

多重散乱波を用いた超波長分解能 誘電体内部 UWB レーダセンサの研究

Super-resolution UWB radar sensor for dielectric medium by using multiple scattering signal

2021009



研究代表者 電気通信大学

助 教 木 寺 正 平

共同研究者 電気通信大学

教 授 桐 本 哲 郎

[研究の目的]

本研究の目的は、超広帯域 (UWB: Ultra Wideband: 500 MHz 以上の周波数帯域) 電磁波を用いた、波長限界を超える高分解能内部レーダ技術の開発である。UWB レーダ技術は誘電体内部透過性に優れるとともに、高い測距性能 (数 mm 級) を有する。また同レーダは、従来の超音波・X 線・MR (磁気共鳴) 等の各種内部計測技術における問題点 (超音波: 高周波減衰による分解能の制限, X 線: 被験者の被曝等, MR: 装置の大型化・高コスト) を解決する技術として注目を集めている。同応用範囲は「乳癌検知等の非侵襲生体内部モニタリング」・「壁・道路内部の破損検知等の各種非破壊計測」など多岐に亘り、社会的需要が極めて高い。本研究では申請者が独自に提案してきた「周波数干渉計に基づく超波長分解能画像化 (RPM: Range Points Migration) 法」と「多重散乱波を用いた画像領域拡大原理」(何れも空間計測を対象) を誘電体内部イメージングへ拡張し、「1/10 波長分解能」・「不可視領域画像化」を実現する内部レーダセンサのための要素技術を開発する。

① マルチスタティックレーダによる高分解能内部イメージング法の開発

平成 23 年度後半に、拡張 RPM 法を用いた誘電体内部イメージング法を確立した。同手法は、高速かつ高精度に内部目標境界を推定するが、誘電体形状及び内部形状によっては、再現不可能な領域 (影領域) が生じる問題がある。同問題を改善するため、マルチスタティックレーダ (多点送信多点受信モデル) を導入した (図 1 参照)。

従来法では、一点送受信のモノスタティックを想定したが、同モデルでは、瞬間的な開口面積が小さいため、影領域の問題を回避できない。一方、マルチスタティックモデルでは、瞬間的な開口面積が大きくなるため、特に目標を包囲するようにアレイアンテナを配置する場合、同画像化領域を著しく拡大させることが可能であ

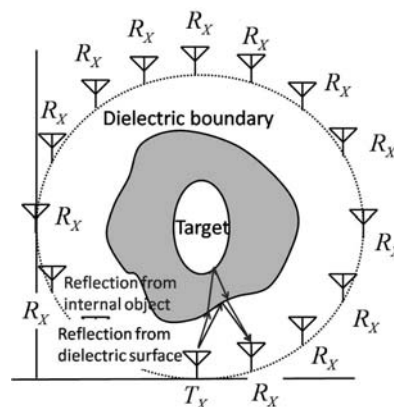


図 1 マルチスタティック観測モデル

る。このため、本課題ではまずモノスタティック型内部 RPM をマルチスタティック型内部 RPM へ拡張し、影領域の問題を改善させることを検討した。

拡張 RPM 法では、誘電体境界での入射点と出射点を推定する必要がある。モノスタティックレーダでの同点対は同じ位置をとるが、マルチスタティック（送受信素子位置が異なる）の場合では、入射点と出射点が異なる。これに対応するために、RPM 法の特徴である法線ベクトルを用いて幾何光学的なアプローチにより、所望の入射点と出射点を推定するため定式化を実施した。推定された入射点、出射点により、各アンテナと距離によって決定される目標候補点の軌跡の交点の集積度を評価することで、モノスタティックモデルと同様に内部ターゲット点を再現することが可能である。

図 2 に数値計算による誘電体境界及び内部目標境界推定結果を示す。信号対雑音比 (S/N) は 20 dB である。図 2 左にモノスタティックモデル（従来法）、右にマルチスタティックモデル（提案法）による内部推定像の結果を示す。は再現できなかった内部目標境界も再現することが確認できる。

この時の内部目標の位置推定誤差の RMS は、それぞれ従来法が $5.77 \times 10^{-2} \lambda$ 、提案法が $3.20 \times 10^{-2} \lambda$ である。内部目標境界再現率は従来法が 58%、提案法が 98% である。同図から確認できる通り、提案法により従来法では再現できなかった領域が推定可能になることが確認できる。

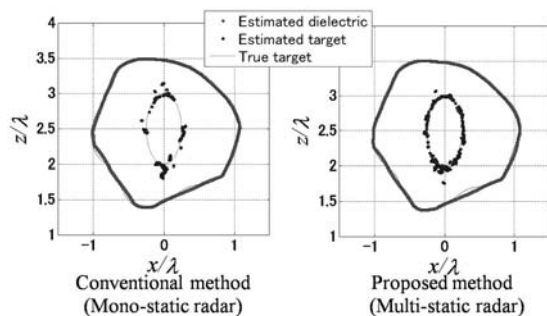


図 2 左 従来法による内部画像推定像
右 提案法による内部画像推定像

同成果は既に電子情報通信学会誌の Letter として採録が確定しており（論文リスト No. 1）、同成果を 2 件の国際会議で発表済みである。またそのうち一件は Student Paper Contest 及び Best Paper Award の Finalist（8 名が選出）に選出されており、同分野での評価も高いことを示している。

② 高精度誘電率推定法の 3 次元化と実験的検討

本年度では、透過伝搬遅延と散乱波形補正を用いた立体誘電体目標に対する高精度誘電率推定法を提案した。従来の誘電率推定法として領域積分方程式の数値解析に基づく手法があるが、膨大な計算量を必要とし、現実的な応用に適さない。

これに対し同手法は高速かつ高精度に誘電率を推定可能であるため、3 次元化にも耐えうると予測する。図 3 に 3 次元化の観測モデルを与える送受信素子と受信素子の 2 素子を用いる。送受信素子では誘電体境界と内部目標からの反射波が得られるために、同データを用いて誘電体境界推定と内部目標境界推定を行う。受信素子は、送受信素子の位置に対して、誘電体ターゲットを挟みこむ位置に設置するため、透過波が観測される。同透過波により、比誘電率を推定する。但し、受信信号には透過波と誘電体境

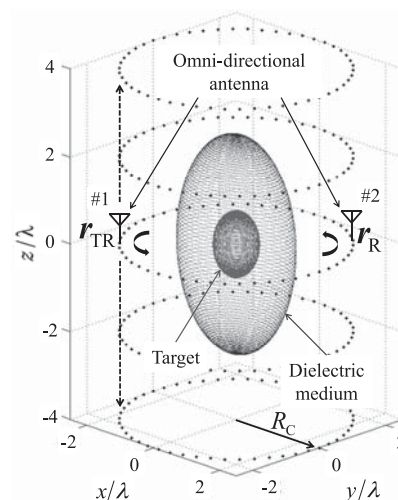


図 3 誘電率推定 3 次元モデル

界を回り込んで到達する直接波が混在している。素子と目標の位置関係によっては、有意な透過波が得られない状況も想定され、同状況下の観測信号は誘電率推定データから除去する必要がある。目標形状等の先見情報なしに直接波と透過波の優位性を定量評価するために、同手法では第一フレネルゾーンを利用した、識別法を導入した。第一フレネルゾーンとは、送受信素子の伝搬において支配的な空間を示すものであり、同領域に誘電体目標がどの程度占めているかを定量評価することにより、直接波の到達割合を定量的に評価することが出来る。

同識別の後、本手法では、誘電体内部の比誘電率を推定するために、まず受信信号の第一到来波に対応する距離点群を抽出し、RPM法を適用することで誘電体境界点群及び同法線ベクトルを得る。

次に、透過伝搬パスに最も適する、誘電体境界上の入射点及び出射点の組合せを決定し、観測される透過波の距離情報から誘電率の伝搬遅延を考慮して誘電率を推定する。同手順を各アンテナ位置で行い、推定誘電率の最頻値を初期推定誘電率とする。

一方、一般に誘電体の大きさがUWB信号の中心波長オーダ(数十 cm)である場合、各波長でのフレネルゾーンの違いから、同透過波は周波数特性を有する。このため、送信波形に対して、受信波形が歪み、Wienerフィルタ等を用いた距離推定では、波形歪みに対する距離誤差が生じる。このため、比誘電率推定精度にも大きな影響を与える。これを解決するため、本手法では更に、初期推定誘電率と推定誘電体境界を用いてFDTD法により受信データを再生成し、同波形との相関処理によって同距離誤差を補正し、同補正量より誘電率を再計算する。

図4に波形補正前後の誘電率推定結果(ヒストグラム)を示す。FDTD法での波形推定により、比誘電率推定の相対誤差は、約5%から0.5%にまで改善し、極めて高精度な誘電率推定が達成されたことが確認できる。同成果は

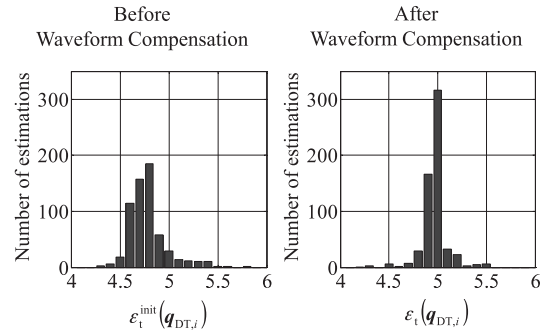


図4 誘電率推定結果
左(波形補正なし) 右(波形補正あり)

既にIEICEで論文一件が採録され、2件国際会議で発表しており、高い評価を得ている。

③ 内部目標反射波と複数観測軌道を利用した誘電率推定法の開発

本課題では、特にアレイ素子(観測領域)が目標を完全に包括できない状況を想定する。これは乳がん検知(乳房の反対側からの計測は困難)や道路内部の亀裂探知(道路上側からのみ観測可能)等で想定される現実的な問題設定である。上記の状況下では、観測領域が制限されるため、内部目標画像化はより困難な問題となる。特に誘電率推定では、各素子で有用な透過波が得られないため、伝搬遅延推定に基づくアプローチが適用できない。これに対し、観測軌道(またはアレイ配置)を複数回変えた観測により、誘電率を同時に推定する手法を開発する。一般的に、目標が点であれば、観測素子の位置や配置を変えることで、誘電率の推定が容易に可能である(散乱中心位置は素子位置に依存せず、一定であるため)。しかし、通常のターゲットモデルは点ではなく、連続的な境界面を有する。連続的な境界面を有する目標の場合、散乱中心位置は素子位置に依存して変化するため、先述の空間干渉計を原理とした比誘電率推定は困難となる。

同問題を解決するため、観測軌道を変えた複数回観測による比誘電率推定法を検討した。

幾何光学近似においては、正しい伝搬経路上に複数配置されたアンテナからは同じ位置の散

乱中心からの反射波が返ってくると予測される。同予測に基づき、1回目と2回目の計測により得られた、遅延時間を比較することにより、誘電率を推定することができる。これは与えられた観測距離点に対し、入射誘電体境界点と内部目標境界の散乱中心が全て一対一対応するために、推定可能となる。既に数値計算により、同手法の有効性を確認しており、雑音環境下でも高精度に誘電率を推定することが可能であることを示している。

本成果は国際会議で発表予定である。RPM法の原理を融合させた本アプローチは、従来の誘電率推定とは全く異なった原理に基づき、その独創性は高い。また、観測側は、誘電体境界を取り囲むように素子を配置する必要がないため、同誘電率推定法の応用範囲を飛躍的に高める可能性を有する。

[今後の研究の方向、課題]

今後は各課題においての実験的検討を実施する予定である。既に基本的な実験環境を構築している。実験モデルでは、円柱コンクリート内部に円柱アルミ目標を埋め込み、誘電率推定と内部目標イメージングの評価を実施する。同実験結果により提案技術の基本特性を評価する。また、不均質・分散性媒質に対応するため、領域積分方程式を用いた逆問題解析法を導入し、上記手法と融合させその相乗効果を創出することによって、革新的なUWB内部レーダセンサの開発を促進させる。特に「乳癌検知等の非侵

襲生体内部計測」及び「壁・道路・原子炉内部の非破壊計測」を想定した、より現実的な観測モデルに同手法を拡張し、各種の改良を加えることで、実用化に向けて本研究開発を加速させる。

[成果の発表、論文等]

- [1] 学術論文 R. Souma, S. Kidera, T. Kirimoto, "Accurate Permittivity Estimation Method with Iterative Waveform Correction for UWB Internal Imaging Radar", IEICE Trans. Electronics, vol. E96-C, 2013 (in press).
- [2] 学術論文 Y. Niwa, S. Kidera, T. Kirimoto, "Image Expansion Approach for Target Buried in Dielectric Medium with Extended RPM to Multi-static UWB Radar", IEICE Trans. Electronics, vol. E96-B, No. 1, pp. 119-123, Jan., 2013.
- [3] 国際会議論文 Y. Niwa, S. Kidera, T. Kirimoto, "Accurate Image Expansion Method for Target Buried in Dielectric Medium Using Multi-static UWB Radar," 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012), Nagoya, Japan, Oct, 2012.
- [4] 国際会議論文 R. Souma, S. Kidera and T. Kirimoto, "Accurate Permittivity Estimation Algorithm by Compensating Waveform Deformation for UWB Internal Imaging Radar", 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband ICUWB 2012, Syracuse, N. Y., U. S. A, 17-20 Sep., 2012.
- [5] 国内学会 相馬竜之介, 木寺正平, 桐本哲郎, "立体誘電媒質に対する再帰的散乱波形歪み補正を用いた高精度誘電率推定法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-28, 岐阜大学, Mar. 2013.
- [6] 国内学会 丹羽祥尋, 木寺正平, 桐本哲郎, "マルチスタティック UWB レーダを用いた誘電体内部画像化領域拡大法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-1-13, 富山大学, Sep. 2012.