

1. 研究の目的

本研究の目的は、超広帯域（UWB: Ultra Wideband: 500MHz 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センサの開発である。UWB 信号を用いたレーダ技術は、高い距離分解能（数 mm 級）を有し、誘電体内部透過性に優れる。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）を解決する革新的技術として注目を集める。その応用範囲は、「地雷や水道管等の地中埋設物イメージング」・「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・亀裂検査等の各種非破壊計測」等、多岐に亘る。このため、同分野は基礎から応用に至るまで各国で精力的に実施されているが、「処理速度」や「空間分解能」等の点で上記応用の要求性能を満たす技術は確立されていない。

本研究プロジェクトでは、波長限界を超える高分解能内部透過イメージング技術を実現させるため、新規性の高い複数の画像・信号処理法を統合し、その基礎理論及びアルゴリズムを確立させる。具体的には、申請者が独自に提案する「周波数干渉計を用いた波長限界を超える超分解能画像化法(RPM 法:Range Points Migration 法)」と「多重散乱波を用いた不可視領域イメージング原理」を内部画像化へ拡張し、領域積分方程式に基づく逆散乱問題解析等と融合させることで、特に波長規模の多層誘電体構造において「1/10 波長分解能」及び「1/100 波長精度」と高精度誘電率推定を同時に実現する内部レーダ画像化手法を開発する。また、偏波や散乱周波数特性等の特徴量から、対象（癌細胞等）の電磁氣的・化学的情報量を抽出する手法も提案し、革新的な誘電体内部計測技術を確立させる（図 1 参照）。



図 1 : 各研究課題と応用例

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

報告者は現在まで、従来のレーダ技術の画像化性能（空間分解能・精度・再現領域）を凌駕する複数の独創的な画像化理論及びアルゴリズムを構築してきた（RPM 法及び多重散乱波画像化理論）。本研究課題では、上記手法を内部画像化へ拡張し、従来技術では達成困難な精度・分解能を得ることを数値計算及び実験により実証した。また、多層誘電体構造や不均質誘電体構造に対しても従来技術の知見を活かしながら、適切に手法を拡張し、多様な用途に適する複数の画像化手法を提案し、その有効性を示した。以下の課題毎に、その成果の詳細を述べる。

- ① RPM法とFDTD法を用いた高精度誘電率推定法の提案と実験的検証
- ② 二層誘電体層目標に対する誘電率推定法
- ③ 不均質媒質に対するRPM法とFDTD法を併用した高精度誘電率推定法
- ④ RPM 法と FDTD 法を用いた高精度誘電率推定法の提案と実験的検証

既に RPM 法を均質誘電体内部目標の境界推定に拡張している（RPM-HD(RPM for Homogeneous Dielectric medium) 法）。RPM-HD 法は、RPM 法の原理を内部イメージングに拡張したものであり、誘電体境界構造（及び内部一層目の構造）を高分解能（1/10 波長程度）かつ高精度（1/100 波長程度）に推定可能である。

しかし、同手法では、誘電体内の平均誘電率を既知としている。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提案されているが、多大な計算量を必要とし、十分な精度が得られていないのが現状である。本課題では、RPM 法の推定点群及び同法線ベクトルを用いた伝搬経路推定に基づく高速な誘電率推定法を提案する。

図 2 にシステムモデルを示す。送受信素子#1を配置する。素子#1に対して目標の反対側に受信素子#2を配置する。目標を固定し、素子#1と#2をその位置関係を保ちながら、図の円周上で走査する。素子#1では誘電境界と内部目標境界からの反射波が得られるため、同データから上記の外部及び内部境界を推定する。素子#2では誘電体内部透過波が得られるため、同観測データから誘電率を推定する。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

本手法では、まず素子#1で得られる反射波の第一到来波により距離点群を抽出し、RPM法より外部誘電体境界を推定する。次に素子#2で受信される信号より、誘電体内部の誘電率を推定する。但し、一般に素子#2で観測される信号には透過波の他に、外部誘電体境界を回り込む表面波(クリーピング波)が受信される。外部誘電体形状によっては、同表面波が透過伝搬遅延推定に深刻な影響を及ぼす場合がある。

同問題に対応するため、表面波抑圧手法を導入する。具体的には、RPM法により高精度に推定される外部誘電体境界と同法線ベクトルを用いることによって、各素子で受信される表面波伝搬経路を図3のように求める。同伝搬経路で推定される伝搬遅延量を観測伝搬遅延量から除去することで、誘電体透過に起因する伝搬遅延量のみを抽出し、透過伝搬遅延量を計算する。

上記処理では、伝搬遅延のみを用いているために高速に誘電率を推定することが可能である。一方、同精度は伝搬遅延推定精度に依存する。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、波形整合(Matched Filtering)等を用いた距離推定では、波形歪み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。ここでFDTD法とは、Maxwellの方程式を差分近似で解く手法であり、十分な空間・時間サンプルが得られれば、ほぼ厳密な電磁界散乱場を計算する。最後に素子#1で観測された誘電体内部境界からの反射波を用いて、RPM-HD法により内部目標推定を行う。

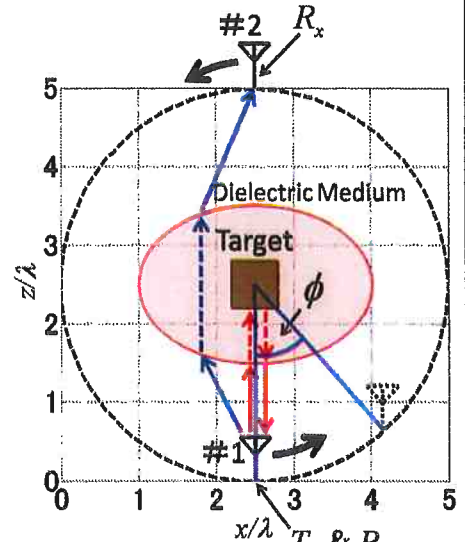


図2：誘電体推定のための観測モデル

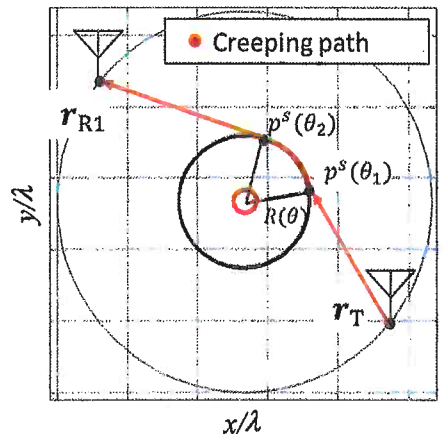


図3：表面波伝搬経路推定

数値計算による性能評価：

図4に同距離補正前後の各素子で推定される誘電率のヒストグラムを示す。但し、真の比誘電率は5.0である。同図から、補正前では推定比誘電率分布は真値より低い側に広がっており、同平均値から求める誘電率推定精度も約7%にとどまる。一方、補正後の分布では、凡そ真値付近に推定が集中してお

り、**同精度も約2%**にまで改善した。同推定精度は、特に波長規模での誘電体サイズにおいては、**従来法では達成困難な推定精度**を実現している。

また、同推定比誘電率と反射波から得られる距離情報を用いて、RPM法を内部画像化に拡張したRPM-HD法を適用した結果を図5(図6：内部目標拡大図)に示す。同図より、極めて高精度に内部目標を推定可能であることが分かる。各推定点と目標境界との推定精度の**最頻値は約1/100波長**であり、極めて高精度な推定精度が得られることがわかる。但し、目標の側面側の推定像が得られていないことがわかる。これは、**同領域からの散乱波が得られないため**である。

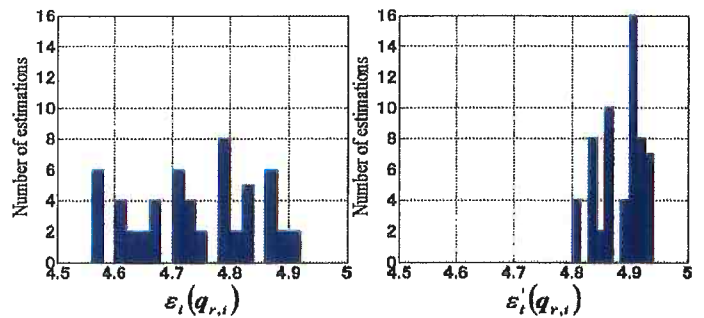


図4：推定比誘電率の頻度分布(左：補正前、右：補正後)

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

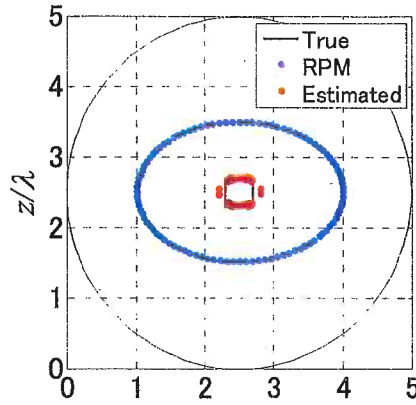


図5：誘電体及び内部境界推定例

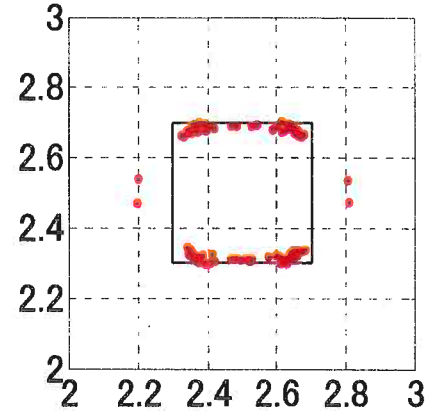


図6：内部境界推定像(拡大図)

実験による特性評価

次に、本手法の実験的検討について述べる。実験図7に実験外観を示す。誘電体目標を、基準点中心で回転させる。送信素子Txを固定する。目標回転中心に対称な位置に受信素子Rx2を一つ配置する。送信素子の隣接位置にも受信素子Rx1一つを配置する。Rx1は#1に相当し、誘電境界と内部目標境界からの反射波が得られるため、同観測データは上記の外部及び内部境界推定に用いる。Rx2はシステムモデルの素子#2にあたり、誘電体内部透過波が得られるため、同観測データより誘電率を推定する。

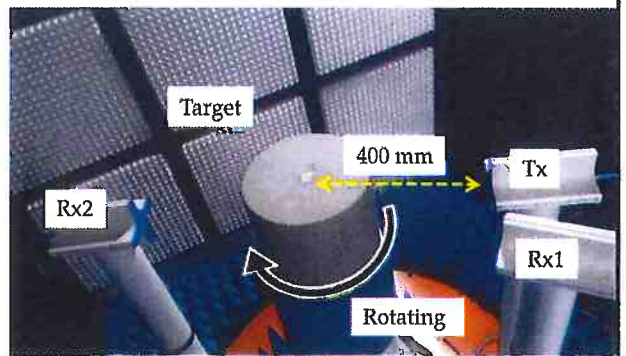


図7. 実験外観

垂直に設置したダイポールアンテナ(貴財団の助成金で購入)を用いる。送受信信号はRF切り替えスイッチ(貴財団の研究助成で購入)でTx-Rx1及びTx-Rx2の信号を切り替える。外部誘電体はセメント、内部目標はアルミである。両方の形状は円柱であり、高さは25cmである。VNA(Vector Network Analyzer)により、50MHzから5.55GHzまでを10MHz刻みで周波数掃引する。実効中心波長は15cmであり、距離分解能は7.5cmである。同データを逆フーリエ変換し、受信信号を得る。素子を固定し、目標を回転させることで等価的に円周上での素子走査を実現する。回転中心から素子までの距離は40cmである。



図8. コンクリート誘電率真値計測

外部誘電体誘電率真値を9.07とする。但し、外部誘電体の真値は、直方体形状の同誘電体を計測し、伝搬遅延量により推定する(図8参照)。また、波形補正においては、FDTD法で得られる再構成波形から伝達関数を計算し、実験での送信波形に同伝達関数を適用し、再構成波形を得る。波形補正前の推定誘電率は8.56(推定誤差5.3%)、波形補正後の推定誘電率は8.84(推定誤差2.5%)であり、波形補正が有効であることが実験でも示された。図9に波形補正前後で推定された誘電率を用いてRPM-HD法により推定された内部境界を示す。同図より提案法が高精度な内部目標推定像を実現していることが確認できる。波形補正前後の目標境界の推定誤差RMS値はそれぞれ 1.98×10^{-2} 波長、 0.97×10^{-2} 波長であり、極めて高精度な推定が可能であることが確認できた。これは当該分野では実施者が調べた限り報告されていなかったレベルの再現精度であり、本研究成果の重要な一部である。

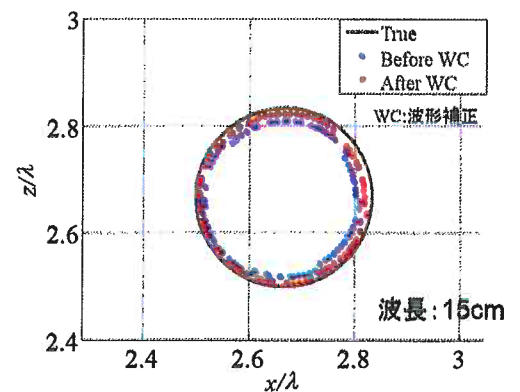


図9. 波形補正前後の誘電率推定結果を用いたRPM-HD法による内部アルミ目標境界推定結果

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

同成果は、国際会議及び国内会議で報告予定である。また実験により実施者らが提案していた手法の有効性が確認できたことは、実用化に向けて大きな一歩であると考えられる。また同成果は国内会議1件、国際会議1件で発表予定であり、IEEEのレターとして投稿予定である。

② 二層誘電体層目標に対する誘電率推定法

①に示す通り、均質媒質に包含された内部誘電体境界及び誘電率推定法を提案し、その有効性を実証した。しかし同手法では、内側の誘電体の誘電率推定を想定していない。本課題では、同手法を拡張し、複数誘電層媒質の誘電率推定法を提案した。

図10にシステムモデルを示す。観測モデルは①と同様である。誘電体は二層の誘電層(各層の誘電率を ϵ_1 、 ϵ_2 、領域を Ω_1 、 Ω_2 とする)からなっており、各誘電層の損失性は低いものとし、非分散性(誘電率の周波数依存性はない)媒質とする。

本手法では、①と同様にまず r_{R2} で観測された第1到来波に対応する距離点群を抽出し、誘電体の外部境界をRPM法により推定する。同誘電体境界点群をEnvelope法により補間する。 r_{R1} で観測された信号より透過波の距離点群を抽出する。同距離点群に単層誘電率推定を仮定した①の手法を適用し、得られた推定値を(ϵ_1 、 ϵ_2)の両方の初期値とする。次に r_{R2} で受信される信号から第2到来波に対応する距離点群を抽出し、初期値 ϵ_1 とEnvelope法により保管された誘電体外部境界推定点群からの内部誘電体境界推定候補点群を求め、Envelope法の原理を拡張し第二層境界を推定する。Envelope法の拡張原理は図11に示すとおりである。最後に透過波距離点群に対し、推定誘電率(ϵ_1 、 ϵ_2)から幾何光学近似により伝搬経路を推定し、観測伝搬遅延と推定伝搬遅延の差が最小になるように各層の誘電率(ϵ_1 、 ϵ_2)を最適化する。

数値計算による特性評価

図10に示す層構造をもつ誘電体を考える。反射波と透過波の受信信号はFDTD法により生成する。但し、比誘電率を第1層の誘電体で $\epsilon_1=5.0$ 、第2層の誘電体で $\epsilon_2=3.0$ 、導電率は、第1層、第2層共に 0.01S/m とする。提案法による誘電率推定における推定比誘電率は、第1層誘電体が $\epsilon_1=5.07$ 、第2層の誘電体が $\epsilon_2=2.98$ となる。**真値に対し、第1層誘電率は1.4%、内部誘電率は0.67%の相対誤差**であり、高精度な誘電率推定を実現する。また、同誘電率における外部誘電体境界及び内部誘電体境界のEnvelope法による内部イメージング画像を図12に示す。内部イメージングの推定誤差(Root Mean Square Error)は、**第1層の境界が $3.4 \times 10^{-3} \lambda$ 、第2層の境界が $1.57 \times 10^{-2} \lambda$** となり、高精度で推定可能であることがわかる。

本研究成果は①で提案した手法を複数層媒質に拡張したものであり、①の手法の精度を保持しつつ二層誘電体層への拡張を可能にした。同手法は原理的に3層以上の誘電層に拡張可能であり、本手法の有効性が確認された意義は大きいと考える。但し、層数が多くなると計算時間が発散するため、その点における改良が今後の課題となる。同成果も国内会議1件、国際会議1件で発表予定であり、実験的検討を経て論文として投稿する予定である。

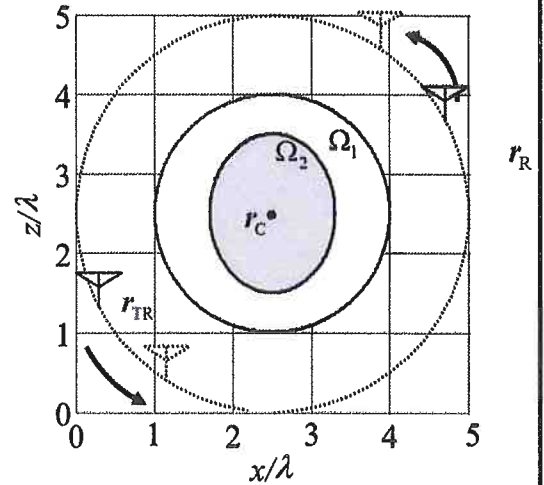


図10. 観測モデル

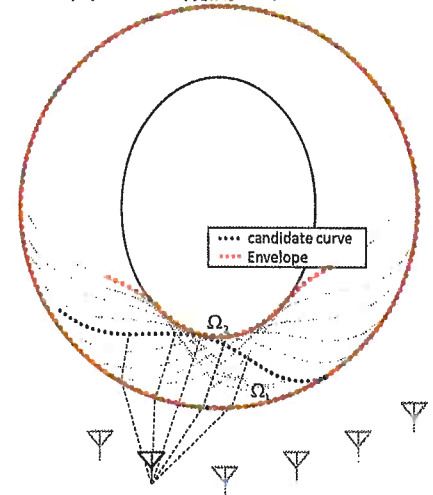


図11. 拡張Envelope法の原理

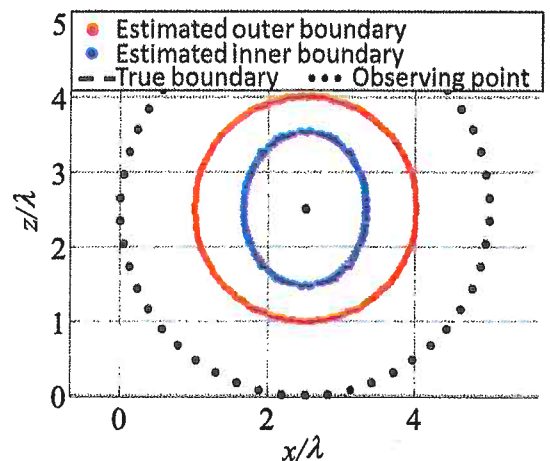


図12. 各層の誘電率推定結果を用いた各層推定図

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

④ 不均質媒質に対するRPM法とFDTD法を併用した高精度誘電率推定法

前述の①と②では、誘電率推定法では均質媒質及び層構造媒質を想定してきた。より一般的な問題に対応するためには、これを不均質媒質に拡張する必要がある。従来の不均質誘電体媒質の誘電率推定法として、Born 近似に基づいて領域積分方程式を再帰的に解く手法(BIM: Born Iterative Method) が各種提案されている。しかし、BIM 法では、被積分電界を真空と仮定した入射電界によって近似(Born 近似) するため、**真空と誘電体の誘電率のコントラストが大きい場合には、推定値が発散しその精度が大きく劣化する問題がある。** また、空間分解能を保持するには最適化変数の次元を増やす必要があり、**計算時間が膨大**となるほか、**誘電率分布が不連続となる領域では精度が保持できない**という問題を有している。

上記問題を改善するため、本稿では、RPM法 による誘電体境界推定法とレイトレーシング及びFDTD法を用いた誘電率分布推定法を提案する。本手法では、①で紹介した均質誘電媒質に対する高精度誘電率推定法で得られた推定結果を初期誘電率として用いる。ついで、誘電率分布を基底関数の線形混合で表現することで次元数を減らし、収束速度を速める。また、多次元最適化問題に対して効率的に最適解に到達可能な粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization) を導入する。透過伝搬遅延推定には、始めにレイトレーシングを導入し、最適解に近付けた後、FDTD 法に切り替え、効率的かつ高精度な誘電率推定を目指す。

図 1 3 に観測モデルを示す。誘電体内部は非分散損失性不均質媒質であるとする。無指向性送受信素子を円周上に等間隔に配置する。各送信素子からの信号を全ての素子で受信するマルチスタティックモデルを構成する。送信素子をTx、受信素子位置をRxとする。

本手法は、RPM 法により得られる誘電体境界推定結果を利用して、誘電率分布の不連続性に起因する誤差を解消する。また信号推定にレイトレーシング法及びFDTD 法の各順問題解析法(誘電率分布から受信信号を計算)を組み合わせることで効率性と精度を保持する手法を導入する。以下に手順を示す。

まずRPM 法及びEnvelope 補間法により誘電体外部境界を推定する。誘電体境界点群と素子位置との関係性から得られる各誘電体境界点の法線ベクトルを用いて①で紹介した均質誘電率推定法を適用し、平均的な誘電率を推定する。本手法では不均質誘電率分布をモデル化するために基底関数としてガウス関数を用いる。本手法では収束を速めるため、まずレイトレーシング(Ray tracing) による順問題解析法を導入する。レイトレーシングは高周波近似に基づく手法であり、連続的に変化する誘電率分布の空間勾配を計算することで伝搬パスを推定する。FDTD 法に比べ精度は低いが高速な推定が可能である。レイトレーシング法で得られる伝搬遅延量と観測遅延量を比較し、その差が最小になるように誘電率分布を更新する。最後にFDTD 法を用いて観測と推定波形の差分を最小化し、誘電率推定精度を向上させる。

数値計算による特性評価

図 1 4 に本手法で推定する真の誘電率分布を仮定する。導電率は0.001S/mで一定とする、RPM法による誘電体境界推定では送受信素子36個を等間隔に配置する。レイトレーシングでは、推定できる伝搬経路の関係上、送信素子と対称の位置の距離点のみを使用する。FDTD 法では計算時間を減らすため、4個の素子で送信し、全ての素子で受信する。

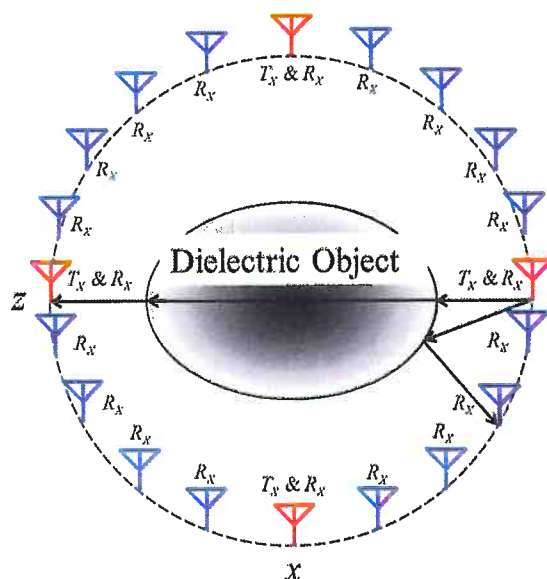


図 1 3. 観測モデル

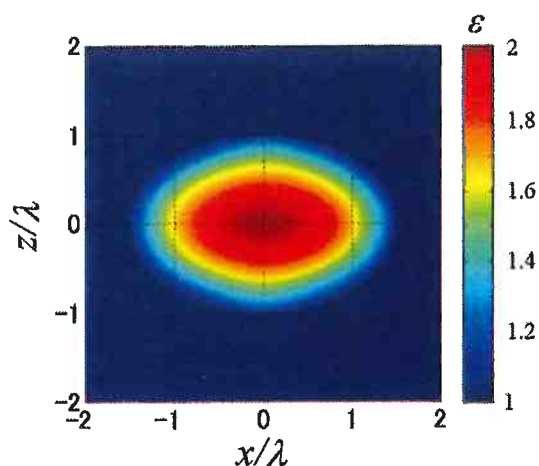


図 1 4. 真の比誘電率分布

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

図15に従来のBIM法(領域積分方程式を再帰的に解く手法)による推定結果を示す。BIMの入射電界の更新にはFDTD法を用いており、更新回数は10回である。Xeon 2.8GHz、メモリ6.0GBを用いた場合、計算時間は約25時間40分である。同図より境界及び誘電率分布が正確に推定できないことがわかる。これは同手法が初期値に真空の入射電界を用いて全電界近似するため、誘電率のコントラストが大きい場合は、解が収束せず、精度が保持できないからである。

図16にレイトレーシングとFDTD法を併用した場合(提案法)の誘電率推定分布を示す。この場合レイトレーシングの更新回数31回で計算時間は約33分、FDTD法の更新回数11回で計算時間は約8時間33分であり、合計計算時間は約9時間6分である。同図より、真の誘電率分布にほぼ近い分布を再現することが可能である。また、境界の不連続性を考慮するため、境界領域での精度劣化を抑えることができる。本手法は、②で提案する多層誘電体構造推定法と組み合わせることで更に一般的な誘電体構造推定問題へと拡張することが可能である。同手法は実験的検討を含めて、国内外の会議で発表予定であり、論文としての投稿を検討中である。

本研究成果は誘電率分布が連続及び不連続的に変化するような生体等の誘電率推定にとって有用である。RPM法は申請者が独自に構築した手法であり、この特徴を積極的に利用した誘電率分布推定法は、本研究が初めてである。同性能は従来手法に比べて、計算速度・再現精度・不連続性の考慮等の複数の点において

本質的なアドバンテージを有しており、当該分野で注目を集める手法であると確信する。

また現段階では単一のPCでの計算時間が10時間弱必要であるが、将来的にはクラウドによる大規模並列演算、データ解析等によって計算時間を早めることが可能になると考え、これに対する検討も実施する予定である。

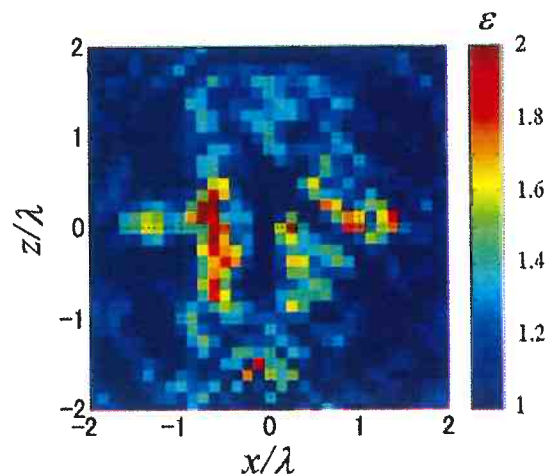


図15. BIM法による推定結果

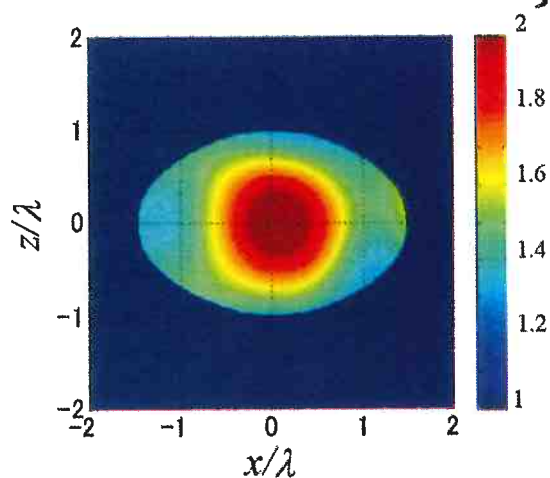


図16. 提案法による推定結果

3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、超広帯域レーダを用いた超分解能・高精度誘電体内部推定法に関する基礎研究を実施した。従来の精度を超えるために、独自に開発した RPM 法を内部画像化へ拡張し、**送信波長の 1/100 規模の内部目標境界推定精度**を達成する手法を新たに構築した。更に、同手法の精度を保持させるために、幾何光学近似と FDTD 法による順問題解析に基づく高精度誘電率推定法も併せて提案した。同手法は従来精度の保持が難しかった、誘電体目標が波長規模の大きさかつ任意の形状に対して、**相対誤差 3% 程度の誘電率推定**を達成することが可能となった。この精度は、逆問題解析分野では、実施者が知る限り未だ達成されていないレベルの精度であり、当該分野に大きなインパクトを与えられると予測する。また同手法の実験的検証を実施し、コンクリート試供体の中にアルミ円柱を埋め込んだ目標モデルを用いて、コンクリートの形状位置情報等を全く用いずに、本手法が 1/100 波長の内部目標境界推定精度及び高精度誘電率推定が可能となることを実証した。

更に一般的な観測対象に適用範囲を広げるため、**複数層構造誘電体**目標及び連続的に誘電率分布が変化する**不均質媒質**に対する誘電率及び誘電率分布推定法を提案し、数値計算により高精度な誘電率推定が従来に比して極めて軽い計算負荷で達成可能となることを示した。一方、本研究が当初想定していた偏波を利用した目標の特徴抽出に関しては、人的・時間的制約からその検討を十分に実施することができなかった。これに関しては今後の課題となり、偏波のみならず散乱周波数特性も積極的に利用した目標識別法を検討していきたい。

本年度の研究成果は、論文誌に 2 件（1 件は投稿中）、国際会議 3 件（2 件は予定）、国内会議 2 件（済）であり、単年度の成果としては当初の予想を超える研究成果が得られたと評価する。また、同成果を含めた業績に対して、「船井学術賞」、「文部科学大臣表彰 若手科学者賞」等が与えられており、非常に高い学術的評価を得ている。また同研究課題に関する競争的資金を、科研費（若手研究 A）、総務省（SCOPE 若手 ICT 研究者等育成型研究開発）及び複数の財団から、新たに獲得しており、総額 2100 万円（貴財団助成を除く）に上るなど、その将来性が高く評価され、社会産業分野での発展が期待されている。今後は、同技術の社会展開をめざし、産学官連携を念頭に同技術の実用化に向けての研究を推進する。具体的には国土交通省が実施している非破壊検査データに対して、本研究で開発する手法を適用し、従来手法との比較検討を行うことや、総務省からの資金により非侵襲生体計測に関する実験内容を充実させ、各種の改良及び他の技術との融合等により、革新的内部計測技術を創出するために一層の努力を続ける予定である。

最後に本研究課題の基礎段階からその可能性に着目し、多額の研究助成を頂戴した貴財団に心より謝意を表す。

4 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

本研究で構築した画像化原理は波長に対する普遍性を有するため、**他の波長帯(ミリ波・テラヘルツ波等)や超音波計測にも応用可能**であり、特に以下の応用分野で重要な産業、社会的貢献をなすと考える。

・非破壊計測(地震災害後の高速道路・原子炉内破損探知等)への拡張

マイクロ波帯の電磁波は、ミリ波等に比べて誘電体透過性に優れるために、道路・橋等のコンクリート内部の亀裂探知や腐食検知に有望である。しかし、低周波長及び帯域制限があるため、従来手法での空間分解能は高々5cmである。本手法で構築した新たな内部画像化手法を用いることにより、これの5倍の分解能及び1mm程度の再現精度が達成されると予測され、「大規模災害に対する**次世代防災・復旧センサ**」の創出に大きな貢献をもたらすと予測する。

・非侵襲生体計測(癌細胞(正常細胞と誘電率が異なる)検知等の医療診断応用)

また、UWB レーダは乳癌の早期発見等の医療診断応用として有望である。本研究で開発する技術は、特に人体等の多層誘電体構造の内部計測において、既存技術の分解能・精度・画像化再現範囲を著しく高めるものであり、同性能が達成されれば、**同癌細胞の検知性能等が飛躍的に向上するもの**と予測する。本研究の発展により、同技術の性能が大幅に改善されれば、革新的医療診断応用技術として、社会・経済面において極めて重大な貢献をもたらすと予測する。

2. 学術的価値

本研究の中核となるレーダ理論(RPM法, 多重散乱波合成)は、先の従来技術(SAR, 時間逆伝搬法)とは全く異なる原理に基づき、**独創性・有用性が極めて高い**。特に報告者が提案したRPM法は、従来技術の再現精度・空間分解能・処理速度等に関する**複数の問題点を一気に解決し**、多様な計測モデル(多点送受信モデル等)に容易に拡張できるため、完成度が高い。実験検証も含めた同成果は、その独創性・有用性が高く評価され、同分野のTop Journal(IEEE等)に多数掲載されており、文部科学大臣表彰 若手科学者賞や多数の論文賞を受賞している。また、上記性能は、**逆散乱問題分野の常識を覆すレベルの性能**であり、Ilmenau工科大学, Duisburg-Essen大学, Ulm大学(ドイツ), Delft工科大学(オランダ)等の複数の研究機関で、RPM法の原理に基づく立体レーザセンサの拡張研究が進められている(被論文引用件数の総数: 120件, ISI Web of Science調べ)。

超分解能内部画像化を目的とした本研究では、上記のRPM法を同問題に適切に拡張し、その特徴を最大限に生かすことで、従来を超える分解能と精度を達成することができた。今後、多重散乱波や偏波解析等を導入することで、更に既存の内部画像化の枠を超えた研究展開が見込まれ、幅広い学術的波及効果が期待できる。また、本研究で構築する内部画像化理論は、原理的に**全ての波長帯(ミリ波・テラヘルツ波等)に応用可能**であり、**広範な拡張性及び普遍性**を持ち、 μ ・ナノスケールでの超微細内部構造計測等への応用展開も可能であり、計測工学分野において多様な研究展開を創出する可能性があると考えられる。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

学術論文

[1] Toshiki Manaka, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto,
"Experimental Study on Dielectric Constant and Buried Object Boundary Estimation Method for UWB Radars", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, (under review).

[2] Ryunosuke Souma, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto,
"Accurate Permittivity Estimation Method for 3-dimensional Dielectric Object with FDTD-based Waveform Correction", *IEICE Trans. Electron.*, E97-C, no.2, pp. 123-127, Feb., 2014.

国際会議論文

[1] Toshiki Manaka, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto,
"Accurate Permittivity Estimation Method for Double-layered Dielectric Object for UWB Radars"
2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), Taiwan, Dec, 2014 (投稿中)

[2] Takuya Niimi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto,
"EXPERIMENTAL STUDY ON ACCURATE PERMITTIVITY ESTIMATION METHOD FOR UWB
INTERNAL IMAGING RADAR"
2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), Taiwan, Dec, 2014 (投稿中)

[3] Ryunosuke Souma, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto,
"Accurate Permittivity Estimation Method for 3-dimensional Dielectric Object with Iterative
Correction of Waveform Deformation," 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar
(APSAR), Tsukuba, Japan, September, 2013.

国内会議論文

[1] 新實 琢哉、木寺 正平、桐本 哲郎、
"UWBレーダのための複数誘電層媒質の高精度誘電率推定法"
電子情報通信学会 総合大会、C-1-13、新潟大学、Mar. 2014.

[2] 真中 俊輝、木寺 正平、桐本 哲郎、
"UWBレーダによる誘電体内部画像化のための高精度誘電率推定法の実験的検討"
電子情報通信学会 総合大会、C-1-14、新潟大学、Mar. 2014.