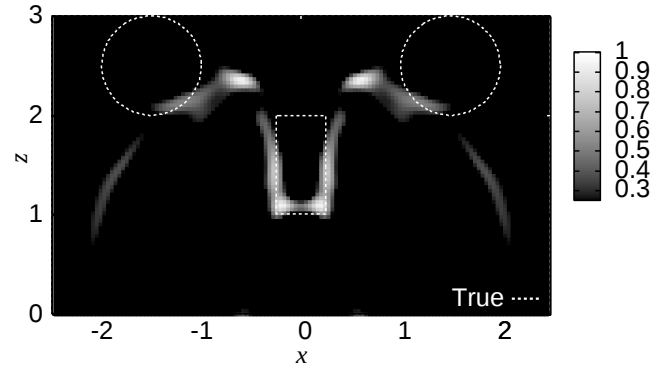


図 14 二重散乱波を用いた推定画像 $I_2(\mathbf{r})$ (複数目標)

Fig.14 Estimated image with double scattered waves for the multiple targets.

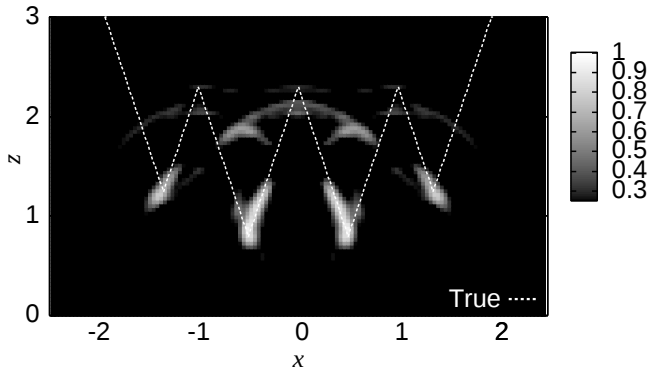


図 13 提案手法による推定画像 $I(\mathbf{r})$ (複雑目標)

Fig.13 Estimated image with the proposed method for the complex target.

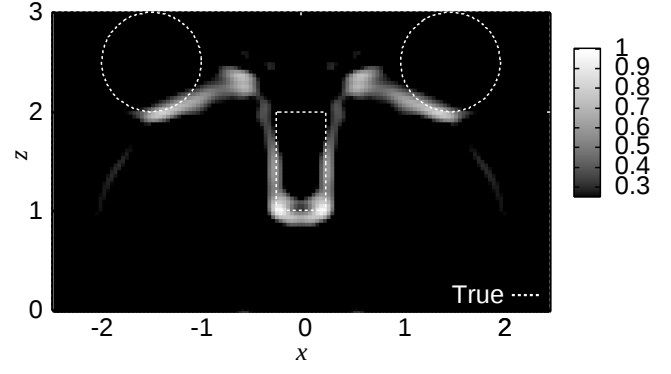


図 15 提案手法による推定画像 $I(\mathbf{r})$ (複数目標)

Fig.15 Estimated image with the proposed method for the multiple targets.

対的に目標境界上の強度が抑圧されるものの、境界再現範囲等において、ほぼ同性能を保持することがわかる。

しかし、提案手法においては散乱中心の二点対の何れかの近傍が、初期画像 $I_1(\mathbf{r})$ により再現されることを仮定する。従って、初期画像でどちらの散乱点対も不可視である場合、同手法は有意な影領域を抽出することが困難となり、同点が提案手法の問題点となる。また本手法はデータ合成において三重積分を行うため、Xeon 2.8 GHz プロセッサを用いた場合、処理時間約 30 分を要する。今後、3 次元化のために同計算量の軽減が課題となる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 A(課題番号 17206044) 及び科学研究費補助金 特別研究員奨励費(課題番号 19-497) による。

6. む す び

本稿では、二重散乱波の合成開口処理に基づく影領域画像化手法を提案した。単散乱及び二重散乱波による画像再現領域を解析的に導出し、多重散乱データを用いることで、目標再現領域の拡大が可能であることを示した。同解析に基づき、二重散乱波を合成開口処理に利用する手法を提案し、従来の画像では

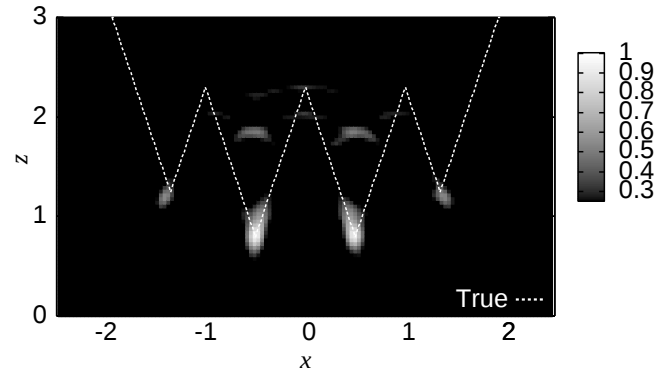


図 16 提案手法による推定画像 $I(\mathbf{r})$ (複雑目標), SN 比=20dB.

Fig.16 Estimated image with the proposed method for the complex target in noisy case at S/N=20 dB.

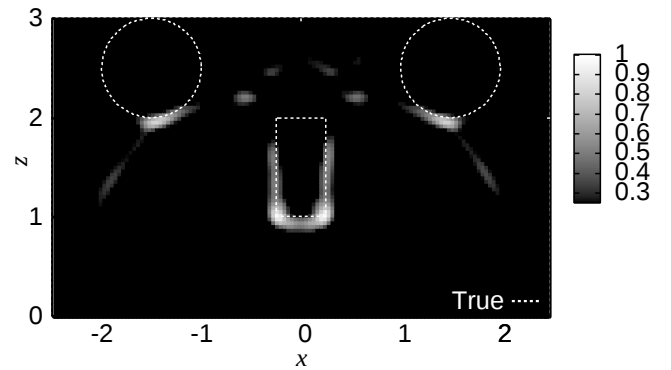


図 17 提案手法による推定画像 $I(\mathbf{r})$ (複数目標), SN 比=20dB.

Fig.17 Estimated image with the proposed method for the multiple targets in noisy case at S/N=20 dB.

影領域となる部分を再現させることを数値計算により示した．また同手法は白色雑音環境下において，約 20dB 程度であれば，画像処理性能を保持することを示した．今後は，同手法の 3 次元化における高解像度及び高速化が重要な課題となる．

文 献

- [1] T. Sakamoto and T. Sato, “A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, no.5, pp. 1357–1365, 2004.
- [2] T. Sakamoto, “A fast algorithm for 3-dimensional imaging with UWB pulse radar systems,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.3, pp. 636–644, 2007.
- [3] 阪本 卓也, 木寺 正平, 佐藤 亨, 杉野 聡, “UWB パルスレーダによる高速立体形状推定法の実験的検討,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J90-B, no.1, pp. 2311–2325, 2007.
- [4] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, “A Robust and Fast Imaging Algorithm with an Envelope of Circles for UWB Pulse Radars,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.7, pp. 1801–1809, July, 2007.
- [5] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, “High-Resolution and Real-time UWB Radar Imaging Algorithm with Direct Waveform Compensations,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, pp. 3503–3513, no. 11, Nov, 2008.
- [6] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, “High-Speed UWB Radar Imaging Algorithm for Complex Target Boundary without Wavefront Connection,” *Proc. of the XXIX General Assembly of URSI*, BP17.2, July, 2008.
- [7] S. K. Lehmanm and A. J. Devaney, “Transmission mode time-reversal super-resolution imaging,” *Acoust. Soc. Am.*, 113 (5), May, 2003.
- [8] J. M. F. Moura, and Y. Jin, “Detection by Time Reversal: Single Antenna,” *IEEE Trans. on Signal Process.*, vol. 55, no. 1, pp. 187–201, Jan, 2007.
- [9] 北村 亮之, 阪本卓也, 佐藤 亨, “多重散乱波を利用した単一素子による UWB レーダイメージング” 電子情報通信学会 総合大会, C-1-9, Mar, 2008.
- [10] D. L. Mensa, G. Heidbreder and G. Wade, “Aperture Synthesis by Object Rotation in Coherent Imaging,” *IEEE Trans. Nuclear Science.*, vol. 27, no. 2, pp. 989–998, Apr, 1980.