

参照波形最適化に基づく拡張 Capon 法を用いた 高分解能 UWB レーダイメージング法の実験的検討

木寺 正平[†] 阪本 卓也^{††} 佐藤 亨^{††}

[†] 電気通信大学 電子工学科, 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

^{††} 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@ee.uec.ac.jp

あらまし UWB(Ultra Wideband) レーダは高い距離分解能を有し, アンテナ鏡面等の非接触精密計測及び劣悪な光環境下におけるロボット, セキュリティ等の各種センサに適する. 上記用途に適するレーダ画像化法として, RPM(Range Points Migration) 法を提案している. 同手法は, 観測距離点群の分布特性を用いた到来角度推定に基づき, 複雑な距離点分布を与える凹凸境界及び複数目標に対して有用である. しかし, 波長より小規模の凹凸変化または, エッジ等を有する目標境界では, 多数の干渉波及び散乱波形歪みに起因する距離抽出誤差により, 画像精度が劣化する. 本稿では, 周波数干渉計に基づく Capon 法に参照波形最適化を導入し, 高分解能かつ高精度な距離点抽出法を提案する. 数値計算及び実験データにより, 提案手法が波長限界を越える画像分解能と精度を保持することを示す.

キーワード UWB レーダ, 周波数干渉計, Capon 法, 参照波形最適化, 超波長分解能,

Experimental Study on Super-Resolution UWB Radar Imaging Algorithm Based on Extended Capon with Reference Signal Optimization

Shouhei KIDERA[†], Takuya SAKAMOTO^{††}, and Toru SATO^{††}

[†] Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

^{††} Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto, Japan

E-mail: †kidera@ee.uec.ac.jp

Abstract Near field radar employing UWB signals with its high range resolution is used for various sensing applications, such as a robotic or security sensor applicable even in a blurry vision. As one of the most promising radar algorithms, the RPM (Range Points Migration) has been proposed, which achieves fast and accurate surface extraction, even for complex-shaped objects by avoiding the difficulty of connecting range points. However, in the case of a more complex target with convex and concave edges on its surface, it still suffers from an image distortion caused by multiple interference signals, including a scattered waveform deformation. As a substantial solution, this paper proposes a novel range extraction algorithm by extending the Capon method. This algorithm combines a reference signal optimization with the original Capon to enhance a range accuracy or resolution, into which a deformed waveform model is introduced. The results obtained from numerical simulations and experiment exemplifies that super-resolution UWB radar imaging is possible, even for an extremely complex-shaped target, including edges.

Key words UWB radars, Frequency domain interferometry, Capon method, Reference signal optimization, Super-resolution imaging beyond wavelength

1. はじめに

超広帯域 (Ultra-wide band: UWB) 信号を用いたレーダシステムは, 3 次元レーザ計測等を越える距離分解能を有し, 航空

機体や鏡面アンテナ等の非接触精密計測に有用である. また災害現場等の粉塵, 暗闇などの劣悪な計測環境下でも適用可能であり, 救助用及び資源探査ロボットセンサ等への応用が有望である. 上記用途に適するレーダ画像化手法が各種提案されてい

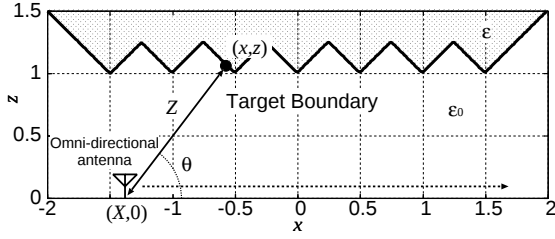


図 1 システムモデル

Fig. 1 System model.

る [1] ~ [6], [7] ~ [6], [8] . 特に RPM(Range Points Migration) は, 複雑, 複数目標に対する高速, 高精度画像化手法として有用である [7], [8] . 同手法は, 観測距離点群の分布特性と強度から, 直接的に高精度な到来角度を推定するため, 複雑な距離点分布を与える凹凸境界, 複数目標に対しても画像化精度を保持する .

しかし同手法では, 波長より小さい規模での凹凸境界面及びエッジ領域を有する境界に対して, 画像精度が劣化する . これは, 同一レンジゲート内での複数干渉波及び散乱波形変化に起因する距離抽出誤差が顕著となるためである . 高分解能干渉波分離法として, 周波数干渉計に基づく MUSIC 法, Capon 法等が有用である . 特に Capon 法は, 到来波数推定が不要であり, 受信強度情報を保持するため, RPM 法に適する [9], [10] . 一方, 従来の Capon 法では参照波形を送信波形に固定するため, エッジ回折等の散乱波形変化に起因する距離分解能と精度劣化が存在する . これに対し, 本稿では参照波形最適化を導入した拡張 Capon 法を提案する . 本手法では, 参照波形モデルとして送信波形の部分微分を導入する . 同モデルに基づく Capon 法出力の最適化アルゴリズムを導出し, 散乱波形変化に適する高分解能距離点抽出法を提案する . 数値計算及び UWB 送受信モジュールを用いた実験により本手法の性能評価を与える .

2. 2次元問題

2.1 システムモデル

図 1 にシステムモデルを示す . 明瞭な境界を有する任意形状の金属目標を仮定する . 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 . TE 波を仮定する . 素子及び目標物体が存在する空間を (x, z) で表わし, $z > 0$ と仮定する . 素子位置をそれぞれ $(X, 0)$ 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 .

2.2 RPM 法

複雑目標に適する画像化手法として, RPM 法を提案している [7] . 本手法は観測距離点群の連結操作が不要であり, 複雑な点群分布を与える凹凸境界面及び複数目標に対して有用である . 目標境界上の散乱点が, 素子位置 $(X, 0)$ を中心, 観測距離 Z を半径とする円にあると仮定し, その到来角度 θ_{opt} を次式で求める .

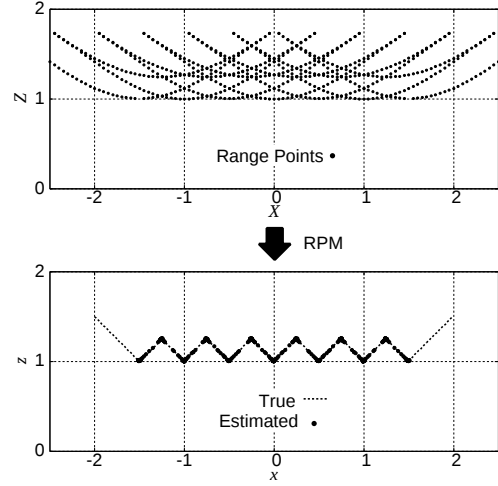


図 2 真の距離点群 (上図) に対する RPM 法の適用例 (下図)

Fig. 2 True range points (upper) and extracted target points with RPM (lower).

$$\theta_{\text{opt}}(\mathbf{q}) = \arg \max_{\theta} \left| \sum_{i=1}^{N_q} s(\mathbf{q}_i) e^{-\left\{ \frac{(X - X_i)^2}{2\sigma_X^2} + \frac{(\theta - \theta(\mathbf{q}, \mathbf{q}_i))^2}{2\sigma_{\theta}^2} \right\}} \right| \quad (1)$$

但し, $\mathbf{q} = (X, Z)$, $\mathbf{q}_i = (X_i, Z_i)$, N_q は距離点群総数, $\theta(\mathbf{q}, \mathbf{q}_i)$ は, (X, Z) 及び (X_i, Z_i) で決定される 2 円の交点と, x 軸のなす角度である . 図 1 に目標境界点 (x, z) と到来角度 θ の関係を示す . また σ_{θ} 及び σ_X は定数であり, 経験的に決定する . $x = X + Z \cos \theta_{\text{opt}}(\mathbf{q})$, $z = Z \sin \theta_{\text{opt}}(\mathbf{q})$ として各距離点 (X, Z) に対応する目標境界点 (x, z) を決定する .

本手法は, 距離点群の連結手順を回避することで, 直接的に目標境界点群への写像を実現し, 複雑境界に対しても, 高精度な目標境界点抽出を実現する . 図 2 に, 真の距離点群 (上図) 及び同距離点群に対する RPM 法の適用例 (下図) を示す . 但し, $\sigma_X = 0.1\lambda$, $\sigma_{\theta} = \pi/50$ とする . 図 2 上に示す距離点群では, 各素子で複数の到来距離が観測される . このため, 距離点群の連結に基づく SEABED 法 [2], [3] 及び Envelope 法 [4], [5] では, 目標境界推定が困難となる場合が多い . 一方 RPM 法では, 図 2 下に示す通り, 距離点群の連結手順を回避するため, 直接的かつ高精度な目標境界点群抽出を実現する .

次に, FDTD(Finite Difference Time Domain) 法で計算される受信信号を用いた場合の RPM 法の適用例を示す . 素子は $-2.5\lambda \leq x \leq 2.5\lambda$ で走査し, 同サンプル数を 101 とする . 従来の距離抽出法では $s'(X, Z)$ に Wiener フィルタを適用し, 出力の設定閾値を越える極大値から距離点群 (X, Z) を抽出する . 図 3 に, 図 1 の目標境界での受信信号に対する Wiener フィルタ出力及びその抽出距離点群を示す . 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 4 に図 3 で抽出される距離点群に対する RPM 法の適用例を示す . 同図より, 特に目標凹凸側面の再現が困難であることが確認できる . これは, 同一レンジゲート内の複数散乱波の干渉または散乱波形歪みに起因する距離抽出精度及び分解能の劣化のためである . 散乱波

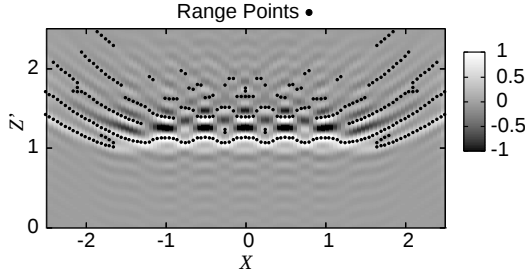


図 3 Wiener フィルタ出力と抽出距離点群

Fig. 3 Output of Wiener filter and extracted range points.

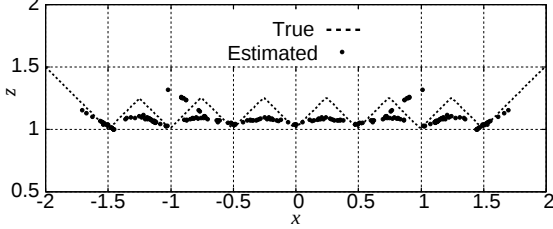


図 4 RPM 法による目標境界点群 (Wiener フィルタ適用)

Fig. 4 Estimated target points with RPM in using Wiener filter.

形の中心周期推定に基づく高精度距離補正法 (SOC) を提案しているが [5], 散乱波の時間分離を要するため, 近接時間内で複数散乱波が干渉する場合に適用困難である.

2.3 拡張 Capon 法による距離抽出

前説の問題を解決するため, 参照波形最適化に基づく拡張 Capon 法による距離点抽出法を提案する. 複数干渉波の高分解能到来距離推定として, 周波数干渉計に基づく Capon 法が有用である [9], [10]. Capon 法はその出力が強度情報を保有し, かつ到来波数推定が不要なため, 特に RPM 法に有用である. しかし, 従来の Capon 法では, 散乱波形が送信波形と同一であるという仮定に基づくため, 波形変化に起因する精度及び分解能の劣化が存在する. 本稿では, Capon 法に参照波形の最適化を導入するため, 次式の通り, 同波形を送信波形の部分微分で近似する.

$$S_{\text{ref}}(\omega, \alpha) = (j\omega)^\alpha S_{\text{tr}}(\omega)^* \quad (2)$$

但し, $S_{\text{tr}}(\omega)$ は周波数領域の送信波形, $*$ は複素共役を示す. α は, $|\alpha| \leq 1$ を満たす変数である. 以下に同モデルの波形整合例を示す. 図 5 は, 同図の台形形状目標における各素子位置の散乱波形及び α で最適化される参照波形を示す. 散乱波形は, 散乱中心近傍の局所的な形状に依存する [11], [12]. 同図に示す通り, 式 (2) の α を調節することでほぼ正確に散乱波形を再現することが可能である. 波形整合における到来距離誤差は約 0.01λ 以内である.

上記の参照波形モデルを用いた拡張 Capon 法を示す. 各到来波は相関性干渉波であるため, 周波数平均を導入する. 各 α に対する, 周波数領域での部分観測ベクトル $V_n(\alpha, X)$ を次式で定義する.

$$V_n(\alpha, L) = \left[\frac{S(\omega_n, L)}{S_{\text{ref}}(\omega_n, \alpha)}, \dots, \frac{S(\omega_{n+M-1}, L)}{S_{\text{ref}}(\omega_{n+M-1}, \alpha)} \right]^T \quad (3)$$

但し, $S(\omega, L)$ は素子位置 $L = (X, 0)$ における周波数領域の受

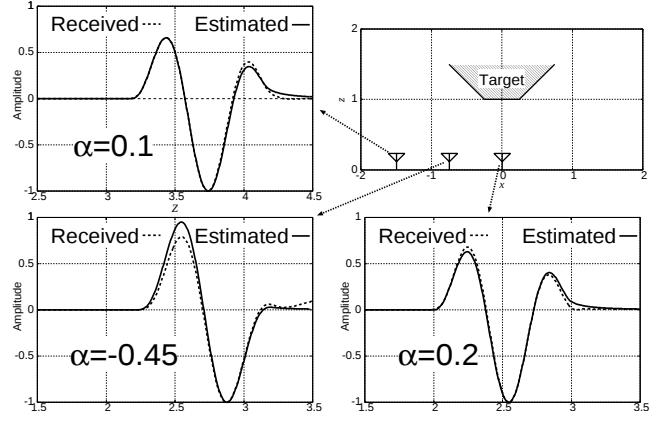


図 5 台形目標における散乱波形と参照波形比較

Fig. 5 Waveform comparison for each antenna location in polygonal target.

信信号, 相互相関行列 $R(\alpha, L)$ を, 次式で定義する.

$$R(\alpha, L) = \sum_{n=1}^{N-M+1} z_n V_n(\alpha, L) V_n^H(\alpha, L), \quad (4)$$

H は共役転置, N は観測可能な周波数点の総数, M は部分周波数観測ベクトルの次元であり, $M \leq N$ を満たす. 簡単のため, $z_n = 1/(N - M + 1)$ とする. 拡張 Capon 法出力 $s_{\text{cp}}(L, Z, \alpha)$ を次式で定義する.

$$s_{\text{cp}}(\alpha, Z', L) = \frac{S_0^{-1}}{\mathbf{a}^H(Z') R(\alpha, L)^{-1} \mathbf{a}(Z')} \quad (5)$$

但し, $\mathbf{a}(Z)$ は Z に関するステアリングベクトル

$$\mathbf{a}(Z') = \left(e^{-j\omega_1 2Z' \lambda/c}, e^{-j\omega_2 2Z' \lambda/c}, \dots, e^{-j\omega_M 2Z' \lambda/c} \right)^T \quad (6)$$

であり. また S_0 は次式で表される.

$$S_0 = \sqrt{\int \{ \mathbf{a}^H(Z') R(\alpha, L)^{-1} \mathbf{a}(Z') \}^{-2} dZ'} \quad (7)$$

S_0 は, $s(\alpha, Z', L)$ の α に対する強度比較のために導入する. 参照波形が散乱波形と整合する場合, $s_{\text{cp}}(\alpha, Z', L)$ は Z' 及び α に関して極大値を有する. 同性質に基づき, 以下の条件を満たす距離点群 (X, Z) を抽出する.

$$\left. \begin{aligned} \partial s_{\text{excp}}(\alpha, Z', L) / \partial \alpha &= 0 \\ \partial s_{\text{excp}}(\alpha, Z', L) / \partial Z' &= 0 \\ s_{\text{excp}}(\alpha, Z', L) &\geq \max_{Z'} \beta s_{\text{excp}}(\alpha, Z', L) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

但し β は定数であり, 経験的に設定する. 本手法は散乱波形歪み補正に基づく周波数干渉計を実現し, 距離抽出において高い精度及び分解能を有する. 本手法で抽出される距離点群 (X, Z) に対して RPM 法を適用し, 目標点群を抽出する.

2.4 数値計算による特性評価

本節では, 各手法の特性評価を数値計算により与える. 図 6 に従来 Capon 法の出力及び抽出距離点群を示す. 従来 Capon 法の出力は, $s_{\text{cp}}(X, Z, 0)$ とする. 但し, $N = 60$, $M = 20$, $\beta = 0.3$ であり, 雑音を考慮しない. 同図より, 図 3 と比較し

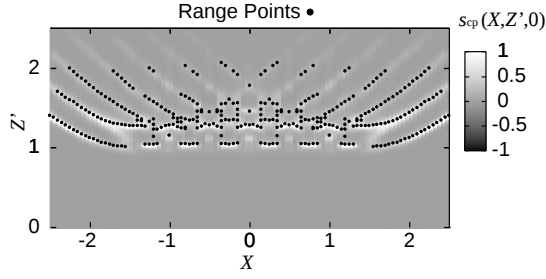


図 6 従来 Capon 法出力と抽出距離点群 \$(X, Z)\$

Fig. 6 Output of the original Capon method and extracted range points.

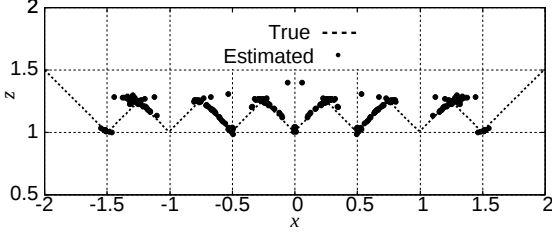


図 7 従来 Capon 法と RPM 法による目標境界点群

Fig. 7 Estimated target points with RPM in using the original Capon method.

て、特に $Z' = 1.0\lambda$ 付近で、分解能が向上することが確認できる。また、図 7 に同距離点群に対する RPM 法の適用例を示す。同図から、凹凸目標境界における画像化精度の改善が確認できる。これは、複数次干渉波が混在する状況において、周波数干渉計に基づく Capon 法が有効であることを示す。しかし、散乱波形変化に起因する距離分解能と精度の劣化のために、凹面エッジ領域等での不安定性及び境界側面の一部が再現されないことが確認できる。

図 8 に拡張 Capon 法出力 $s_{\text{excp}}(X, Z)$ 及び抽出される距離点群を示す。 M, N, β は、図 6 の場合と同一である。同図より、特に複数次干渉波が混在する領域及び $Z' \geq 1.5\lambda$ の領域の距離抽出点が増大することが確認できる。これは、散乱波形変化による分解能劣化のために埋もれていた信号成分が、参照波形最適化を導入することで、卓越した距離点として抽出されるためである。また図 9 に同距離点群に対する RPM 法の適用例を示す。同図から、提案距離抽出法がエッジ領域の推定精度を高め、かつ凹凸側面の推定領域を増大させることが確認できる。同結果は、波長より小規模な凹凸境界面に対しても、エッジ領域を含めた高精度境界抽出が可能であることを示す。

目標推定精度の定量評価のため、 $\epsilon(x_e^i)$ を定義する。

$$\epsilon(x_e^i) = \min_x \|x - x_e^i\|^2, \quad (i = 1, 2, \dots, N_T) \quad (9)$$

ここで x 及び x_e^i は、それぞれ真の目標座標及び推定目標座標を示す。 N_T は目標点数の総数である。図 10 に各 ϵ に対する各距離抽出法での目標点数を示す。同図より、約 0.01 波長程度の高精度目標点群を飛躍的に増大させることが可能であることが確認できる。 ϵ の平均値は提案手法において $1.23 \times 10^{-2}\lambda$ である。また、S/N が 35dB 以上あれば、同平均値は、 $5.0 \times 10^{-2}\lambda$ 程度を保持することを確認している。

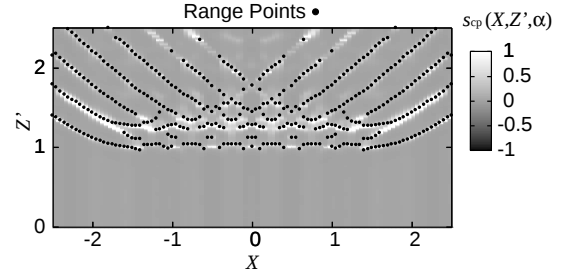


図 8 拡張 Capon 法出力と抽出距離点群 \$(X, Z)\$

Fig. 8 Output of the extended Capon method and extracted range points.

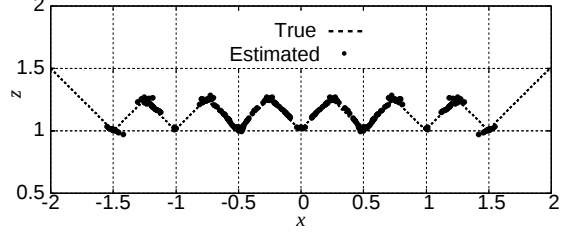


図 9 拡張 Capon 法と RPM 法による目標境界点群

Fig. 9 Estimated target points with RPM in using the extended Capon method.

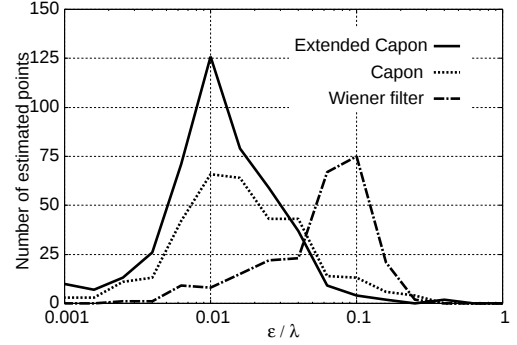


図 10 各 ϵ に対する目標点数

Fig. 10 Number of the estimated target points for each ϵ .

3. 3次元問題

3.1 システムモデル及び提案手法の実手順

本節では、提案手法の 3 次元問題への拡張を示す。図 11 にシステムモデルを示す。素子指向性、目標の比誘電率、導電率及び送信電流波形は、2 次元問題と同一である。 x 軸方向の直線偏波を仮定する。送受信素子 $z = 0$ 平面内で走査する。実空間を (x, y, z) と定義し、 $z > 0$ と仮定する。 $s'(X, Y, Z')$ を素子位置 $(x, y, z) = (X, Y, 0)$ での受信電界と定義する。

RPM 法の 3 次元モデルを既に提案している [8]。本手法は、3 次元の距離点群に対して、同連結操作を経ずに複雑目標境界の高精度画像化が可能である。同手法では、目標境界点の (x, y) 座標を次式で決定する。

$$(x(q^{3d}), y(q^{3d})) = \arg \max_{x, y} \left| \sum_{i=1}^{N_q} s(q_i) \exp \left\{ -\frac{d(x, y, q^{3d}, q_i^{3d})^2}{2\sigma_d^2} - \frac{D(q^{3d}, q_i^{3d})^2}{2\sigma_D^2} \right\} \right| \quad (10)$$

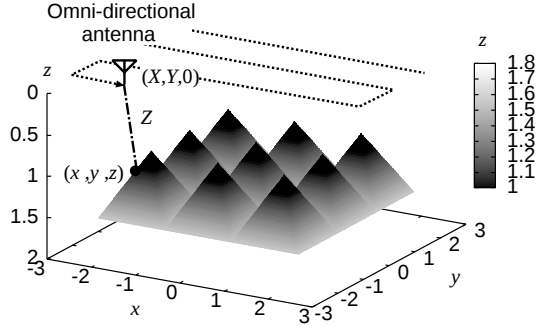


図 11 3次元問題でのシステムモデル

Fig. 11 System model in 3-dimensional problem.

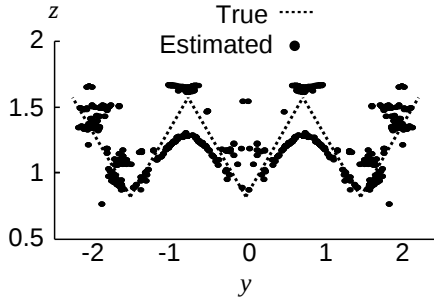


図 12 Wiener フィルタによる抽出距離点群に対する RPM 法の適用例

Fig. 12 Estimated image obtained by RPM and the Wiener filter.

ここで $q^{3d} = (X, Y, Z)$, $q_i^{3d} = (X_i, Y_i, Z_i)$ であり, $d(x, y, q^{3d}, q_i^{3d})$ は, $z = 0$ 平面上にある q 及び q_i で決定される球の交線との最短距離を示す. また $D(q^{3d}, q_i^{3d}) = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2}$ であり, σ_d 及び σ_D は, 定数である. $z = \sqrt{Z^2 - (x - X)^2 - (y - Y)^2}$ として, 目標点座標を推定する. 提案手法では, 各素子位置で得られる受信電界 $s(X, Y, Z')$ に対し, 拡張 Capon 法を適用する. $L = (X, Y, 0)$ とし, 式 (8) により抽出される距離点群 (X, Y, Z) に対して, RPM 法を適用する.

3.2 数値計算による特性評価

本節では, 数値計算による各種法の画像化特性を比較する. 図 11 に示す目標境界を仮定する. 素子走査範囲は, $-2.5 \leq X, Y \leq 2.5$ とし, 各軸の走査点数は 51 点とする. 図 12 は, 距離抽出において Wiener フィルタを適用する場合の推定目標点群を示す. $\sigma_d = 0.1\lambda$, $\sigma_D = 0.5\lambda$ とする. 同図より, 凹凸側面領域とエッジ領域で, 複数年干渉及び散乱波形変化に起因する推定誤差が顕著である. また図 13 は, 従来 Capon 法の適用例である. 同図では, 比較的高精度な目標点群が推定されているが, 特にエッジ領域において, 波形変化に起因する距離誤差のための画像劣化が確認できる. これに対し, 図 14 は, 拡張 Capon 法の適用例である. 同図より特にエッジ領域において, 推定精度の向上が確認され, 高精度な目標境界推定が可能である. 同結果は, 拡張 Capon 法による参照波形最適化に基づく多重到来距離分離が 3 次元問題でも有効であることを示す. 凹面奥側の境界が再現されないのは, 同領域の直接散乱が受信されないためである.

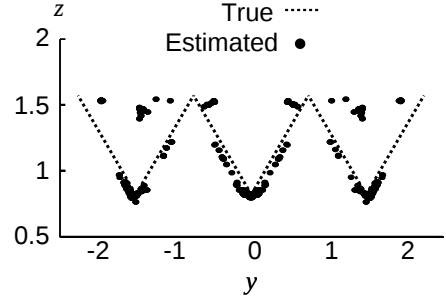


図 13 従来 Capon 法による抽出距離点群に対する RPM 法の適用例
Fig. 13 Estimated image obtained by RPM and the original Capon method.

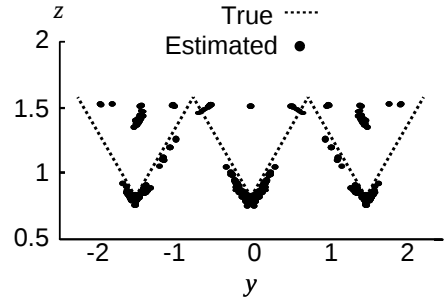


図 14 拡張 Capon 法による抽出距離点群に対する RPM 法の適用例
Fig. 14 Estimated image obtained by RPM and the extended Capon method.

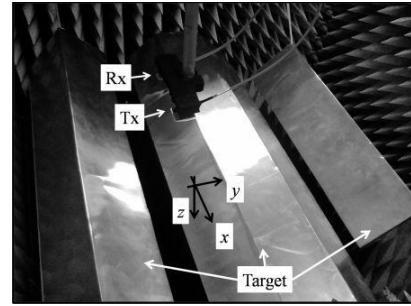


図 15 目標及び送受信アンテナの配置

Fig. 15 Arrangement for objects and small UWB microstrip patch antenna.

3.3 実験データによる特性評価

本節では実験データを用いた各手法の特性評価を示す. 中心周波数 3.3 GHz, 10dB 帯域幅 3.0 GHz の UWB 信号を用いる. 送信中心波長は約 90 mm である. マイクロストリップパッチアンテナを使用する. 同アンテナの指向性 3dB ビーム幅は, 約 90° である. 偏波は長軸対短軸比が 17 dB の楕円偏波であり, 長軸方向は同図の y 軸方向である. バイスタティックレーダを利用する. 送受信素子間隔は y 方向に 126 mm である. 素子を $z = 0$ 平面内で $-300 \text{ mm} \leq x \leq 300 \text{ mm}$, $-100 \text{ mm} \leq y \leq 100 \text{ mm}$ の範囲で走査する. 走査サンプル間隔は 10 mm である. 図 15 に, 送受信素子と目標物体の配置を示す. 目標表面を厚さ 0.2mm のアルミシートで被覆する. 受信データの同相積分回数は 1024 回である. 送受信素子間の直接到来波のみを予め測定し, 受信信号から差し引く.

図 16 に Wiener フィルタから抽出される距離点群に対する

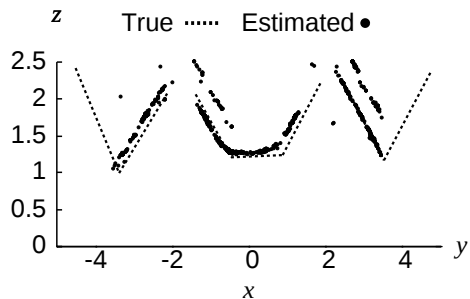


図 16 実験データに対する Wiener フィルタと RPM 法の適用例
Fig. 16 Estimated image obtained by RPM and the Wiener filter in the experiment.

RPM 法による目標境界点群を示す。但し、バースタティック型へ拡張される RPM 法を適用する。S/N は約 30 dB である。同図より、特にエッジ領域において画像劣化が顕著となる。また真の目標位置の後方に、レンジサイドローブ等の不要応答に起因する虚像が確認される。図 17 及び図 18 に従来 Capon 法及び拡張 Capon 法で抽出される距離点群に対する RPM 法の適用例を示す。同図より、不要応答に対する虚像が抑圧され、エッジ領域等において、画像化に有意な推定点数が増大することが確認できる。但し、同結果においては、従来及び拡張 Capon 法の推定像の間に有意な相違が認められない。これは、提案手法の有効性が SN 比が 40dB 程度必要であることに起因する。このため、雑音環境下での性能向上が今後の課題となる。

4. 結 論

本稿では、参照波形最適化に基づく拡張 Capon 法を用いた高分解能距離抽出法を提案した。提案法は、送信波形の部分微分モデルに基づく参照波形に対する各 Capon 法出力を最適化することにより、散乱波形変化に対応する複数次干渉波分離を実現する。同距離抽出法と RPM 法を併用することにより、波長よりの小さい規模の凹凸エッジ面も、約 1/100 波長級の精度で推定可能であることを示した。また、実験データに基づく特性評価においても、提案手法が超波長の目標境界推定精度を保持することを実証した。

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)、特別研究員奨励費(課題番号 19-497)及び若手研究スタートアップ(課題番号 21860036)による。

文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

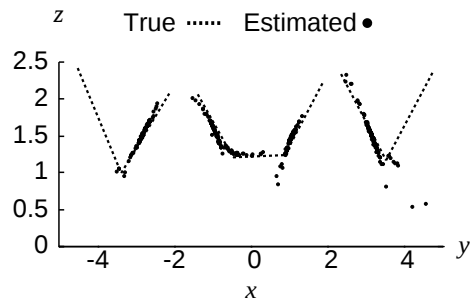


図 17 実験データに対する従来 Capon 法と RPM 法の適用例
Fig. 17 Estimated image obtained by RPM and the original Capon method in the experiment.

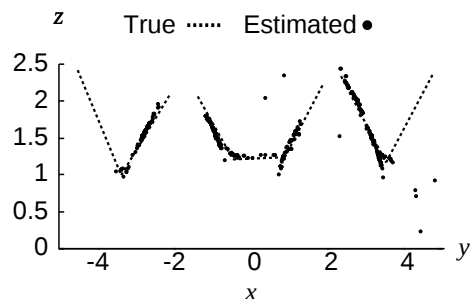


図 18 実験データに対する拡張 Capon 法と RPM 法の適用例
Fig. 18 Estimated image obtained by RPM and the extended Capon method in the experiment.

- [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, no. 11, Oct., 2008.
- [6] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "High-Resolution 3-D Imaging Algorithm with an Envelope of Modified Spheres for UWB Through-the-Wall Radars," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. 57, no. 11, Nov., 2009 (in press).
- [7] 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.
- [8] 木寺 正平, 阪本 卓也, 佐藤 亨 "複雑立体目標のためのファジィ推定を用いた高分解能 UWB レーダ画像化手法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-1-34, Sep, 2008.
- [9] J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418, Aug. 1969.
- [10] J. Capon and N. R. Goodman, "Probability distributions for estimators of frequency wavenumber spectrum," *Proc. IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1785–1786, Oct. 1970.
- [11] S. Kidera, T. Sakamoto, T. Sato and S. Sugino, "An Accurate Imaging Algorithm with Scattered Waveform Estimation for UWB Pulse Radars", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E89-B, no. 9, pp. 2588–2595, Sept., 2006
- [12] S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, "A High-Resolution Imaging Algorithm without Derivatives Based on Waveform Estimation for UWB Radars", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E90-B, no.6, pp. 1487–1494, June, 2007.