解説：特集
電磁界モデリングを用いる計測技術の基礎と新展開

超広帯域近距離レーダのための高精度画像化法

木　寺　正　平*

＊電気通信大学 情報理工学研究科　東京都調布市調布ヶ丘 1–5–1
＊Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1–5–1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, Japan
＊E-mail: kidera@ee.uec.ac.jp

キーワード：レーダ (radar)，超広帯域信号 (ultra wideband signal)，逆散乱問題 (inverse scattering problem)，画像化 (imaging).
JL 0011/17/5611–0001 ©2017 SICE

1．はじめに

超広帯域 (Ultra Wideband:UWB) 信号は，500 MHz 以上の周波数帯域もしくは20%以上の比帯域幅 (帯域幅/中心周波数) を有する信号として，欧米各国や日本で民生利用が認可されている．UWB 信号を用いたレーダシステムは，数 cm 程度の距離分解能を有し，従来レーダの距離分解能 (数 m 程度) から，飛躍的に空間分解能を高められるため，光学カメラ等が使用できない災害現場・宇宙環境等でのロボットセンサ，プライバシーの問題を回避できるセキュリティセンサ等の近距離イメージングとして有望であるとされている．また，数 GHz 帯の UWB 信号は，損失性の低いコンクリートや地面に対して，数十 cm 程度の到達深度が達成されるため，トンネルや道路等の内部の空洞，鉄筋腐食等を非接触・非破壊で探知できるため，大規模かつ迅速な非破壊検査技術としても有望である．さらに，生体内部においても数 cm 程度の到達深度を保持し，かつ非電離信号であることから，安全な画像診断技術としても有望である．特に罹患率の高い乳癌への既存検診法である X 線 Mammography は，被曝および乳房が強く圧迫される等の身体的負担が大きく，受診率は 10～20%程度に留まる．これに対して UWB レーダによる診断では，非接触かつコンパクトな計測装置で実現できる．また脂肪と悪性腫瘍との誘電率・導電率のコントラストは 10 倍以上であるため，小さな悪性腫瘍でも卓越した反射波を得られ，初期の石灰化の検知も可能であると期待されている．

一方，一般的な UWB レーダにおける空間分解能は高々数 cm 程度であり，さまざまな応用での要求性能を満たしていないことが指摘されている．同レーダでの画像化法は，逆散乱解析法 (Inverse scattering method) と共焦点法 (Confocal method) に大別される．前者の逆散乱解析法は，Helmholtz 方程式型の領域積分方程式を解くことで，観測散乱場から，対象の複素誘電率分布を再構成する方法である．一般に同問題は，多重散乱等の影響から非線形問題となり，容易には解けない．線形近似法として，積分項の全電界成分を背景媒質での入射電界に置き換える Born 近似[1] があるが，背景媒質とのコントラストが強い場合は精度が不十分である．これに対して，順問題解析法を併用して，入射電界と複素誘電率分布を逐次更新する BIM (Born Iterative Method)[2] や，背景媒質およびそのグリーン関数も更新する DBIM(Distorted Born Iterative Method) 等[3] が提案されており，生体等の高いコントラストを有する場合でも適用可能であることが報告されている[4]．同手法は単一周波数でも適用可能であるが，複数周波数を利用することで周波数分散媒質にも適用可能である．後者の共焦点法は，対象物と背景媒質の誘電コントラストに起因する散乱信号を，異なる素子位置で観測し，同データの位相を補償して合成する Delay and Sum (DAS) 処理という原理に基づき，対象の反射率分布を再構成する方法である．代表的な手法として，合成開口処理[5] がある．それに等価な手法として Kirchhoff マイグレーション法[6] 等がある．共焦点法は，簡易なアルゴリズムで構築でき，かつ複素信号をコヒーレント処理することで，方位分解能を高めることできる．SAR は特に衛星搭載型レーダによる地表面計測等の応用で有用である[5]．一方で連続境界等を有する非点状目標においては，SAR の結像処理の仮定が崩れるため，再現精度が劣化するという問題がある．また特に 3 次元の画像解析では，各 Voxel で積分処理を実施するため，長大な計算時間が必要である．

近年，共焦点法の概念を対象の境界抽出に置き換えて，処理量を圧縮し，精度および分解能を改善させる境界抽出法が複数提案されている．同手法では，まず送受信パルス間の遅延時間から散乱境界点までの距離を正確に計測する．対象境界上の散乱中心位置は，観測位置によって異なる場所に対応するため，同散乱中心点を各観測位置に対して再現することで，その点集合分布から対象の境界を抽出することができる．同原理に着目した手法が IBST (Inverse Boundary Scattering Transform) 法[14]，Envelope 法[12),13)]，RPM (Range Points Migration) 法[15] であり，いずれも観測素子位置と距離を紐づけした，距離点 (Range point) と呼ばれる離散点集合を実空間へ写像することで画像化が行われる．IBST 法は，逆境界散乱変換 (IBST) を用いることで，注目する距離点の微分 (差分) 値から，到来方向を推定することで，散乱境界点を決定することができる．Envelope 法は，目標境界面が各距離点の距離を半径，素子位置を中心 (もしくは焦点) とする球または回転楕円体の包絡面上にあるとし，距離点の集合をそのまま境界面に対応させる方法であり，BST

の積分形式として考えられる．これにより，IBST の微分計算における誤差増幅を抑えることができる．しかし，両手法はいずれも事前処理において，離散的な距離点を正確に連結させせなければならない．このため，各素子で複数の散乱点からの散乱が得られる場合 (複雑な形状もしくは複数の集合体からなる目標の場合) においては，その連結処理の精度が画像化精度に大きく依存する．RPM 法は，各距離点における到来方向推定において，ほかの距離点から決定される球もしくは回転楕円体の交点の集積度をガウスカーネルで評価し，最も有意な到来方向を決定することで，上記の連結問題をほぼ完全に解決する．同手法においては，距離点と散乱境界点を一対一対応させることができるため，二次的な処理において従来の共焦点法と比べてより高次元の情報を付加できるという特徴を有している．具体的にはドップラー速度情報や誘電体内部推定のための外部境界入射および出射点の情報などであり，多様な処理へと拡張されている．

本稿では，UWB 信号を想定したレーダ画像化法として，逆散乱解析法，共焦点法および境界抽出法の原理と特徴を簡潔に回折し，特に，近年導入された境界抽出法が，同レーダの分解能・精度を改善することを，幾つかの数値計算例により提示する．

2. 逆散乱解析法

図1 に示すとおり，ある複素波数分布 $k(\boldsymbol{r})$ を有する誘電領域において位置 $\boldsymbol{r}$ で観測される全電場 $E^{\rm t}(\boldsymbol{r})$ を考える．$E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) = E^{\rm i}(\boldsymbol{r}) + E^{\rm s}(\boldsymbol{r})$ とおく，$E^{\rm i}(\boldsymbol{r})$ は入射電場，$E^{\rm s}(\boldsymbol{r})$ は散乱電場と呼ばれる．波源分布が $S(\boldsymbol{r})$ で与えられるとすると，次式の Helmholtz 方程式が成立する．

$$\left[\nabla^2 + k^2(\boldsymbol{r})\right] E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) = -S(\boldsymbol{r}) \tag{1}$$

で与えられる．ここで，入射電場，散乱電場は

$$E^{\rm i}(\boldsymbol{r}) = k_0^2 \int_\Omega G_0(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')S(\boldsymbol{r}')d\boldsymbol{r}' \tag{2}$$

$$E^{\rm s}(\boldsymbol{r}) = k_0^2 \int_\Omega G_0(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')O(\boldsymbol{r})E^{\rm t}(\boldsymbol{r})d\boldsymbol{r}' \tag{3}$$

で与えられる．ただし，k_0 は真空中での波数である．$O(\boldsymbol{r}) = [k(\boldsymbol{r})/k_0]^2 - 1$ はコントラスト関数と呼ばれる．また $G_0(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$ は真空中を電磁波の伝搬を記述する

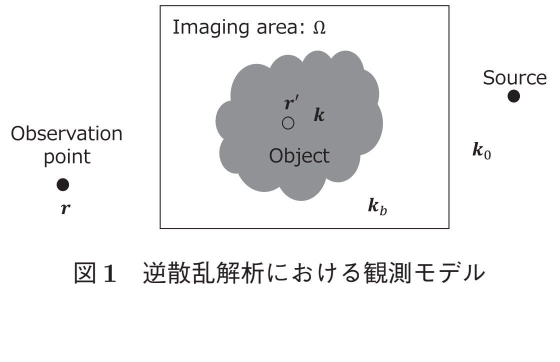

図1　逆散乱解析における観測モデル

偏微分方程式のグリーン関数であり，3 次元問題では，

$$G_0(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') = \frac{1}{4\pi|r-r'|}e^{ik_0|r-r'|} \tag{4}$$

で与えられる．

(3) 式は，特に Lippmann-Schwinger (LS) 積分方程式と呼ばれる．一般に対象となる物体の透磁率はほぼ真空の透磁率 μ_0 とみなせるので，角周波数 ω を用いれば複素誘電率は $\epsilon(\boldsymbol{r}) = k^2(\boldsymbol{r})/(\omega^2\mu_0)$ で与えられる．よってコントラスト関数 $O(\boldsymbol{r})$ を (3) 式から求めることが主題となる．しかし，$E^{\rm t}(\boldsymbol{r})$ は $O(\boldsymbol{r})$ に依存するため，これを解く問題は非線形問題となる．Born 近似では，(3) 式において，$E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) \simeq E^{\rm i}(\boldsymbol{r})$ であり，一次近似とみなせる．これは Rytov 近似と同等であることが示されている[1]．これにより問題は線形化されるが，背景媒質との誘電コントラストが小さな弱散乱体のみに適用可能である．BIM 法では，Born 近似で求められた初期の $O_{\rm init}(\boldsymbol{r})$ から順問題を解き，その全電場成分を (3) 式の $E^{\rm t}(\boldsymbol{r})$ に置き換え，$O(\boldsymbol{r})$ を求める[2]．これを反復更新することで真の $O(\boldsymbol{r})$ に近づけていく．

さらに DBIM 法では，$O(\boldsymbol{r})$ に比例した形式での背景媒質の波数分布 $k_b(\boldsymbol{r})$ を仮定する．この場合においても以下のヘルムホルツ方程式が得られる．

$$\left[\nabla^2 + k_b^2(\boldsymbol{r})\right] E_b^{\rm t}(\boldsymbol{r}) = -S(\boldsymbol{r}) \tag{5}$$

(1) 式と (5) 式の両辺を差し引くことで次式を得る．

$$\begin{aligned}&\left[\nabla^2 + k_b^2(\boldsymbol{r})\right]\left(E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) - E_b^{\rm t}(\boldsymbol{r})\right) = \\ &\quad -\left[k^2(\boldsymbol{r}) - k_b^2(\boldsymbol{r})\right] E^{\rm t}(\boldsymbol{r})\end{aligned} \tag{6}$$

上記から，次式を得る．

$$\begin{aligned}\Delta E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) &\equiv E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) - E_b^{\rm t}(\boldsymbol{r}) \\ &= k_0^2 \int_\Omega G_b(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\Delta O(\boldsymbol{r}')E^{\rm t}(\boldsymbol{r}')d\boldsymbol{r}'\end{aligned} \tag{7}$$

ただし，$G_b(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$ は背景媒質のグリーン関数であり，$\Delta O(\boldsymbol{r}) = \left(k^2(\boldsymbol{r}) - k_b^2(\boldsymbol{r})\right)/k_0^2$ である．$\Delta O(\boldsymbol{r})$ が十分に小さいと仮定すれば，$E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) \simeq E_b^{\rm t}(\boldsymbol{r})$ より，(7) 式は，

$$\Delta E^{\rm t}(\boldsymbol{r}) \simeq k_0^2 \int_\Omega G_b(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\Delta O(\boldsymbol{r}')E_b^{\rm t}(\boldsymbol{r}')d\boldsymbol{r}' \tag{8}$$

と近似される．DBIM 法は $|\Delta E^{\rm t}(\boldsymbol{r})|^2$ を最小にするように，背景媒質の波数分布 $k_b(\boldsymbol{r})$ を更新する．更新された $k_b(\boldsymbol{r})$ 順問題解析により得られる各位置の電界成分より，グリーン関数 $G_b(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$ も更新し，これを繰り返す．よって適切な初期値を選べば，強散乱体でも高い精度で波数分布を再現することが可能となる．DBIM は Gauss-Newton 法と等価な処理であることが示されている[3]．特に乳癌検知を想定したマイクロ波マンモグラフィ

の応用において，生体ファントム等を用いた実験データでその有用性が確認されている[4]．ここでは複数周波数における DBIM の結果を利用し，周波数分散性モデル (Debey モデル) のパラメータを決定している．

強散乱体に対するほかの手法として，擬似線形 (Quasi Linear) 近似法がある[7]．同手法では次式のとおり，全電場を入射電場で近似する．

$$E^{\mathrm{t}}(\boldsymbol{r}) = \chi(\boldsymbol{r})E^{\mathrm{i}}(\boldsymbol{r}) \tag{9}$$

(9) 式を (1) 式に代入すると，同問題は次式の積分方程式に帰着される．

$$\chi(\boldsymbol{r}) = 1 + \int_{\Omega} G^{b}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')O(\boldsymbol{r}')d\boldsymbol{r}' \tag{10}$$

すなわち $\chi(\boldsymbol{r})$ を導入することで，全電場の誘電率依存性を考慮した形で問題を解くことができる．これにより，強散乱体に対してもある程度の精度を保持することが示されている．

また Van den Berg らは，新に $W(\boldsymbol{r}) = O(\boldsymbol{r})E^{\mathrm{t}}(\boldsymbol{r})$ という関数を設けて，式を $W(\boldsymbol{r})$ と $E^{\mathrm{t}(\boldsymbol{r})}$ に関する二つの連立方程式を最適化によって解を求め，$O(\boldsymbol{r})$ を決定する CSI (Contrast Source Inversion) 法を提案した[8]．同手法は DBIM のように順問題を解かずに解を求める手法であるが，その解が物理的な意味を有している保証はない．しかし，さまざまな場合においてよい再現精度が得られていることが確認されている．また近年，正則化項に l_1 ノルムを追加することで，少ない散乱データでも再現精度を保持できることが報告されている[9]．これは逆散乱解析法におけるスパースモデリングの例である．

そのほかの処理法として，回折トモグラフィ法がある[10]．同手法は，X 線のトモグラフィ理論を低周波電磁波に拡張させた方法であり，回折現象を考慮した解析法である．同法でも (3) 式の積分方程式を基盤としており，Born 近似の条件下で，背景媒質のグリーン関数を用いた逆畳込み演算により，目的とするコントラスト関数 $O(\boldsymbol{r})$ を導出する．同手法は，Born 近似と同様の近似を用いているが，再帰的な最適化ではなく，逆畳込みという変換のみの処理で誘電コントラストを再構成できるという特徴をもつ．

3．共焦点法

対象と背景媒質の誘電率および導電率のコントラストにより生じる後方散乱波を結像処理することで，対象の空間的な反射率分布を推定する方法が共焦点法である．このため，前章での逆散乱解析法とは異なり，誘電率および導電率分布を直接的に推定することはできないが，簡潔な処理により広範な領域をイメージングできるという利点を有する．

代表的な共焦点法として，合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) がある[5]．同手法は，小さな開口面積の素子を移動させて，各位置での散乱データを処理することで，等価的に大きな開口面積での観測を実現させる．これにより方位方向の分解能を高めることができる．簡単のため，x 軸上で送受信一体型の無指向性素子を走査する．素子位置を $(X, 0)$ とし，同位置での受信電界のフィルタ出力を $s(X, t)$ とおく．(x, z) における SAR の画像 $I(x, z)$ は次式で表わされる．

$$|I(x,z)| = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(X, \sqrt{(x-X)^2+z^2}\right) \mathrm{d}X \tag{11}$$

同式は，受信信号に対して素子位置 $(X, 0)$ と注目するピクセル位置 (x, y) で計算される伝搬遅延量に相当する複素信号の振幅を各素子で重ね合わせることを示す．同処理は信号を遅延 (delay) させて合成 (sum) させるため，DAS (Delay and Sum) 処理とも呼ばれる．SAR の距離方向の分解能は，信号の帯域幅の逆数で決定される．一方，方位方向の分解能は，信号の中心波長と合成開口角の逆数に比例する．これは信号 s は一般に複素信号であるため，波長が短いほど位相干渉により方位分解能が改善されるためである．結像処理に基づくため，回折限界による空間分解能は波長の半分程度となるほか，半波長以上の観測間隔であるとグレーティングローブによる虚像が発生する．同等の処理で，Kirchhoff マイグレーション[6] や多次元 Beamforming 法 などがある．これらは処理の方法が多少異なるが，どの手法も DAS の原理に基づく共焦点法である．GPR やコンクリート内部の非破壊検査，または生体内部などでは，伝搬媒質が損失性であるため，高い周波数では急激に到達深度 (penetration depth) が減衰する．このため，到達深度と分解能を両立することは難しくなり，それぞれの応用に適した周波数帯が選択される．

以下，SAR の数値計算例を紹介する．2 次元問題，TM 波を仮定し，散乱データは FDTD(Finite-difference time-domain) 法により生成する．比帯域約 100%のモノサイクルパルスを送信電流として与える．完全導体の目標を $z > 0$ に配置する．x 軸上において，$-2.5\lambda \leq x \leq 2.5\lambda$ の範囲を送受信一体型の素子で走査し，一定間隔でデータを取得する．ただし λ は送信パルスの中心波長である．**図 2** に SAR での画像化結果を示す．画像強度が相対的に高い位置に目標境界が対応することがわかる．計算時間は 2.8 GHz Xeon プロセッサで約 60 秒である．SAR は，解析領域のすべてに対して，すべての素子のデータについて積分処理を実施するため，解析領域が広い場合または 3 次元問題では計算時間が多大となる．

これに対して，フーリエ変換と内挿処理を用いた高速化法，Stolt の F-k マイグレーション法が提案されている[11]．F-k マイグレーション処理は次式で表わされる．

$$I_{\mathrm{FK}}(x,z) = \iint_{-\infty}^{\infty} S(k_X, \omega)\, \mathrm{e}^{\mathrm{j}(k_X x + k_z z)} \mathrm{d}k_X \mathrm{d}\omega \tag{12}$$

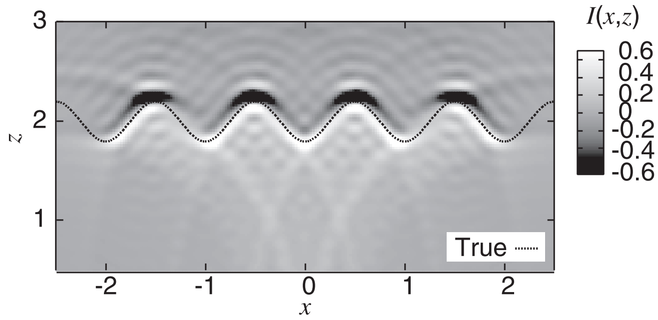

図2　SAR による画像化例 $I(x,z)$

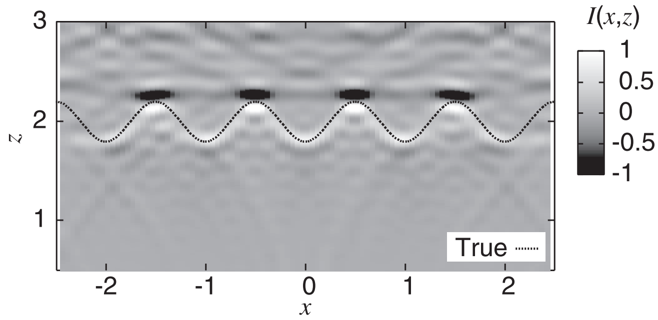

図3　F-k マイグレーション画像化例 $I_{\mathrm{FK}}(x,z)$

ただし，$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_0^2} - k_X^2}$，$c_0$ は伝搬速度，$S(k_X,\omega)$ は $s(X,t)$ の X に関するフーリエ変換である．**図3** に前述と同様の観測モデルにおける F-k マイグレーションの結果 $I_{\mathrm{FK}}(x,z)$ を示す．従来 SAR に比べて大きな精度劣化はないことが確認できる．計算時間は同プロセッサで約 2.0 秒であり，高速化が可能である．同手法は空間周波数領域において直交座標から極座標への内挿処理が必要である．同内挿精度はデータ取得間隔に依存し，十分なデータが確保できないと画像精度が劣化する．

4．境界抽出法

前章の共焦点法は，対象が離散点の集合で表現されると仮定する．一方，連続的な境界を有する対象に対しては，散乱中心が素子の移動に伴い移動するため，共焦点法の結像処理では誤差が生じる．これに対して，対象誘電分布の不連続境界を抽出する方法が近年提案されている．前章と同様，送受信一体型の無指向性素子を x 軸上で走査すると仮定する．

4.1　Envelope 法

幾何光学近似では，対象境界での散乱中心はほぼ点とみなすことができる．適切なフィルタ処理より送受信パルスの遅延時間から散乱中心点までの距離を計測することができる．この距離を素子位置 X に関する関数とみなし，その関数から対象境界の関数を導くことを考える．幾何光学近似に基づけば，送受信素子からの視線方向と対象境界の接ベクトルは，散乱中心点で直交する．同条件

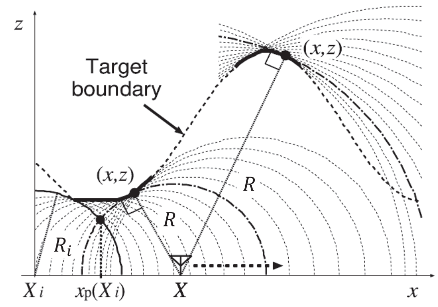

図4　対象境界と円の内包絡線および外包絡線の関係

より，得られた距離と素子位置の組合せ (距離点 (Range point) と呼称) において，素子位置を中心，距離を半径とする円の集合体を考えると，その包絡線が対象境界となることがわかる．この原理に基づいた境界抽出法が Envelope 法である．同原理は，最初に Winters らが乳房の境界面抽出のために利用した[12]．つぎに Kidera らは，これを凹面やエッジ等を有する一般的な形状に拡張させた[13]．各素子位置 $(X,0)$ で得られる離散的な距離 R を紐づけし，距離点 (X,R) を定義する．この時，対象境界は次式で表現される．

$$\left.\begin{array}{c} \max\limits_{\nu_X(X_i-X)<0} x_{\mathrm{p}}(X_i) \leq x \leq \min\limits_{\nu_X(X_i-X)>0} x_{\mathrm{p}}(X_i) \\ z = \sqrt{R^2-(x-X)^2} \end{array}\right\} \tag{13}$$

ただし，$x_{\mathrm{p}}(X_i)$ は (X,R) と (X_i,R_i) で定義される円の交点であり，$\nu_X = \mathrm{sgn}(\partial x/\partial X)$ である．$\partial x/\partial X$ の符号は，対象境界が円の内包絡線か外包絡線のどちらで表現できるかを判定する符号であり，両端の距離点で定義される 2 つの円とそのほかの円の集合との包含関係で決定される．**図4** に同手法の画像化原理を示す．

4.2　逆境界散乱変換法 (IBST)

Sakamoto らは，Envelope 法が提案される前に，上記の包絡線抽出を微分形式で表現することで高速化を実現した[14]．円の包絡線を微分表現することで，次式の変換式を得る．

$$\left.\begin{array}{l} x = X - R\partial R/\partial X \\ z = R\sqrt{1-(\partial R/\partial X)^2} \end{array}\right\} \tag{14}$$

これは距離点とその微分値から散乱中心点の座標 (x,z) を直接的に導出することを示す．(14) 式を逆境界散乱変換 (IBST: Inverse BST) と呼ぶ．同変換式は 3 次元でも同様に成立する．同手法は，(x,z) 空間では微分の定義できない領域でも，(X,R) では微分可能となるため，エッジ領域にも適用可能である．また，積分処理は必要ないため，高速な処理が可能である．

4.3　RPM 法

Envelope 法や IBST 法は，円や球の包絡面抽出に基づく．距離点 (X,R) に対する到来方向が決まれば，散

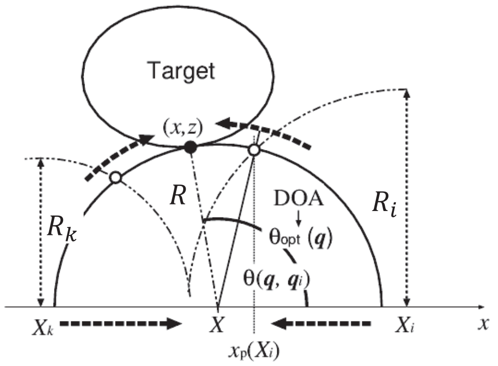

図5　RPM 法における交点と到来方向の関係

乱点 (x,z) は決定される．IBST では，到来方向を次式で求めることと等価である．

$$\cos(\theta) = -\partial R/\partial X \simeq -\Delta R/\Delta X \qquad (15)$$

一方，一般には複数目標が混在するため，干渉等により微分を正確に求めることは困難である．また Envelope による積分処理でも，事前に距離点を正確に連結する必要がある．これは二つの情報を紐づけするジョイント問題の一種として認識されており，反射点が複数存在する目標では，その問題はきわめて難しくなる．同問題に対して，Kidera らは到来方向推定をガウスカーネルによる分布推定に置き換えた手法，RPM 法を提案した[15]．同手法では到来角度に関する分布関数を以下のとおり定義する．

$$f(\theta,\boldsymbol{q}_i,\boldsymbol{q}_j)=\exp\left[-\frac{\left\{\theta-\theta(\boldsymbol{q}_i,\boldsymbol{q}_j)\right\}^2}{2\sigma_\theta^2}\right],\ (X_i\neq X_j) \qquad (16)$$

ただし，$\boldsymbol{q}_i=(X_i,R_i)$, $\boldsymbol{q}_j=(X_j,R_j)$ で表現される距離点ベクトルであり，$\theta\left(\boldsymbol{q}_i,\boldsymbol{q}_j\right)$ は (X_i,R_i) と (X_j,R_j) で定義される円の交点である．i 番目の距離点 $\boldsymbol{q}_i$ に対する到来方向は次式で決定される．

$$\theta_{\mathrm{opt}}(\boldsymbol{q}_i)=\arg\max_{\theta}\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{q}}}|s(\boldsymbol{q}_j)|f\left(\theta,\boldsymbol{q}_i,\boldsymbol{q}_j\right)\quad \mathrm{e}^{-\frac{(X_i-X_j)^2}{2\sigma_X^2}} \qquad (17)$$

ここで σ_θ および σ_X は到来方向 θ および素子位置 X に関するガウスカーネルの幅である．N_{q} は処理すべき距離点の総数である．重み関数 $\exp\left\{-(X-X_i)^2/2\sigma_X^2\right\}$ は，素子間隔が離れるとその交点が真の散乱点から離れるという命題に基づいて導入されている．**図5**に各素子の交点と散乱点および到来方向の関係を示す．同処理は3次元問題にも容易に拡張される．

同手法は距離点の事前連結という処理を必要とせず，また微分に対する感度を適切な平滑化幅 σ_X で決定することで，複雑に干渉する距離点分布においても正確に散乱点を抽出することができる．同手法は交点抽出による高速化，誘電体内部への拡張等[16]，多様な展開がなされている．また距離点と目標境界点を一対一で紐づけすることで，多偏波データやドップラー情報などを画像上に付加することができ，従来では難しかった高次元イメージングが可能となる[17]．

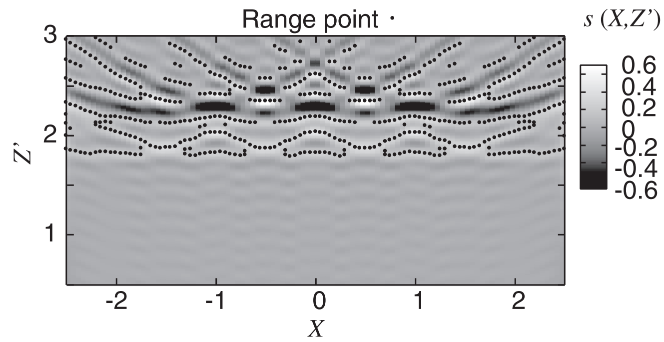

図6　Wiener フィルタ出力と抽出される距離点

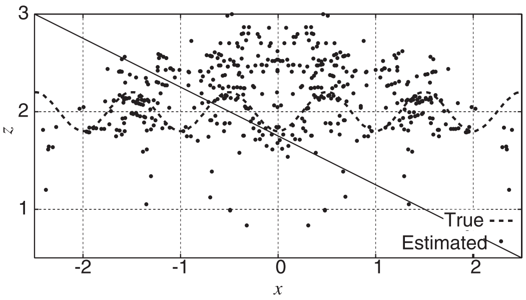

図7　IBST による画像化例

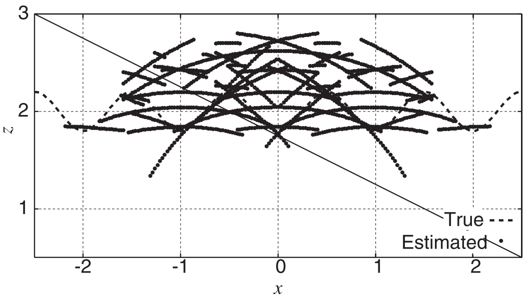

図8　Envelope 法による画像化例

4.4　数値計算による各手法の特性評価

図2および図3における観測・目標モデルを用いる．**図6**に同モデルにおける各素子での Wiener フィルタ出力および極大応答より抽出される距離点を示す．目標境界が凹凸面を複数有するため，多数の反射波が干渉し，距離点の分布が非常に複雑になっていることがわかる．**図7**および**図8**に IBST および Envelope 法を用いた場合の画像化例を示す．いずれの手法も図6の距離点を正確に連結する必要があり，同連結処理がきわめて難しいため，大きな推定誤差が確認される．一方，**図9**は RPM 法による画像化結果であり，多干渉状況においても，ガ

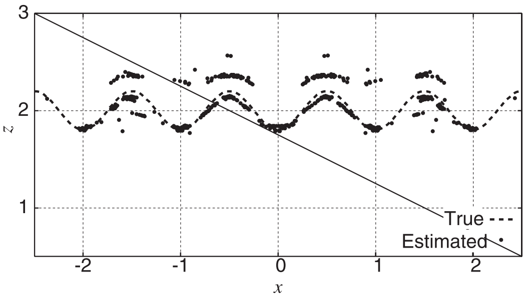

図 9　RPM 法による画像化例

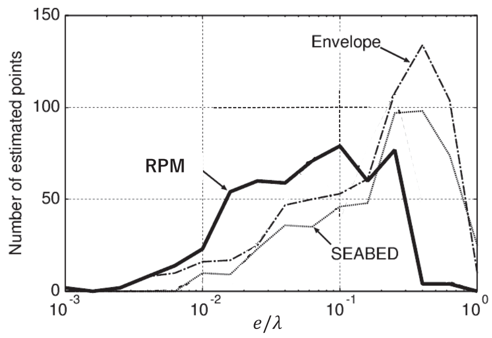

図 10　各手法の誤差分布

ウスカーネルを利用した統計的な到来時間方向推定により，高い推定精度を保持することがわかる．誤差の定量評価のために，$\epsilon(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{i})$ を次式で定義する．

$$e(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{i}) = \min_{\boldsymbol{x}} \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{i}\|, \tag{18}$$

ここで $\boldsymbol{x}$ は真の目標境界，$\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{i}$ は各手法で推定される推定点を示す．**図 10** に各手法における誤差の分布を示す．また誤差 $e \leq 0.1\lambda$ を満たす累積確率は，IBST が 31.6%，Envelope 法が 35.3%，IBST とフーリエ変換による微分推定の統合が 47.0%，RPM 法が 72.0%となり，RPM 法が最も優位であることがわかる．

5．結論

近距離レーダを想定した画像化手法は，共焦点法および逆散乱解析法などに大別され，各分野できわめて多様な展開がなされてきた．一方，近年境界抽出に特化した方法等が提案され，その再現精度や処理時間などが大幅に改善されてきている．またドップラー速度推定との併用，スパースモデリング等を利用することで非破壊検査，医療診断画像応用，セキュリティセンサ，高度 ITS センサ等への展開へ有望であり，さらなる画像化性能の改善が期待される．

（2017 年 7 月 25 日受付）

参　考　文　献

1）S.D. Rajan and G.V. Frisk: A comparison between the Born and Rytov approximations for the inverse backscattering problem, *GEOPHYSICS*, **59**–5, 810/817 (1994)

2）M. Mahta and C. Cho: Study of some practical issues in inversion with the Born iterative method using time-domain data, *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, **41**–2, 177/184 (1993)

3）R.F. Remis and P.M. van den Berg: On the equivalence of the Newton-Kantorovich and distorted Born methods, *Inverse Problems*, **16**–1, 1/4 (1999)

4）J.D. Shea, B.D. Van Veen, and S.C. Hagness: A TSVD Analysis of Microwave Inverse Scattering for Breast Imaging, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **59**–4 (2012)

5）D.L. Mensa, G. Heidbreder, and G. Wade: Aperture Synthesis by Object Rotation in Coherent Imaging, *IEEE Trans. Nuclear Science.*, **27**–2, 989/998 (1980)

6）S. Gray and W. May: Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes, *Geophysics*, **59**–5, 810/817 (1994)

7）C. Zhou and L. Liu: Radar-diffraction tomography using the modified quasi-linear approximation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **38**–1, 404/415 (2000)

8）P.M. van den Bergy and R.E. Kleinmanz: A contrast source inversion method, *Inverse Problems*, **13**–6, 1607 /1620 (1997)

9）M.T. Bevacqua, L. Crocco, L. Di Donato, and T. Isernia: Non-Linear Inverse Scattering via Sparsity Regularized Contrast Source Inversion, *IEEE Trans. Computational Imaging*, **3**–2, 296/304 (2017)

10）A.J. Devaney: Geophysical diffraction tomography, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **22**–1, 3/13 (1984)

11）R.H. Stolt: Migration by Fourier Transform, *Geophysics*, **43**–1, 23/48 (1978)

12）D. Winters, J. Shea, E. Madsen, G. Frank, B. Van Veen, and S. Hagness: Estimating the breast surface using UWB microwave monostatic backscatter measurements, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **55**–1, 247/256 (2008)

13）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.*, **E90-B**–7, 1801/1809 (2007)

14）T. Sakamoto and T. Sato: A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform, *IEICE Trans. Commun.*, **E87-B**–5, 1357/1365 (2004)

15）S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato: Accurate UWB Radar Three-Dimensional Imaging Algorithm for a Complex Boundary Without Range Point Connections, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **48**–4, 1993/2004 (2010)

16）T. Manaka, S. Kidera, and T. Kirimoto: Experimental Study on Embedded Object Imaging Method with Range Point Suppression of CreepingWave for UWB Radars, *IEICE Trans. Electron.*, **E99-C**–1, 138/142 (2016)

17）Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera, K. Saho, and T. Sato: Three-dimentional Imaging Method Incorporating Range Points Migration and Doppler Velocity Estimation for UWB Millimeter-wave Radar, *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters*, **14**–1, 122/126 (2016)

［著　者　紹　介］

木寺正平（きでら しょうへい）君

2003 年京都大学工学部電気電子工学科卒業．2005 年同大学院情報学研究科修士課程修了．2007 年同博士後期課程修了 (博士 (情報学))．同年，日本学術振興会 特別研究員 (PD)．2009 年電気通信大学 大学院電気通信学部 助教を経て，2014 年同情報理工学研究科 准教授．米国電気電子学会 (IEEE)，電子情報通信学会，電気学会各会員．