

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 博士前期課程		
氏 名	新實 琢哉	学籍番号	1332054
論 文 題 目	UWB 内部画像レーダのための拡張 Envelope 法を用いた二層誘電体境界推定法		
<p style="text-align: center;">要 旨</p> <p>近年、誘電体内部計測技術としてUWB (Ultra wide-band) レーダが注目されている。従来の技術では、コンクリート中に埋設する物体や亀裂等の異常を感知する非破壊検査や、乳癌等の非侵襲生体計測といった誘電体内部計測として、X線や超音波を用いた手法が利用されている。しかし、X線では、放射線被爆、超音波では接触計測が必要であるという各種の制限がある。そこで、高分解能と高い誘電体内部透過性といった特徴を持つ、UWBパルスレーダを用いた内部画像化技術が期待される。既に、高精度内部画像化手法として、RPM (Range Points Migration) 法の原理を拡張した手法が提案されている。同手法は、誘電体境界推定点及び同法線ベクトルを用いて、幾何光学近似に基づいて伝搬経路を決定し、内部の目標境界を再現する手法である。しかし、同手法の再現精度は、対象の誘電率に依存する。実際の測定においては、内部画像化の精度を維持するためには正確に誘電率を推定する必要がある。従来の誘電率推定法には、領域積分法方程式に基づく手法や壁透過レーダを想定した手法が各種提案されている。しかし、前者は層構造を持つ誘電体に対して精度が劣化し、かつ膨大な計算量を必要とする問題点を有する。また後者では、誘電体が直方体等の単純な形状に限定され、かつ位置や形状が既知であるという仮定に基づくため、実用性が低い。</p> <p>これらの問題を解決するため、任意の誘電体外部境界に対応する、高速高精度の誘電率推定法が提案されている。同手法ではまず、RPM法により誘電体境界と同法線ベクトルを推定する。これらの情報を用いて、幾何光学近似により内部伝搬経路と遅延量を推定し、観測遅延量との差分を最小化することで誘電率を求める。しかし、同手法は単一誘電層を想定するため、人体の皮膚や脂肪等の層構造を持つ誘電体に対応しない。上記問題点を解決するために、本論文では、二層誘電層媒質を想定し、拡張Envelope法を提案する。推定された誘電体外部及び内部層とその法線ベクトルから、従来法と同様に、幾何光学近似により伝搬経路及び遅延を求める。観測遅延量と推定遅延量の差分を最小化することで、最適な各層の誘電率を同時に求める。数値計算及び実験による性能評価により、提案法の有効性を示す。</p>			

平成26年度修士論文

UWB 内部画像レーダのための  
拡張 Envelope 法を用いた二層誘電体境界推定法

学 籍 番 号     1332054

氏            名     新實 琢哉

知能機械工学専攻     電子制御システムコース

指 導 教 員     桐本 哲郎   教授

副指導教員     稲葉 敬之   教授

提 出 日        平成27年 2月 27日

## 概要

近年、誘電体内部計測技術として UWB(Ultra wide-band) レーダが注目されている。従来の技術では、コンクリート中に埋設する物体や亀裂等の異常を感知する非破壊検査や、乳癌等の非侵襲生体計測といった誘電体内部計測として、X線や超音波を用いた手法が利用されている。しかし、X線では、放射線被爆、超音波では接触計測が必要であるという各種の制限がある。そこで、高分解能と高い誘電体内部透過性といった特徴を持つ、UWB パルスレーダを用いた内部画像化技術が期待される。既に、高精度内部画像化手法として、RPM(Range Points Migration) 法の原理を拡張した手法が提案されている。同手法は、誘電体境界推定点及び同法線ベクトルを用いて、幾何光学近似に基づいて伝搬経路を決定し、内部の目標境界を再現する手法である。しかし、同手法の再現精度は、対象の誘電率に依存する。実際の測定においては、内部画像化の精度を維持するためには正確に誘電率を推定する必要がある。従来の誘電率推定法には、領域積分法方程式に基づく手法や壁透過レーダを想定した手法が各種提案されている。しかし、前者は層構造を持つ誘電体に対して精度が劣化し、かつ膨大な計算量を必要とする問題点を有する。また後者では、誘電体が直方体等の単純な形状に限定され、かつ位置や形状が既知であるという仮定に基づくため、実用性が低い。

これらの問題を解決するため、任意の誘電体外部境界に対応する、高速高精度の誘電率推定法が提案されている。同手法ではまず、RPM 法により誘電体境界と同法線ベクトルを推定する。これらの情報を用いて、幾何光学近似により内部伝搬経路と遅延量を推定し、観測遅延量との差分を最小化することで誘電率を求める。しかし、同手法は単一誘電層を想定するため、人体の皮膚や脂肪等の層構造を持つ誘電体に対応しない。上記問題点を解決するために、本論文では、二層誘電層媒質を想定し、拡張 Envelope 法を提案する。推定された誘電体外部及び内部層とその法線ベクトルから、従来法と同様に、幾何光学近似により伝搬経路及び遅延を求める。観測遅延量と推定遅延量の差分を最小化することで、最適な各層の誘電率を同時に求める。数値計算及び実験による性能評価により、提案法の有効性を示す。

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的	2
<b>2</b>	<b>UWB レーダを想定した画像化手法</b>	<b>3</b>
2.1	各種の画像化手法	3
2.1.1	近傍界合成開口処理 (SAR)	3
2.1.2	RPM 法	5
2.2	誘電体内部画像化手法	7
2.2.1	拡張 SAR を用いた内部画像化手法	7
2.2.2	ビームフォーミング法	9
2.2.3	RPM 法の原理を拡張した内部目標画像化手法	11
2.3	誘電率推定法	14
2.3.1	領域積分方程式の数値解析に基づく手法	14
2.3.2	壁透過レーダを用いた誘電率推定法	16
2.3.3	単層誘電層媒質の高精度誘電率推定法	19
<b>3</b>	<b>二層誘電媒質に対する誘電率及び各層境界推定法</b>	<b>24</b>
3.1	システムモデル	24
3.2	各層境界推定の原理	27
3.3	誘電率推定の原理	30
3.4	提案法の処理手順	31
3.5	数値計算による性能評価	33

<b>4</b>	<b>実験データによる性能評価</b>	<b>38</b>
4.1	実験緒元 . . . . .	38
4.2	バイスタティック型 RPM 法の導入 . . . . .	40
4.3	性能評価 . . . . .	41
4.3.1	二層構造誘電体 . . . . .	41
4.3.2	空洞構造誘電体 . . . . .	46
<b>5</b>	<b>結論</b>	<b>52</b>
	謝辞	53
	参考文献	53

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

コンクリート中の埋設物に生じる亀裂，異常を発見するための非破壊検査や，人体内部の癌細胞を非侵襲的に探知可能な機器として，様々な計測装置が開発されている．例えば，乳癌検知を挙げると，X線マンモグラフィ・超音波エコー・核磁気共鳴画像法 (MRI:Magnetic Resonance Imaging) が考えられる．しかし，X線マンモグラフィは被験者の乳房を圧迫するため，痛みを伴う場合がある [1]．また，放射線被曝を受ける可能性があるため，短期間で複数回検査を行うことが出来ないと問題がある [2]．超音波は，X線と比較して無害であるが，伝搬媒質の密度に影響を受けやすく，高周波が減衰するため分解能に制限があり，小さな石灰化の発見が困難となる [3]．MRIは，あらゆる角度から乳房の断面図を撮影するため，しこりの位置が比較的正確に特定できるが，大型装置を必要とし，計測機器が極めて高価であるという欠点をもつ [4]．

上記問題を解決するために，UWB(Ultra Wideband) パルスレーダを用いた内部画像化技術が近年注目されている [5]．レーダは電波を送信器より放射し，目標からの反射した波や透過した波を受信するまでの時間を測定することで，目標の探知や距離を測定するものである．UWBパルスレーダは帯域 20% 以上若しくは帯域幅 500MHz 以上と定義される超広帯域信号を利用するレーダのことで，数 cm ～ 数 mm の高分解能と高い誘電体内部透過性の特性を持つ．この特性を生かし，コンクリート内のクラッタや亀裂検出といった非破壊検査や乳癌検知等の非侵襲生体計測

の内部計測技術への応用が挙げられる。また、災害現場における救助用ロボットへの搭載や室内での空間計測といった近距離計測での応用が期待される。

同レーダを用いた内部画像化手法として、合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) や MIST (Microwave Imaging via Space-Time beamforming), 時間逆伝播法 (TR: Time Reversal) 等手法が各種提案されている [6]-[8]。しかし、上記手法からは外部誘電体の先見情報が必要となる。同問題を解決するため、高精度内部目標画像化手法として、RPM (Range Points Migration) [9] による高精度誘電体境界推定及び同法線ベクトルを用いる伝搬経路推定に基づく手法が提案されている。同手法は、幾何光学近似に基づいた伝搬経路推定を行い、目標からの距離情報より決定する目標候補点の密集度を評価することで、高精度な内部目標推定を可能にする。しかし、同手法は、誘電体の誘電率が既知であることを前提とする。そのため、誘電率推定法との併用が不可欠となる。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や、壁透過レーダを想定した手法があるが、計算量が膨大であり、複雑な形状に対応していない等の問題点を有する。これらの問題を解決するために単層誘電媒質のための誘電率推定法が提案されたが、複数層誘電体から構成されるモデルに対応する誘電率推定が必要となる。

### 1.2 目的

本論文では、人体等の皮膚や脂肪等といった複数層構造の誘電体を想定し、任意境界を持つ誘電体に対して、高精度の各層の誘電率及び境界を推定する手法の実現を目的とする。上記目的の達成のために、RPM 法及び Envelope 法による誘電体外部層境界点と拡張 Envelope 法による内部層境界推定点及び同法線ベクトルを用いて、幾何光学近似に基づいた各層誘電体内を透過する伝搬遅延推定により、各層の同時誘電率推定を実現する手法を提案する。数値計算及び実験によって、本手法の有効性をそれぞれにおいて示す。

## 第 2 章

# UWB レーダを想定した画像化手法

本章では，UWB レーダを用いた誘電体外部境界画像化手法及び，誘電体内部境界画像化手法について示す．また，同内部画像化手法に必須とされる誘電率推定について説明し，同手法の特徴と問題点を述べる．

### 2.1 各種の画像化手法

本節では，誘電体外部境界を推定する手法として，近傍界合成開口処理 (SAR) 及び RPM 法について説明する．

#### 2.1.1 近傍界合成開口処理 (SAR)

レーダ画像化手法の一つとして，合成開口処理 (SAR: Synthetic Aperture Radar)[17] が提案されている．通常，レーダは強度のみを観測するため，素子の大きさに分解能が依存してしまう．しかし，本手法では，レーダを直線上に走査させながら，各観測位置毎に電波を放射させて目標からの反射波を受信し，反射信号の強度と位相を観測する．そして，同一対象物を観測した反射波に位相を足し合わせることで，小型なアンテナにおいても仮想的に大型のアンテナで観測したものと等価となり，仮想レーダと同等の分解能を得ることができる．また，電波は誘電体内の透過性をもつため，光学画像では取得できない夜間や雨雲等が存在する環境下においても，波長など最適なパラメータを選択をし，高分解能のレーダ画像を生成することができる．そのため，衛星や航空機に搭載することで，地表面計測，環境・資源調査や

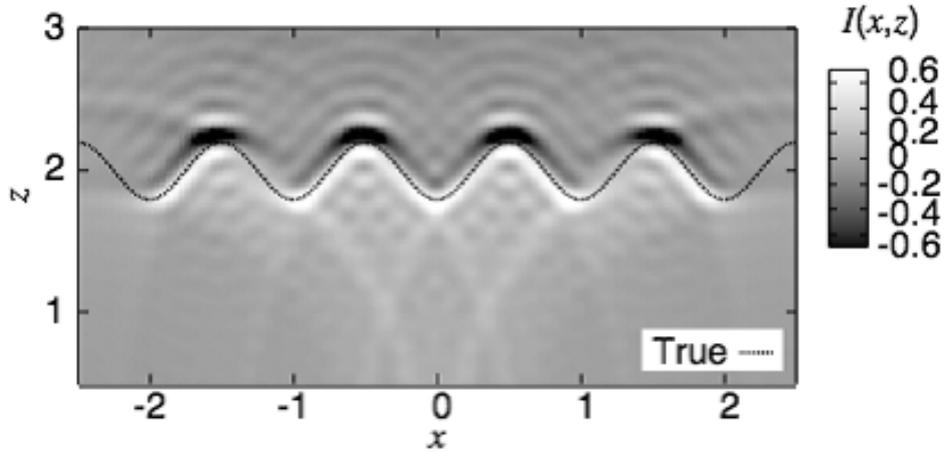


図 2.1: 合成開口処理による目標境界推定像 (出典 : Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections)

海洋監視といった様々な分野に利用されている。また一方で、同一目標を異なる位置で観測し、2つのレーダ画像を干渉して距離位相差を利用し、高度や変動量を求める干渉合成開口処理 (InSAR: Interferometric SAR)[17] や、素子を固定して移動目標のレーダ画像を取得する逆合成開口処理 (ISAR: Inverse SAR)[18]、観測対象物によって散乱した偏波特性の変化から対象物の構造の特徴量を求めるポラリメトリック SAR (PolSAR: Polarimetric SAR)[19] といった応用技術が挙げられる。これらの技術は、衛星や航空機に搭載するための遠方界を想定した手法とされている。

次に UWB パルスレーダを想定した近傍界での合成開口処理の原理について説明する。無指向性素子及び目標が存在する画像空間を  $\mathbf{r} = (x, z)$  とすると、目標画像は素子位置  $(X, 0)$  を中心、観測距離  $R$  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得られる。同画像  $I(\mathbf{r})$  は次式で求める。

$$I(\mathbf{r}) = \int_{X \in \Gamma} s\left(X, \sqrt{(x - X)^2 + z^2}\right) dX \quad (2.1)$$

但し、 $\Gamma$  は素子走査領域であり、 $s(X, R)$  は Wiener フィルタ通過出力であり、 $R = ct/2$  である。目標境界は  $I(\mathbf{r})$  の強度が卓越する部分より抽出可能である。

図 2.1 に合成開口処理による目標境界推定像の例を示す。同手法は強い雑音耐性を持っており、また、複雑境界目標に対して安定した画像を生成できる。しかし、分解能が波長で制限され、観測距離  $R$  の同心円上に信号強度を空間積分するため、得られる画像は空間的に広がりを持った状態となり、明瞭な境界面を再現できない、かつ対象空間全ピクセル毎での演算が必要となるため、膨大な処理量が必要とする問題点を有する。

### 2.1.2 RPM 法

前節の処理時間及び分解能の問題を解決する手法として、RPM(Range Points Migration) 法 [9] がある。本手法は、高速・高精度の境界推定法であり、微分演算や距離点群の連結を必要としない、距離情報のみを用いた境界抽出を可能にする。目標境界からの散乱波の到来角度を推定することで、目標境界点の位置を決定する。以下、本手法の原理について説明する。

本手法は、素子位置を中心、観測距離を半径とする円周上に目標境界が存在するという原理に基づいている。そこで、円交点の密集度を評価することで、目標境界点の位置を決定する。素子位置  $(X, 0)$  における観測距離を  $R$  とする。そのときの距離点を  $(X, 0, R)$  と定義する。注目する距離点  $(X, 0, R)$  で表わされる円と任意の距離点  $(X_i, 0, R_i)$  で表わされる円の交点を推定し、その角度を  $\theta(\mathbf{q}, \mathbf{q}_i)$  とする。それぞれの散乱波の到来角  $\theta$  に対し、次式のメンバシップ関数を定義する。

$$f(\theta; \mathbf{q}, \mathbf{q}_i) = \exp \left\{ -\frac{(\theta - \theta(\mathbf{q}, \mathbf{q}_i))^2}{2\sigma_\theta^2} \right\} \quad (2.2)$$

但し、 $X \neq X_i$  であり、 $\sigma_\theta$  は定数である。注目素子に近づけていくと真の到来角交点に収束する。交点の軌道と目標境界の関係を図 2.2 に示す。この関係から評価関数  $F(\theta; \mathbf{q})$  を次式で定義できる。

$$F(\theta; \mathbf{q}) = \left| \sum_{i=1}^{N_R} s(\mathbf{q}_i) f(\theta; \mathbf{q}, \mathbf{q}_i) \exp \left\{ -\frac{(X - X_i)^2}{2\sigma_X^2} \right\} \right| \quad (2.3)$$

但し、 $\sigma_X$  は定数であり、 $N_R$  は  $X \neq X_i$  における距離点の総数である。同式右辺の関数  $\exp \left\{ -\frac{(X - X_i)^2}{2\sigma_X^2} \right\}$  は、2 円の交点の角度が素子間隔が短くなるにつれて、真の

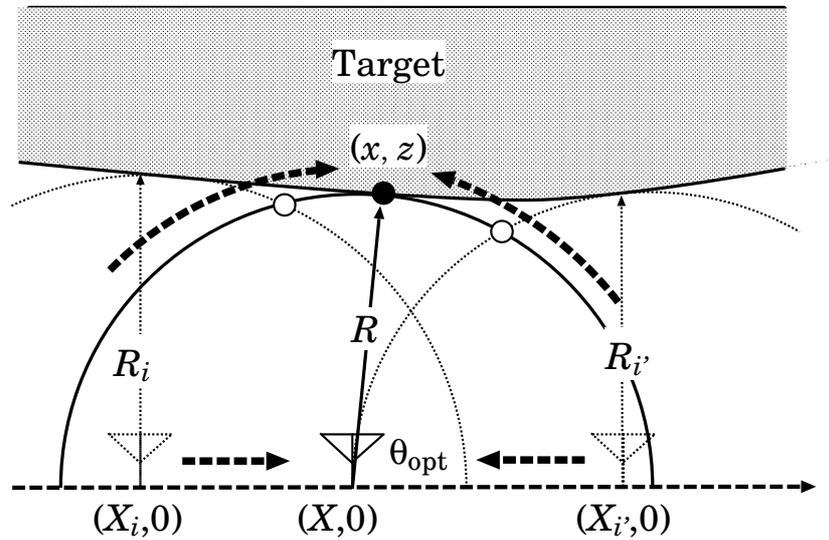


図 2.2: 交点の軌道と目標境界の関係

到来角度に近づくことを示している．式 (2.3) を用いて，各距離点群  $(X, R)$  に対する到来角度  $\theta_{\text{opt}}$  を次式で求める．

$$\theta_{\text{opt}} = \arg \max_{\theta} F(\theta; \mathbf{q}) \quad (2.4)$$

式 (2.4) より推定される到来角度  $\theta_{\text{opt}}$  を用いて，次式から各距離点に対する目標境界を求める．

$$\left. \begin{aligned} x &= X + R \cos \theta_{\text{opt}} \\ z &= R \sin \theta_{\text{opt}} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

図 2.3 に同手法による目標境界推定の例を示す．但し， $\sigma$  は経験的に決定する．本手法は，各々の推定点において目標境界を推定するだけでなく，到来方向推定を行うことで同法線ベクトルを再現するといった特徴をもつ．目標境界を点群で再現するため，前節の SAR と比較して，目標境界を高精度に推定出来ることが確認できる．

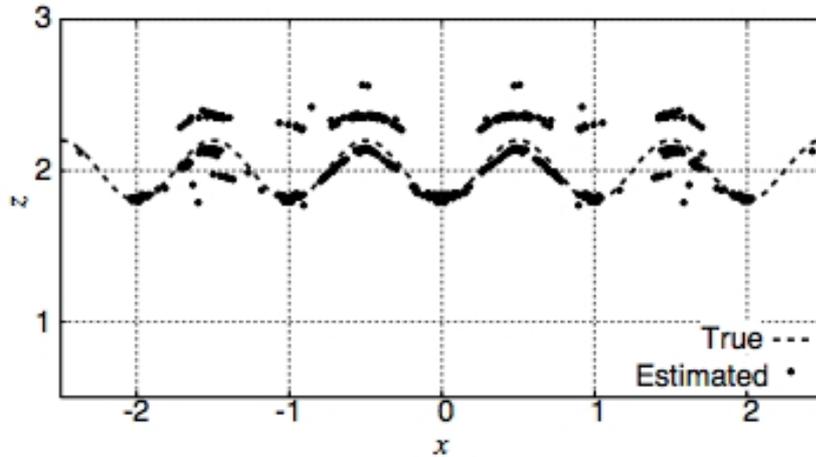


図 2.3: RPM 法による目標境界推定像 (出典 : Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections)

## 2.2 誘電体内部画像化手法

本節では，誘電体内部目標推定法として，拡張 SAR を用いた内部画像化手法，ビームフォーミング法，RPM 法の原理を拡張した内部目標画像化手法について説明する．

### 2.2.1 拡張 SAR を用いた内部画像化手法

本節では，誘電体内部画像手法として，SAR の原理を内部目標推定へと拡張した手法について説明する [10]．本手法は，前節で示した RPM 法と SAR を併用した多重散乱波合成開口処理法を内部画像化へと拡張した手法である．誘電体境界推定像に RPM 法の推定結果を利用し，誘電体内部での伝搬減衰を考慮して受信信号の空間積分によって内部目標を再現する．以下，本手法の原理を示す．

図 2.4 のようなシステムモデルを仮定し，空間座標を  $\mathbf{r} = (x, z)$  とする．送受信素子を  $x$  軸上で直線に走査して目標を観測する．各素子位置での受信信号について Wiener フィルタを適用した出力の最大応答である第一到来波に対応する距離点群  $\mathbf{q}_{S,j} = (X_{S,j}, R_{S,j}), (j = 1, \dots, N_S)$  とする．同距離点群に対して RPM 法を適用する

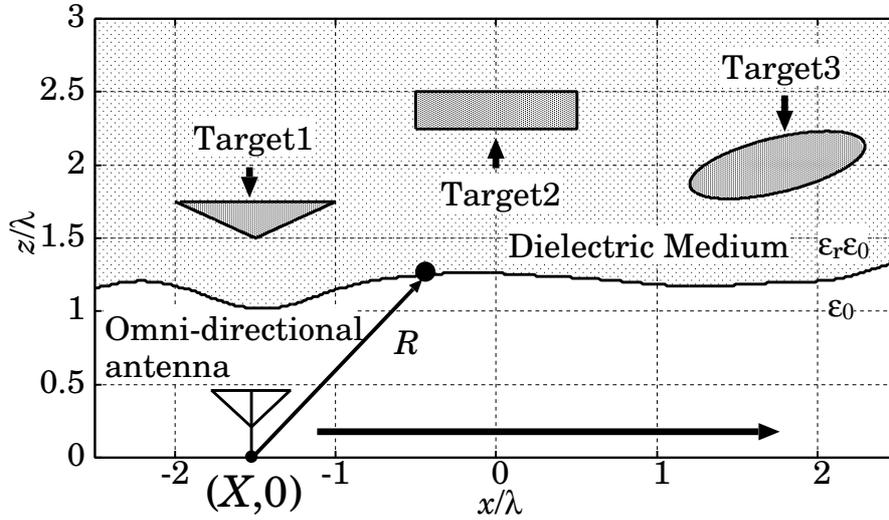


図 2.4: 拡張 SAR におけるシステムモデル

ことで、誘電体境界点群  $\mathbf{r}_{S,j} = (x_{S,j}, z_{S,j})$  を得る．ここで、各境界点群を入射点として SAR の原理に基づく内部目標画像  $I(\mathbf{r})$  は次式で定義される．

$$I(\mathbf{r}) = \int_{X \in \Gamma} \sum_{j=1}^{N'_S} s(\mathbf{q}_{S,j}) s(X, d_2(X, \mathbf{r}, \mathbf{r}_{S,j})) dX \quad (2.6)$$

但し、 $\Gamma$  は観測領域、 $d_2(X, \mathbf{r}, \mathbf{r}_{S,j})$  は誘電体内伝搬遅延を考慮した距離であり、 $d_2(X, \mathbf{r}, \mathbf{r}_{S,j}) = \sqrt{(X - x_{S,j})^2 + z_{S,j}^2} + \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{(x - x_{S,j})^2 + (z - z_{S,j})^2}$  である． $\epsilon_r$  は、誘電体内の比誘電率である．同手法は、 $\epsilon_r$  が既知である条件下では、外部誘電体及び内部目標の境界の先験情報を必要とせず、内部目標に対し雑音による影響を抑えた安定した画像化を実現する．図 2.5 に本手法を適用した推定像  $I(\mathbf{r})$  を示す．但し、内部目標物の導電率は  $1.0 \times 10^6 \text{S/m}$  であり、誘電体内部の比誘電率は 5.0、導電率は  $1.0 \times 10^{-2} \text{S/m}$  である．また、素子走査域は  $-2.5\lambda \leq X \leq 2.5\lambda$  であり、等間隔で 101 点の素子で受信信号を雑音を考慮しない環境で取得している．同画像は最大強度によって正規化されている．同図より、誘電体内の各目標物体に対してその下面に有意な推定画像が得られていることが確認できる．しかし、推定像では誘電体境界の外部に虚像が生じるという問題を有する．これは、合成開口処理がその原理として、誘電体境界点を中心とした伝搬距離を半径とする同心円上で、各受信

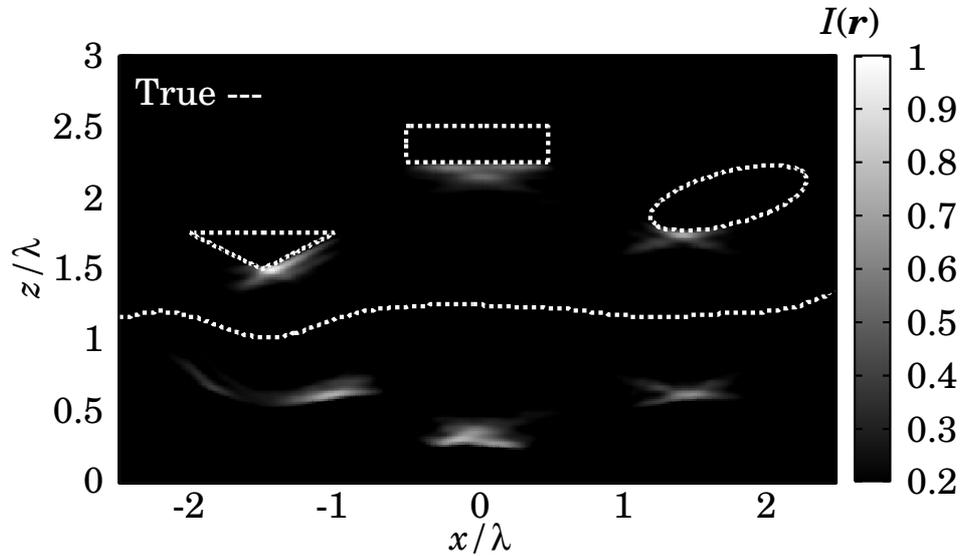


図 2.5: 拡張SARによる目標境界推定像 (出典: Accurate and Nonparametric Imaging Algorithm for Targets Buried in Dielectric Medium for UWB Radars)

信号強度を空間積分しているためである．さらに，Xeon 2.40GHz プロセッサを用いた場合，上記条件下において，処理時間は約 1000 秒 (複数目標) を要する．同手法は，全ピクセルにおいて受信信号を空間積分するため，膨大な計算量になる問題を有する．

### 2.2.2 ビームフォーミング法

本節では，誘電体内部画像手法として，MIST(Microwave Imaging via Space Time) 法を説明する．同手法は，受信信号に含まれる誘電体からのクラッタを抑圧し，MIST ビームフォーミング法によって誘電体内部目標の画像化を行う手法である．以下，本手法の原理を示す．図 2.6 にシステムモデルを示す． $N$  個の送受信素子を外部誘電体から等距離になるように配置する．各素子位置での受信信号には内部目標からの散乱波及び外部誘電体からの不要波が得られる．同不要波は振幅強度が大きく，内部目標の位置によっては推定精度に大きく影響を与える場合もある．各素子における受信信号の同時間に不要波が検出される特徴を利用して不要波を抑

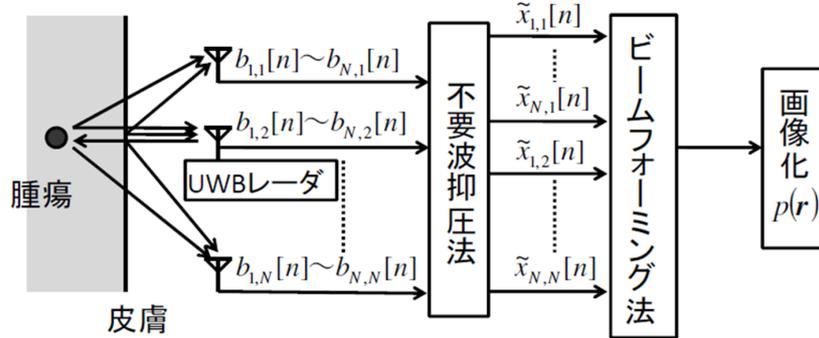


図 2.6: MIST ビームフォーミングシステムモデルと処理手順

圧する．受信信号  $b_1[n]$  の不要は抑圧後の信号  $x_1[n]$  は次式で求められる．

$$x_1[n] = b_1[n] - \mathbf{q}^T \mathbf{b}_{2N}[n] \quad (2.7)$$

ただし， $\mathbf{q}$  は振幅を  $b_1[n]$  に揃えるための最適化フィルタ係数であり， $\mathbf{b}_{2N}[n]$  は  $b_1[n]$  以外の全ての受信信号である．またビームフォーミング法は，各ピクセル位置までの伝播遅延時間を考慮し，全ての信号を加算するビームフォーミング処理を行う．同処理によって目標物体のあるピクセルにおいて膨大な散乱エネルギー  $p$  を出力させる手法である．出力  $p$  は以下の式で表される．

$$p(\mathbf{r}_0) = \sum_n z[n] h[\mathbf{r}_0, n]^2 \quad (2.8)$$

ただし， $z[n] = \sum_{i=1}^N x_i[n] \mathbf{w}_i^T$  であり，伝搬速度の周波数特性による波形歪みを FIR フィルタ  $\mathbf{w}$  で補正した信号  $x_i$  の和であり， $h[\mathbf{r}_0, n]$  は不要波除去のための窓関数である．乳癌検知の場合における皮膚と腫瘍を同手法を用いた推定像が図 2.7 となる．同図より，数 mm の腫瘍を検知できることが確認される．しかし，同手法では半波長程度の分解能のため，小さい腫瘍を検知することが難しい．また，素子と誘電体境界面を等距離に配置し，信号の類似度から不要波の抑圧を行うため，外部誘電体境界の先験情報が必要なる問題を有する．

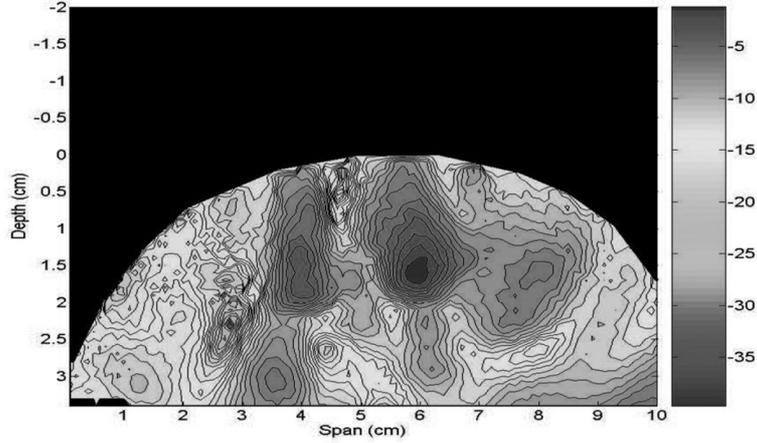


図 2.7: MIST ビームフォーミングによる推定像

### 2.2.3 RPM 法の原理を拡張した内部目標画像化手法

前節の内部画像化手法の問題を解決する手法として、RPM 法の原理を拡張した誘電体内部画像化手法が提案されている [11]。同手法は、誘電体の境界推定に用いる RPM 法の原理を内部目標に対応する距離点に対して拡張することで、任意境界に対応した高速かつ高精度な内部画像化を実現する。以下に同手法の内部目標画像化の原理を示す。

前節の図 2.4 と同様のシステムモデルを仮定する。誘電体境界については、受信信号の最大応答である第一到来波に対応する距離点群  $\mathbf{q}_{S,j} = (X_{S,j}, R_{S,j})$ , ( $j = 1, \dots, N_S$ ) を抽出し、RPM 法を適用することで、誘電体の境界推定点群  $\mathbf{r}_{S,j} = (x_{S,j}, z_{S,j})$  を得る。第一到来波以降の全距離点群を  $\mathbf{q}_{M,i} = (X_{M,i}, R_{M,i})$ , ( $i = 1, \dots, N_M$ ) とする。各誘電体境界推定点と RPM 法の基準となる素子位置との関係が法線ベクトル  $\mathbf{e}_{N,j} = ((X_{S,j} - x_{S,j}), -z_{S,j}) / R_{S,j}$  を満たすことを用いて、内部目標の推定を行う。外部誘電体境界上の推定点はスネル則に基づき、 $\mathbf{q}_{M,i}$  に対応する内部目標境界点の候補点を次式で推定する。

$$\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}) = \mathbf{r}_{S,j}(\mathbf{q}_{S,j}) + \frac{(R_{M,i} - R_{1,j}(\mathbf{q}_{M,i})) \mathbf{e}_{T,j}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

但し、 $R_{1,j}(\mathbf{q}_{M,i}) = \sqrt{(X_{M,i} - x_{S,j})^2 + z_{S,j}^2}$ ,  $\mathbf{e}_{T,j} = R(\theta_T)(-\mathbf{e}_{N,j})$  である。ここで、

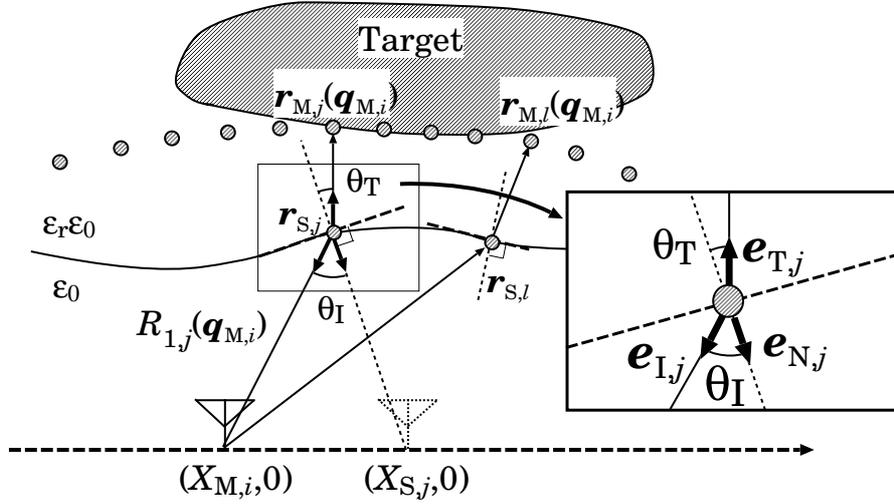


図 2.8: 誘電体境界上における誘電体境界点と内部目標の候補点の関係

$R(\theta)$  は回転行列であり,  $\theta_T = \sin^{-1}(\sin \theta_I / \sqrt{\epsilon_r})$ ,  $\theta_I = \cos^{-1}(\mathbf{e}_{N,j} \cdot \mathbf{e}_{I,j})$  である. 但し,  $\mathbf{e}_{I,j} = ((X_{M,i} - x_{S,j}), -z_{S,j}) / R_{1,j}(\mathbf{q}_{M,i})$  であり, 誘電体境界推定点  $\mathbf{r}_{S,j}$  から素子位置  $(X_{M,i}, 0)$  へのベクトルを示す. 図 2.8 に内部目標の候補点  $\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i})$  と誘電体境界点との関係を示す. 本手法は, 真の散乱点が  $\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i})$  のいずれかに存在すると仮定する.  $\mathbf{q}_{M,i}$  に対応する内部目標の推定点  $\hat{\mathbf{r}}_M(\mathbf{q}_{M,i})$  を求めるために, メンバシップ関数  $f(\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}), \mathbf{q}_{M,k})$  を以下で与える.

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}), \mathbf{q}_{M,k}) &= \exp\left(-\frac{\min_{1 \leq l \leq N'_s} |\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}) - \mathbf{r}_{M,l}(\mathbf{q}_{M,k})|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

但し,  $\sigma_r$  は定数である. 内部目標の候補点  $\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i})$  と誘電体境界点  $\mathbf{r}_{S,j}$  との関係を図 2.9 に示す. 各  $\mathbf{q}_{M,i}$  に対する評価関数を次式で定義できる.

$$\begin{aligned}
 F(\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}); \mathbf{q}_{M,i}) &= \sum_{k=1}^{N_M} s(\mathbf{q}_{M,k}) f(\mathbf{r}_{M,j}(\mathbf{q}_{M,i}), \mathbf{q}_{M,k}) \\
 &\quad \times \exp\left(-\frac{|X_{M,i} - X_{M,k}|^2}{2\sigma_X^2} - \frac{|R_{M,i} - R_{M,k}|^2}{2\sigma_R^2}\right) \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

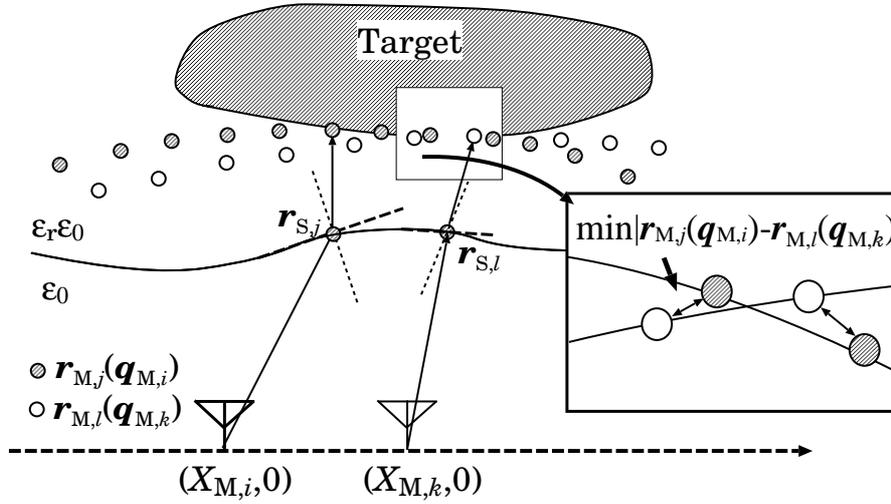


図 2.9:  $r_{M,j}(q_{M,i})$  と  $r_{M,l}(q_{M,k})$  との関係

但し,  $\sigma_X$  及び  $\sigma_R$  は定数である.  $\exp(*)$  は, 対象となる素子間隔及び到来距離差に対する重みである.  $q_{M,i}$  に対応する真の内部目標推定点を次式で求める.

$$\hat{r}_M(q_{M,i}) = \arg \max_{r_{M,j}(q_{M,i})} |F(r_{M,j}(q_{M,i}); q_{M,i})| \quad (2.12)$$

同手法はRPM法によって推定した誘電体境界推定点群と同法線ベクトルを利用し, 内部目標の散乱点への伝搬経路を決定することで, 内部目標境界を点群によって高精度に再現することができる. 図 2.10 に, 同手法による内部目標再構成画像の例を示す. 雑音の影響を考慮しない場合の数値計算による特性評価において, 本手法が誘電体内の目標形状を高精度に推定していることが確認できる. また, 誘電体境界の外部に虚像が生成されないことも分かる. 本手法は, 任意境界に対応した高精度な誘電体内部画像化を可能とする. しかし, 同手法は外部誘電体の比誘電率を既知であるという仮定に基づいている. そのため, 壁や人体等は誘電率が未知であるため, 画像化できない. そこで, 同手法によって内部画像化を行うためには, 誘電率推定法との併用が不可欠となる.

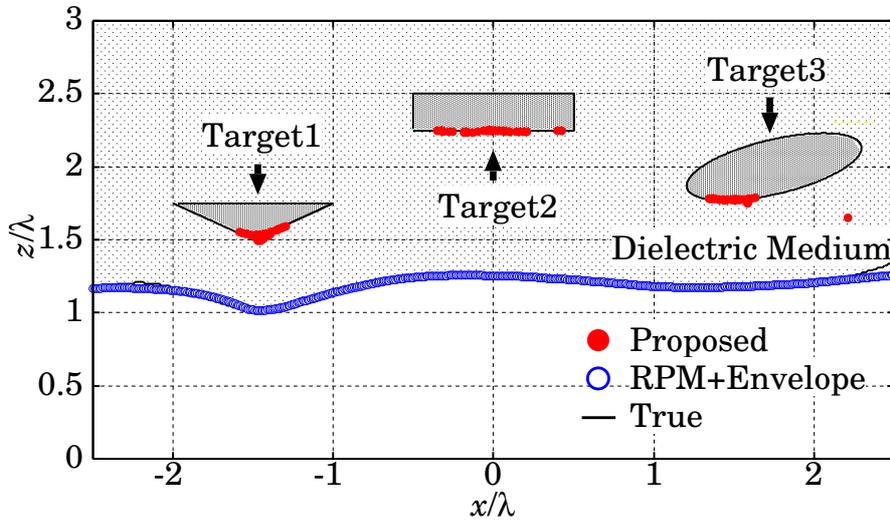


図 2.10: RPM 法の原理を拡張した内部目標画像化手法による推定像 (出典: Accurate and Nonparametric Imaging Algorithm for Targets Buried in Dielectric Medium for UWB Radars)

## 2.3 誘電率推定法

前節の RPM 法を拡張した内部画像化手法には、誘電率を既知とした手法のため、人体や構造物等の誘電率が未知であるものに対して、推定できない問題があり、誘電率推定法との併用が必須となる。本節では、領域積分方程式の数値解析に基づく手法、壁透過レーダを用いた誘電率推定法、単層誘電媒質を想定した誘電率推定法について説明する。

### 2.3.1 領域積分方程式の数値解析に基づく手法

本節では、既に提案されている領域積分方程式の数値解析に基づく手法 [12] について説明する。本手法は、目標の存在する空間領域を離散化し、誘電体全体の誘電率の空間分布を構成する。ピクセル毎の基底関数のパラメータを未知数として逆問題を解くことで目標空間の誘電率分布を得る。同手法は不均質媒質の誘電体に対しても高精度に誘電率分布を推定することができる。次式に電磁界散乱問題における

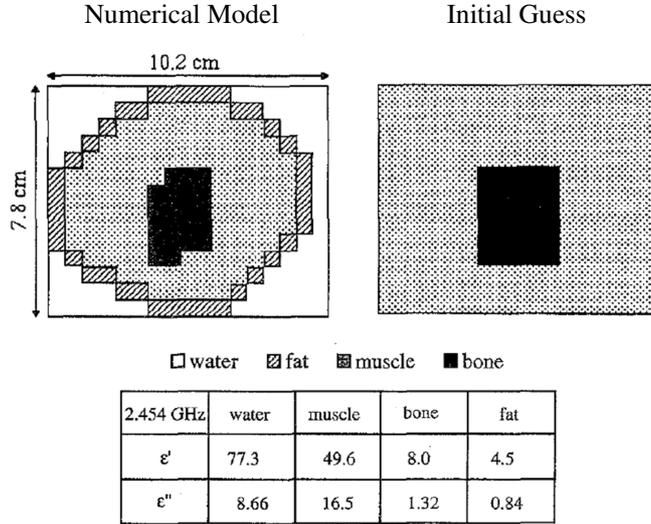


図 2.11: 領域積分方程式を用いた誘電率推定のシステムモデル

領域積分方程式の一般式を示す.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) - \int_C k_0^2 \{\epsilon(\mathbf{r}') - \epsilon_b\} G(|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|) \mathbf{E}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.13)$$

ここで、 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  は全電界、 $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$  は入射電界であり、 $k_0$  は波数、 $\epsilon(\mathbf{r}')$  は  $\mathbf{r}'$  での比誘電率を表し、 $\epsilon_b$  は背景の比誘電率である。  $G(|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|)$  は  $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{r}'$  の間の電波伝搬を表現するグリーン関数である。入射電界及び全電界に対し、グリーン関数と誘電率コントラストの積による積分項の和から各ピクセル毎の散乱電界が求められることを示している。しかし、誘電率分布と各ピクセル位置での全電界が未知であるため、非線形の場合に直接的に解くことが困難となる。そこで、ボルン近似を用いて、同問題の解決を図る。以下の式にボルン近似を用いた式を示す。

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) - \int k_0^2 \{\epsilon(\mathbf{r}') - \epsilon_b\} G(|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|) \mathbf{E}_i(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (2.14)$$

式(2.14)は式(2.13)の  $\mathbf{E}$  を入射電界  $\mathbf{E}_i$  で置き換えたものである。式(2.14)は線形積分方程式であり、一般化逆行列を用いた逆問題解析等の多次元最適化手法によって解くことができる。

図 2.11 の左図に数値計算モデルを示す。また、右図は初期値として与えるコントラストであり、各領域で与えるパラメータを表に示してある。 $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$  はそれぞれ、

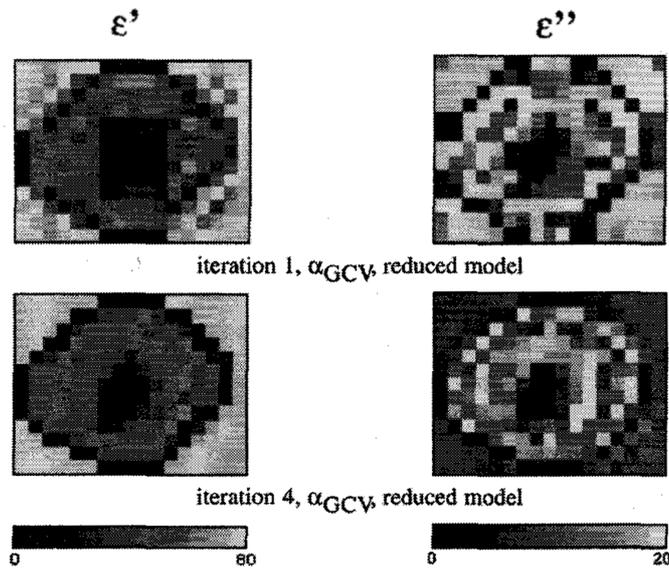


図 2.12: 領域積分方程式を用いた誘電率推定による誘電率コントラスト推定像 (出典 : Microwave Imaging-Complex Permittivity Reconstruction with a Levenberg-Marquardt Method)

$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  として与えられる複素誘電率の実部と虚部である。図 2.12 に、上記モデルに対して、本原理に基づいた誘電率コントラストの画像化を適用した推定像を示す。同図より、本手法は誘電率コントラストの画像化を再帰的に行うことで高精度な誘電率推定を可能にする。しかし、各ピクセル毎での積分処理を有するために、膨大な処理時間を必要とする問題点を有する。また、明瞭な境界を持つ層構造媒質等の、誘電率分布に不連続が生じるような領域では、推定精度が著しく劣化する問題点を有する。

### 2.3.2 壁透過レーダを用いた誘電率推定法

本節では、既に提案されている、壁透過レーダを想定した誘電率推定法 [15] の原理について説明する。前節では、多次元最適化によって誘電率の各ピクセルを推定したが、本手法は、目標及び壁からの反射波電界から非最適化による線形逆問題を解析し、壁のパラメータを求め、壁の各ピクセルの誘電率及び導電率を推定する。

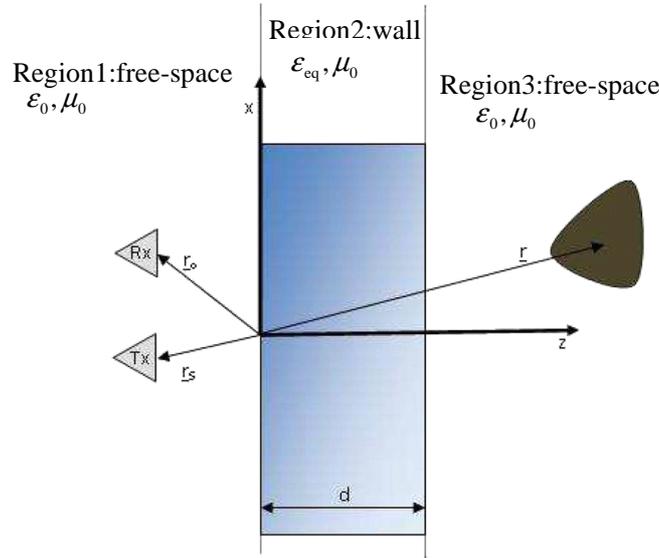


図 2.13: システムモデル

図 2.13 に同手法のシステムモデルを示す．複数のバイスタティックレーダを構築したモデルを考える．送信素子  $\mathbf{r}_s$  で周波数を掃引放射し，受信素子を等間隔に直線走査し，各位置  $\mathbf{r}_o$  で受信する．壁の反対側である領域 3 に目標があるものとする．但し，目標は未知形状とする．また，非損失性の壁を想定し，壁を透過するクラッタは存在しないものとする．このとき，総受信電界  $E_S(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_o, \omega)$  は，壁及び目標からの反射波による電界  $E_S^w(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_o, \omega)$ ， $E_S^O(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_o, \omega)$  が得られる． $E_S^O(\mathbf{r}_s, \mathbf{r}_o, \omega)$  は次式より抽出する．

$$E_S^w(\eta, \omega) = \int_{-k_0}^{k_0} \Gamma(\omega, k_x) A(\omega, k_x) \exp(2jk_z z_s) \exp[-j\eta k_x] dk_x \quad (2.15)$$

但し， $\Gamma$  は壁の反射係数であり， $\eta = x_0 - x_s$  である．非適切逆問題を得るために  $\Gamma \langle \cdot \rangle$  を次式より推定する．

$$\tilde{\Gamma}(\omega, k_x) = \sum_{m=0}^{N_T} \frac{\langle E_S^w(\eta, \omega), v_n(\eta, \omega) \rangle}{\sigma_n} u_n(\omega, k_x) \quad (2.16)$$

但し， $v_n, u_n, \sigma_n$  は特異システムであり， $\langle \cdot, \cdot \rangle$  は内積を表わし， $N_T$  は打ち切り特異値分解法 (TVSD) の要素である． $\tilde{\Gamma}$  は反射係数であり，各角周波数毎に求める必要がある．扁長楕円体球関数の性質によって， $N_T$  は反射波散乱界の自由度の

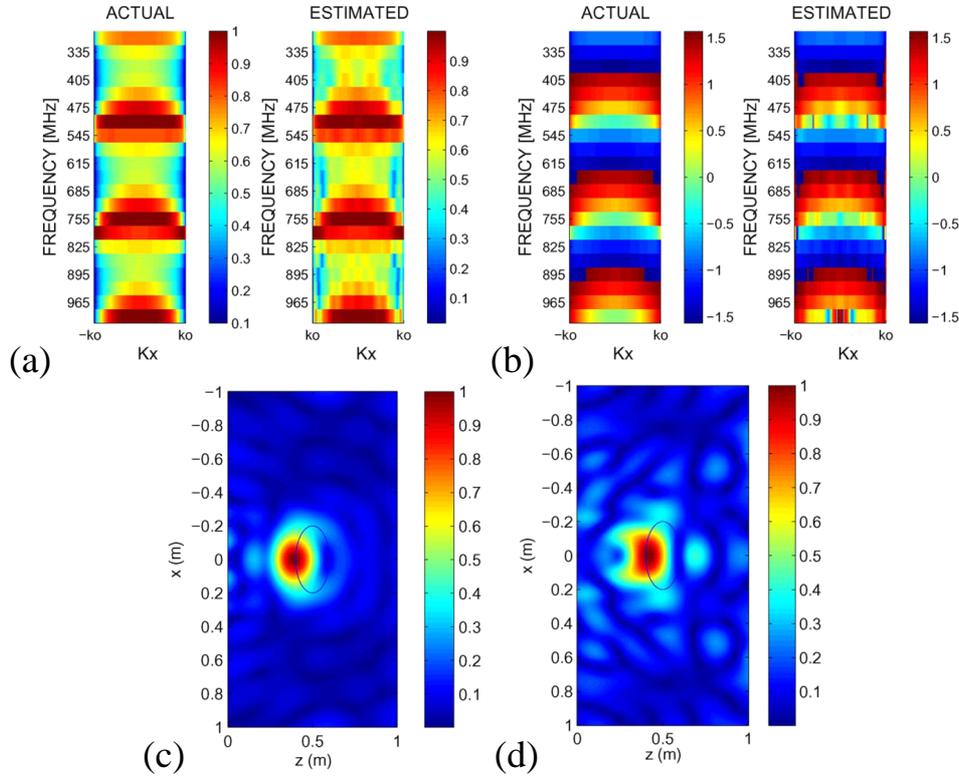


図 2.14: 誘電率及び導電率の真値と推定結果

数を表している．前式より決定した反射波係数より透過波係数を推定する．壁を 2 ポート回路と表したときに，壁の伝送特性以下の散乱行列で表すことが出来る．

$$S(\omega, k_x) = \begin{pmatrix} S_{11}(\omega, k_x) & S_{12}(\omega, k_x) \\ S_{21}(\omega, k_x) & S_{22}(\omega, k_x) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

但し，角周波数に依存し，散乱パラメータの  $S_{11}$  は反射波係数  $\Gamma$ ， $S_{21}$  は透過波係数  $\tau$  から推定される．そして， $S_{21}$  から  $S_{11}$  を推定する． $|\tau(\omega, k_x)| = \sqrt{1 - |\Gamma(\omega, k_x)|^2}$  で表わされる．壁が非損失性の壁とするため， $\epsilon_w(z) = \epsilon_w(d - z)$  と仮定できるので， $S_{11} = S_{22}$  となり，反射波係数及び透過波係数の位相は次式で示される．

$$\phi_\tau(\omega, k_x) = \phi_\Gamma(\omega, k_x) + (2n + 1)\pi/2 \quad (2.18)$$

但し， $\phi_\tau$ ， $\phi_\Gamma$  はそれぞれ， $\tau \langle \cdot \rangle, \Gamma \langle \cdot \rangle$  の角度であり，周波数毎に求める．壁が単層誘電媒質の場合，多周波データでは，最初の 2 つのパルス間の時間から壁の

厚さの上限を推定することが出来る．図 2.14 に誘電率及び導電率の真値と推定結果を示す．(a) 及び (b) は振幅値及び位相の透過係数の真値及と推定値である．(e) は透過係数と散乱界から得られた正規化再構成画像であり，(f) 推定した散乱場と透過係数から得られた正規化再構成画像であり，高精度にモデルを再構成されていることが確認できる．本手法では，壁の各ピクセルでの誘電率及び導電率を推定することを可能にする．しかし，単純な誘電体形状でなければ推定できないこと，また各ピクセル毎の計算になり膨大な計算量となる等の問題点を有する．

### 2.3.3 単層誘電層媒質の高精度誘電率推定法

前節で示した領域積分方程式に基づく手法や壁透過レーダを想定した手法の問題を解決するために，幾何光学近似に基づく透過波伝搬遅延推定に基づいた誘電率推定法が提案されている．本手法は，RPM 法及び Envelope 法による境界推定点及び同本線ベクトルから透過波伝搬経路を推定し，観測遅延量との差分の最小化になるように誘電率を推定する．RPM 法の点群写像の特徴から，任意の外部層境界に対応し，高速かつ高精度に誘電率を推定する手法であり，本節では，同誘電率推定法の原理を説明する．

図 2.15 にシステムモデルを示す．誘電体及び素子は座標空間を  $\mathbf{r} = (x, z)$  に存在するものとする．非分散損失性媒質の単層誘電媒質及び，その内部に含まれる完全導体の目標から構成されるモデルを想定する．但し，誘電体は均質媒質であると仮定し，未知形状かつ明瞭な境界を持ち，誘電率  $\epsilon_r$  は既知とする．また，誘電体外部は真空とし，真空中伝搬速度は  $c$  で既知かつ一定である．素子は，無指向性の送受信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}} = (X_{\text{TR}}, Z_{\text{TR}})$  と受信素子  $\mathbf{r}_{\text{R}} = (X_{\text{R}}, Z_{\text{R}})$  を誘電体を囲む様に中心を  $\mathbf{r}_c = (X_c, Z_c)$ ，半径を  $R_c$  とする円周上を走査する．但し，受信素子は，送受信素子と走査円を対称とする位置関係  $(\mathbf{r}_{\text{TR}} + \mathbf{r}_{\text{R}})/2 = \mathbf{r}_c$  を保持する．送信信号は中心波長を  $\lambda$  とするモノサイクルパルスとする．素子位置  $(X, Z)$  における送受信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}}$  及び受信素子  $\mathbf{r}_{\text{R}}$  での受信信号はそれぞれ  $s'_{\text{TR}}(X, Z, R)$ ， $s'_{\text{R}}(X, Z, R)$  とする．但し， $R = ct/2$  とし， $t$  は観測時間である．受信信号  $s'_{\text{TR}}(X, Z, R)$ ， $s'_{\text{R}}(X, Z, R)$  の Wiener フィルタを通した出力結果を  $S(X_{\text{TR}}, Z_{\text{TR}}, R_{\text{TR}})$ ， $S(X_{\text{T}}, Z_{\text{T}}, R_{\text{T}})$  とする．

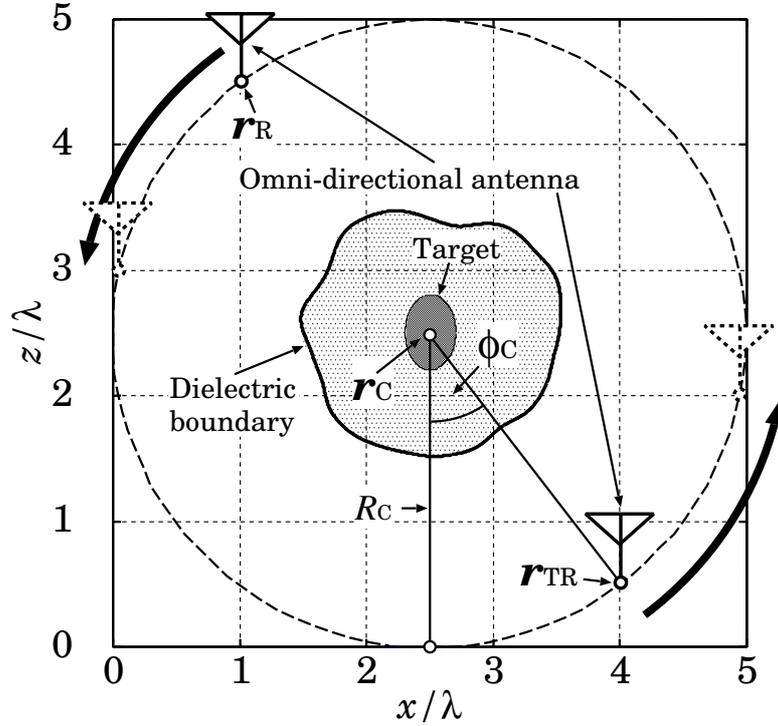


図 2.15: システムモデル

初めに, 反射波出力  $S(X_{TR}, Z_{TR}, R_{TR})$  の距離点を抽出し,

$$\mathcal{Q}_{TR} = \{\mathbf{q}_{TR,i} = (X_{TR,i}, Z_{TR,i}, R_{TR,i}), (i = 1, \dots, N_{TR})\}$$

と定義する.  $\mathcal{Q}_{TR}$  の各素子位置での最大応答である距離点を第一到来波とし,  $\mathcal{Q}_{tr} = \{\mathbf{q}_{tr,i} = (X_{tr,i}, Z_{tr,i}, R_{tr,i}), (i = 1, \dots, N_{tr})\}$  とする. 第一到来波以降の全距離点を  $\mathcal{Q}_M = \mathcal{Q}_{TR} \cap \overline{\mathcal{Q}_{tr}} = \{\mathbf{q}_{M,i} = (X_{M,i}, Z_{M,i}, R_{M,i}), (i = 1, \dots, N_M)\}$  とする.  $\mathcal{Q}_{tr}$  に RPM 法を適用することで, 誘電体境界点群  $\mathbf{r}_i = (x_i, z_i)$ ,  $(i = 1, \dots, N_{tr})$  を得る. RPM 法の特徴である各境界推定点と同推定点を散乱位置とする素子の関係から法線ベクトル  $\mathbf{e}_{n,i} = (X_{tr,i}, Z_{tr,i})/R_{tr,i}$  が得られる. ここで, 入射点を  $\hat{\mathbf{r}}_I(\epsilon_t)$ , 出射点を  $\hat{\mathbf{r}}_E(\epsilon_t)$  とすると, これらは次式より計算できる.

$$(\hat{\mathbf{r}}_I(\epsilon_t), \hat{\mathbf{r}}_E(\epsilon_t)) = \arg \min_{(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \in \mathcal{T}_{rpm}^2} \left\{ \|\mathbf{e}_i(\epsilon_t) - \mathbf{e}_{i,j}\|^2 + \|\mathbf{e}_j(\epsilon_t) - \mathbf{e}_{i,j}\|^2 \right\} \quad (2.19)$$

但し,  $\mathbf{e}_i(\epsilon_t) = \mathbf{R}_o(\theta_i(\epsilon_t))(-\mathbf{e}_{n,i})$ ,  $\mathbf{e}_j(\epsilon_t) = \mathbf{R}_o(\theta_j(\epsilon_t))(-\mathbf{e}_{n,j})$  は誘電体外部から

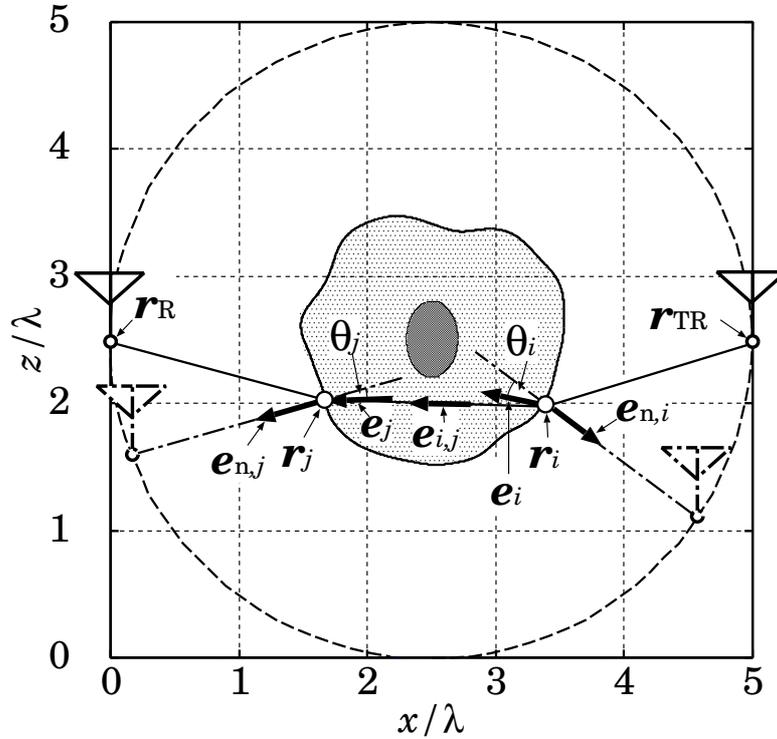


図 2.16: 伝搬経路推定例

内部への伝搬方向を表すベクトルであり、 $\mathbf{e}_{i,j} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) / \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$  は誘電体境界点間を結ぶ 2 点間のベクトルである． $\mathbf{R}_o(\theta)$  は 2 次元の回転行列、 $\theta_i(\epsilon_t)$ 、 $\theta_j(\epsilon_t)$  は内部への入射する角度であり、これら組み合わせはスネル則を満たすように決定される．図 2.16 に、伝搬経路の推定例を示す．

比誘電率  $\epsilon_t$  において、各観測位置における前式より推定した入射点・出射点から伝搬遅延量  $R(\epsilon_t; X_{r,i}, Z_{r,i})$  を次式より求める．

$$R(\epsilon_t; X_{r,i}, Z_{r,i}) = \frac{1}{2} \left\{ \|\hat{\mathbf{r}}_I(\epsilon_t) - \mathbf{r}_{\text{TR},i}\| + \sqrt{\epsilon_t} \|\hat{\mathbf{r}}_I(\epsilon_t) - \hat{\mathbf{r}}_E(\epsilon_t)\| + \|\hat{\mathbf{r}}_E(\epsilon_t) - \mathbf{r}_{\text{R},i}\| \right\} \quad (2.20)$$

また、反射波と同様に透過波に対して、 $S_R(X, Z, R)$  からの最大応答値を抽出した距離点群を  $\mathcal{Q}_R = \{\mathbf{q}_{r,i} = (X_{r,i}, Z_{r,i}, R_{r,i}), (i = 1, \dots, N_R)\}$  とする．前式で求めた幾何光学近似に基づく伝搬遅延量と同素子での観測遅延量との差分が最小化となるよ

うな比誘電率を推定する.

$$\epsilon_t^{\text{init}}(\mathbf{q}_{r,i}) = \arg \min_{\epsilon_t} |R(\epsilon_t : X_{r,i}, Z_{r,i}) - R_{r,i}| \quad (2.21)$$

次に, 素子毎に推定された  $\epsilon_t^{\text{init}}(\mathbf{q}_{r,i})$  のヒストグラムを構築する. ヒストグラムより最頻値  $\hat{\epsilon}_t^{\text{init}}$  を求める. 図 2.17 にヒストグラムの一例を示す. 各推定比誘電率値について透過波距離点の振幅による重み付け平均を行い, 次式より最終的な比誘電率推定値を決定する.

$$\hat{\epsilon}_t^{\text{init}} = \frac{\sum_{\mathbf{q}_{r,i} \in Q} S_R(\mathbf{q}_{r,i}) \epsilon_t^{\text{init}}(\mathbf{q}_{r,i})}{\sum_{\mathbf{q}_{r,i} \in Q} S_R(\mathbf{q}_{r,i})} \quad (2.22)$$

但し,  $Q = \{\mathbf{q}_{r,i} \mid |\epsilon_t^{\text{init}}(\mathbf{q}_{r,i}) - \hat{\epsilon}_t^{\text{init}}| < \Delta \epsilon_t^{\text{init}}\}$  は最頻値付近で重み付けを行う範囲を設けた, 外れ値を取り除いた距離点である.

図 2.18 に推定比誘電率における内部目標再構成画像を示す. 高精度に推定できていることが確認できる. 本手法は任意境界に対応した高速・高精度誘電率推定法であるが, 単層誘電媒質を仮定した手法のため, 複数層構造媒質に対して誘電率を推定できないため問題点を有する. そのため, 層構造を持つ誘電体に対して各層の誘電率を推定する手法が必要となる.

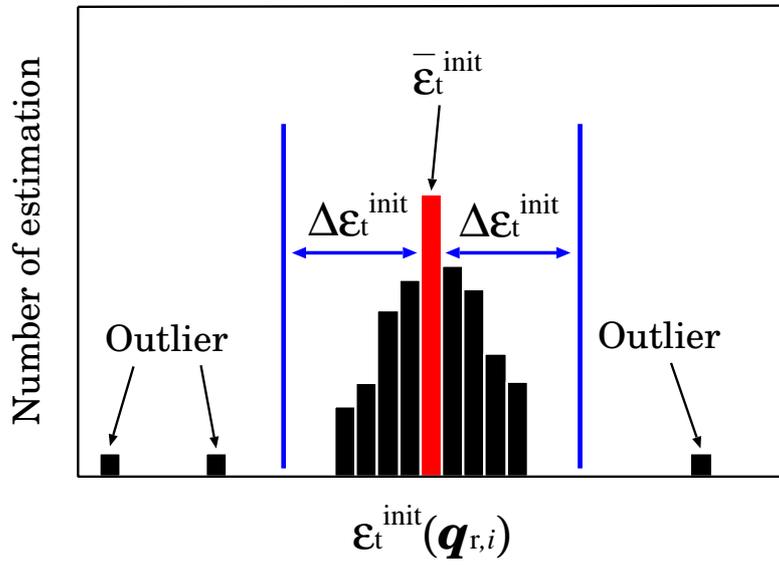


図 2.17: 初期推定誤差の分布

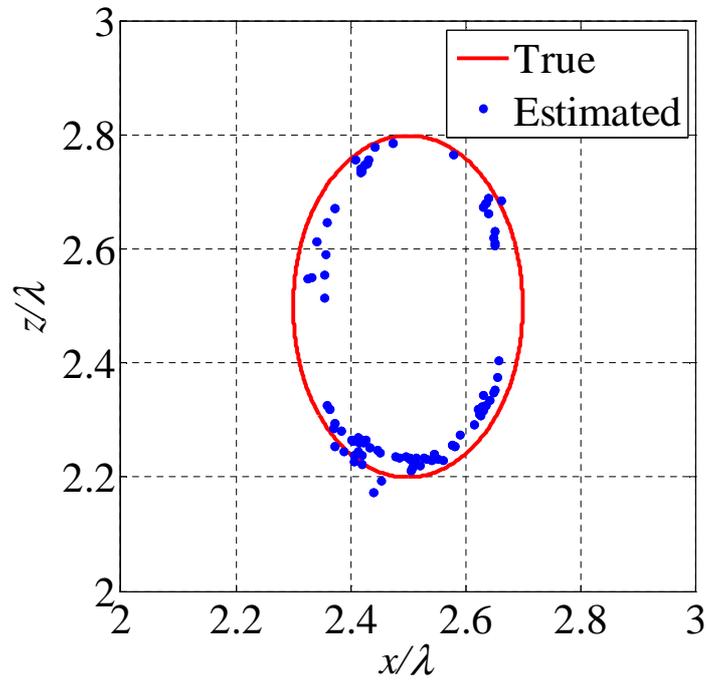


図 2.18: 内部目標再構成画像

## 第 3 章

# 二層誘電媒質に対する誘電率及び各層境界推 定法

従来の誘電率推定法では，単層誘電体を想定した手法のため，複数層構造を持つ誘電体に対して境界を推定することが困難である．本章では，従来法を拡張した，二層構造誘電媒質の誘電率推定法について説明する．また，内部層境界を推定するための拡張 Envelope 法を提案し，基本原理について説明する．

### 3.1 システムモデル

図 3.1 にシステムモデルを示す．二次元問題を仮定する．誘電体及び素子は座標空間を  $\mathbf{r} = (x, z)$  上に存在する．モデルは非分散損失性媒質の二層構造誘電体を想定する．ただし，誘電体の各層は未知形状かつ明瞭な境界を持ち，外部層及び内部層の誘電率 ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) は未知とする．また，誘電体外部は真空とし，真空中伝搬速度は  $c$  で既知かつ一定である．素子は，無指向性の送受信素子  $\mathbf{r} = (X_{\text{TR}}, Z_{\text{TR}})$  と受信素子  $\mathbf{r} = (X_{\text{R}}, Z_{\text{R}})$  を誘電体を囲む様に中心を  $\mathbf{r}_c = (X_c, Z_c)$ ，半径を  $R_c$  とする円周上を走査する．但し，受信素子は，送受信素子と走査円中心  $\mathbf{r}_c = (X_c, Z_c)$  を対称とする位置関係  $(\mathbf{r}_{\text{TR}} + \mathbf{r}_{\text{R}})/2 = \mathbf{r}_c$  を保持する．送信信号は中心波長を  $\lambda$  とするモノサイクルパルスとする．素子位置  $(X, Z)$  における送受信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}}$  及び受信素子  $\mathbf{r}_{\text{R}}$  での受信信号はそれぞれ  $s'_{\text{TR}}(X, Z, R)$ ， $s'_{\text{R}}(X, Z, R)$  とする．但し， $R = ct/2$  とし， $t$  は観測時間である．フィルタの出力を  $S(X, Z, R)$  とすると， $R$  は観測信号

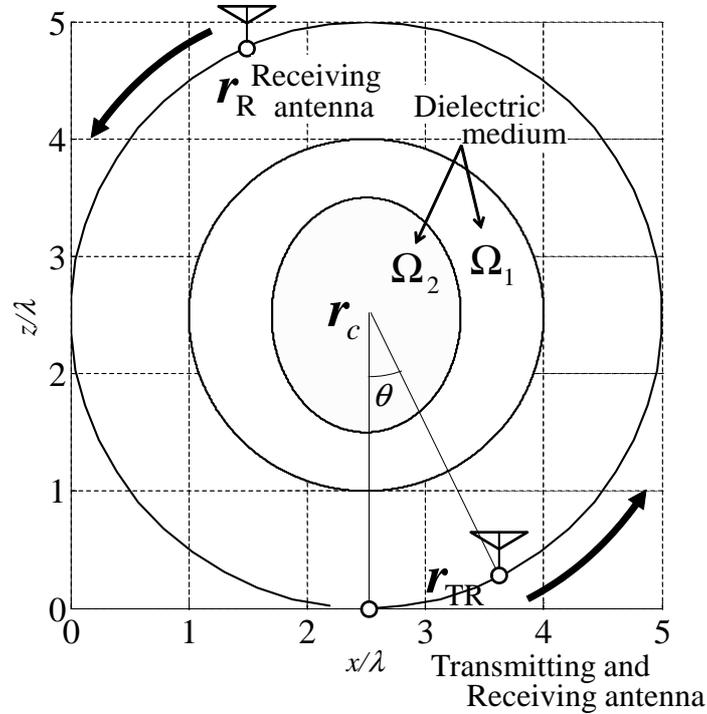


図 3.1: システムモデル

のフィルタ出力において設定する閾値を超える極大値を抽出したものを距離点群とする．ここで，各受信信号に送信波形に基づく Wiener フィルタは次式のように適用する．

$$s(X, Z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S'(X, Z, \omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.1)$$

但し， $S'(X, Z, \omega)$  は  $s(X, Z, t)$  の周波数領域である．Wiener フィルタの伝達関数  $W(\omega)$  は，

$$W(\omega) = \frac{S_{\text{ref}}(\omega)^*}{(1 - \eta) S_0^2 + \eta |S_{\text{ref}}(\omega)|^2} S_0 \quad (3.2)$$

であり， $\eta = 1/\{1 + (S/N)^{-1}\}$ ， $S_0$  は定数である． $S_{\text{ref}}(\omega)$  は参照信号の周波数領域， $*$  は複素共役を示している．同フィルタは  $\eta$  の値が S/N (Signal-to-Noise Ratio: 信号電力対雑音電力比) によって変化し，高 S/N 条件下では逆フィルタとして働き，低 S/N 条件下では整合フィルタとして機能するフィルタとなる．

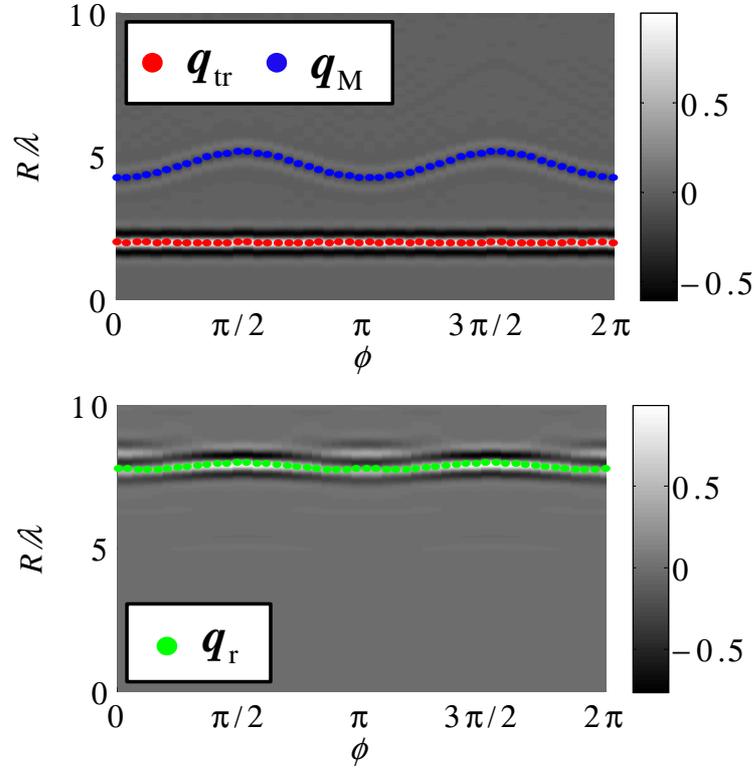


図 3.2: 反射波及び透過波の距離点例

送受信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}}$  から得られる反射波距離点を  $\mathcal{Q} = \{\mathbf{q}_i = (X_i, Z_i, R_i), (i = 1, \dots, N_{\mathcal{Q}})\}$  とする. ただし, 各素子からの最大応答を第一到来波に対応する距離点とし,  $\mathcal{Q}_{\text{tr}} = \{\mathbf{q}_{\text{tr},i} = (X_{\text{tr},i}, Z_{\text{tr},i}, R_{\text{tr},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{tr}})\}$  と表す. 第一到来波以降の距離点を,  $\mathcal{Q}_{\text{M}} = \mathcal{Q} \cap \overline{\mathcal{Q}_{\text{tr}}} = \{\mathbf{q}_{\text{M},i} = (X_{\text{M},i}, Z_{\text{M},i}, R_{\text{M},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{M}})\}$  とする. また, 透過波受信素子  $\mathbf{r}_{\text{R}}$  から各受信信号の最大値を抽出し, 透過波距離点

$$\mathcal{Q}_{\text{r}} = \{\mathbf{q}_{\text{r},i} = (X_{\text{r},i}, Z_{\text{r},i}, R_{\text{r},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{r}})\}$$

とする. 図3.2に  $S_{\text{TR}}(X, Z, R)$ ,  $S_{\text{R}}(X, Z, R)$  の整合フィルタの出力と距離点を示す.

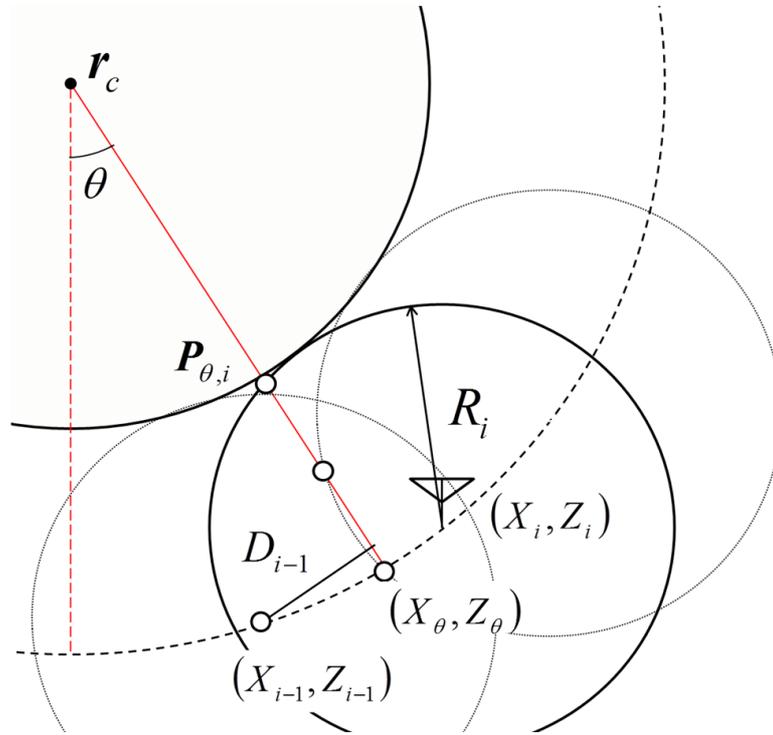


図 3.3: 円群の交点と目標境界点の関係性

### 3.2 各層境界推定の原理

本手法は、透過波伝搬遅延推定に基づいた誘電率推定法である。最適な誘電率を推定するために、各層誘電率の組み合わせを利用した際の伝搬経路を逐次推定するため各層の境界推定が必須となる。本節では、各層の境界を推定する Envelope 法 [21] 及び、拡張 Envelope 法について説明する。

まず、外部層境界推定について説明する。前節で抽出した距離点  $\mathcal{Q}_{\text{tr}} = \{\mathbf{q}_{\text{tr},i} = (X_{\text{tr},i}, Z_{\text{tr},i}, R_{\text{tr},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{tr}})\}$  に RPM 法を適用し、外部誘電体境界点群  $\partial\hat{\Omega}_1$  を取得する。RPM 法による境界推定では、境界推定点が素子数に依存する問題点があり、十分な走査点数がない場合に、推定点が疎になり伝搬経路推定に誤差が生じる原因となる。そこで、同点を内挿補完するために Envelope 法を導入する。同手法は単純目標にのみ適用可能であるが、RPM 法の点群を高密度に内挿補完できるという特徴を有する。Envelope 法は、素子位置  $\mathbf{r}_k = (X_k, Z_k)$  を中心、観測

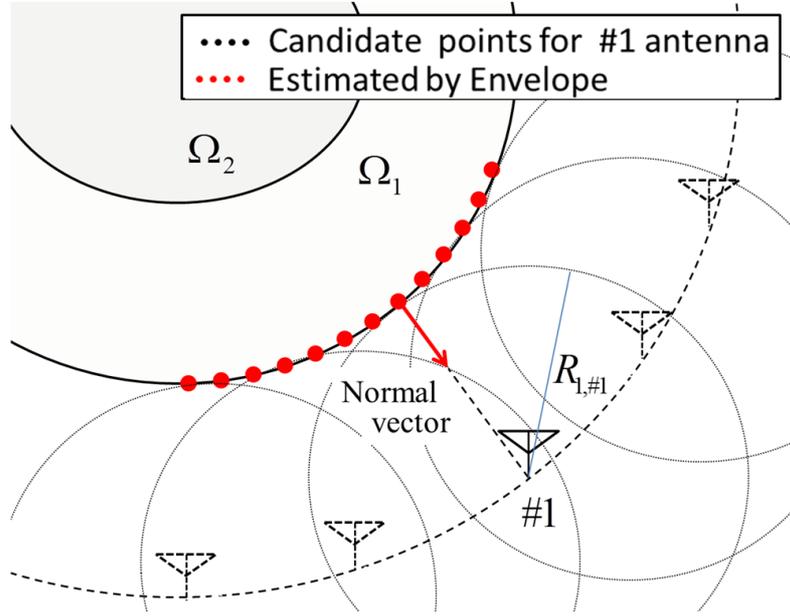


図 3.4: Envelope 法の原理図

距離  $R_k$  を半径とした円の包絡線上に目標境界が存在するという原理に基づいている。Envelope 法における境界推定点群を  $\partial\hat{\Omega}_1 = \{\mathbf{r}_{1,i} = (x_{1,i}, z_{1,i})\}$ , ( $i = 1, \dots, N_1$ ) と定義する。境界推定点群は次式により求める。

$$\mathbf{r}_{1,i} = \arg \min_{i \in \{D_i \leq R_k\}} \sqrt{(X_c - P_{x,k})^2 + (Z_c - P_{z,k})^2} \quad (3.3)$$

但し、 $i$  は Envelope 法のサンプル点であり、 $(X_{\theta_1}, Z_{\theta_1})$  は走査円上のサンプル位置である。また、走査円中心  $\mathbf{r}_c(X_c, Z_c)$  と  $(X_{\theta_1}, Z_{\theta_1})$  の 2 点間を結ぶ直線を考えてときの各素子を注しよんとする円との交点を  $P_{\theta,i}(X_{\theta,i}, Z_{\theta,i})$  とする。このとき、 $i \in \{D_i \leq R_i\}$  を設けることで、交点を取らない素子を取り除き、走査円中心  $\mathbf{r}_c$  からの最短距離となる交点を境界推定点  $\mathbf{r}_{1,i}$  とする。図 3.3 に前式の関係図を示す。同手法は、境界推定点と同推定点を決定する素子との関係から微分演算を必要とせずに、法線ベクトルを推定できる。図 3.4 に Envelope 法の原理図を示す。各推定点及び同法線ベクトルを得ることができるため、拡張 Envelope 法による内部層境界や、透過波伝搬経路推定に利用することを可能にする。

次に、内部層境界推定について説明する。内部層境界に対し、新たに提案する拡張 Envelope 法を導入し、内部誘電体境界点群  $\partial\hat{\Omega}_2$  を推定する。同手法は、各素子

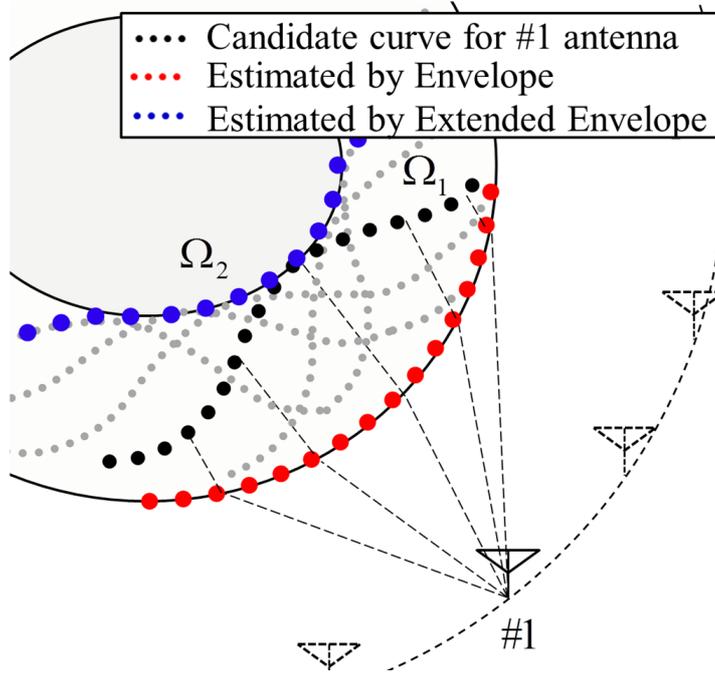


図 3.5: 拡張 Envelope 法の原理

位置からの距離点  $\mathbf{q}_{M,i}$  と外部層境界推定点群  $\partial\hat{\Omega}_1$  及び同法線ベクトルとスネル則から決定される内部層境界候補点群の包絡線上に目標境界が存在するという原理に基づいている。各素子毎の内部層境界候補点  $\mathbf{r}_{\text{can},i}$  は次式によって求める。

$$\mathbf{r}_{\text{can},k} = \mathbf{r}_{1,i} + \frac{(R_{r,k} - R_i(\mathbf{q}_{r,k}))\mathbf{e}_t}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (3.4)$$

但し、 $R_i(\mathbf{q}_{r,k}) = \sqrt{(X_k - x_i)^2 + (Z_k - z_i)^2}$ 、 $\mathbf{e}_t$  は誘電体内部に入射する方向ベクトルであり、スネル則によって求められる。Envelope 法同様、サンプル角毎に直線を引き、走査円中心  $\mathbf{r}_c$  からの最短距離となる候補点を抽出し、内部層境界推定点群  $\partial\hat{\Omega}_2 = \{\mathbf{r}_{2,j} = (x_{2,j})\}$ 、 $(j = 1, \dots, N_2)$  を推定する。しかし、外部層境界推定点は、サンプル毎の直線と円の交点は解析的に推定することが出来るが、内部層境界推定候補点は外部層境界推定点群及びスネル則を満たすように決定するため、境界候補点は離散的となり、外部層境界点数に依存してしまう。候補点が直線上に存在しない場合が考えられる。そこで、 $\theta_2$  の角度の直線に  $\pm\phi$  の範囲内に含まれる候補点の中から、走査円中心  $\mathbf{r}_c$  からの最短距離となる候補点を抽出し、同点を内部層

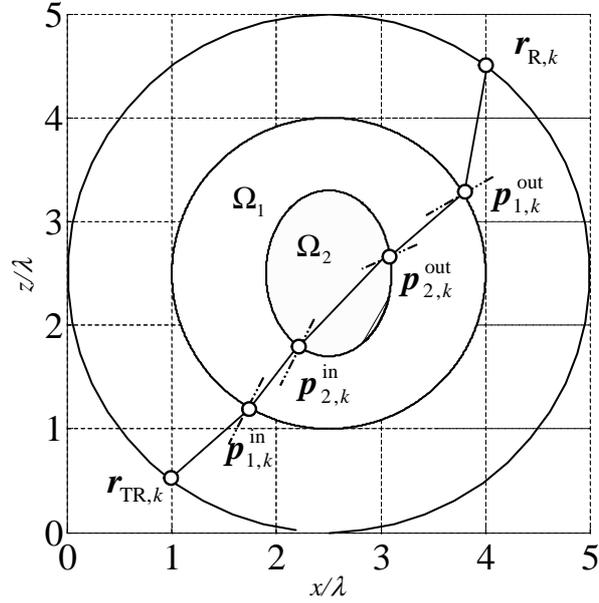


図 3.6: 入射点及び出射点の組み合わせ例

境界推定点  $\partial\hat{\Omega}_2$  とする. このとき,  $\pm\phi$  は  $\theta_2$  のサンプル角や外部層境界推定点群から経験的に設定する. また, 内部層境界推定点と, 同推定点への外部層境界入射点との関係から法線ベクトルを推定する. 図 3.5 に拡張 Envelope 法の原理を示す.

### 3.3 誘電率推定の原理

本節では, 誘電率推定法について説明する. 本手法は, 幾何光学近似に基づいた透過波伝搬遅延量と観測遅延量との差分を最小化することでの誘電率を推定する手法である. 透過波伝搬経路は前節より推定した外部層及び内部層の境界推定点及び同法線ベクトルを利用して推定する. 比誘電率  $(\epsilon_{\text{out}}, \epsilon_{\text{in}})$  における各誘電層の入射点  $\mathbf{p}_1^{\text{in}}, \mathbf{p}_2^{\text{in}}$ , 及び出射点  $\mathbf{p}_1^{\text{out}}, \mathbf{p}_2^{\text{out}}$  の組み合わせは 2. 2. 3 節のを 2 層構造に拡張した式よりスネル則を満たすように求められる. 図 3.6 に入射点と出射点  $\mathbf{p}_1^{\text{in}}$ ,  $\mathbf{p}_1^{\text{out}}, \mathbf{p}_2^{\text{in}}, \mathbf{p}_2^{\text{out}}$  の例を示す. 透過波距離点  $\mathbf{q}_{r,k}$  における各観測位置での幾何光学近似に基づく透過波伝搬遅延経路から伝搬遅延量  $\tilde{R}_k(\epsilon_1, \epsilon_2, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}})$  を次式

より推定する.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_k(\epsilon_1, \epsilon_2, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}}) = & \frac{1}{2} \left\{ \left\| \mathbf{r}_{\text{TR},k} - \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}} \right\| + \sqrt{\epsilon_{\text{out}}} \left\| \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}} - \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}} \right\| \right. \\ & + \sqrt{\epsilon_{\text{in}}} \left\| \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}} - \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}} \right\| + \sqrt{\epsilon_{\text{out}}} \left\| \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}} - \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}} \right\| \\ & \left. + \left\| \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}} - \mathbf{r}_{\text{R},k} \right\| \right\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

推定した伝搬遅延量  $\tilde{R}_k$  と同素子での距離点群の伝搬遅延量より, 比誘電率の組み合わせを次式により推定する.

$$(\hat{\epsilon}_{1,k}, \hat{\epsilon}_{2,k}) = \arg \min_{\epsilon_{1,k}, \epsilon_{2,k}} \left\| R_k - \tilde{R}_k(\epsilon_1, \epsilon_2, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}}) \right\|^2 \quad (3.6)$$

各素子位置毎に得られる比誘電率推定値に, 次式の透過波距離点振幅による重み付け平均を行い, 比誘電率  $(\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2)$  を決定する.

$$(\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2) = \frac{\sum_{k=1}^{N_r} S_R(\mathbf{p}_{\text{R},k})(\epsilon_{1,k}, \epsilon_{2,k})}{\sum_{k=1}^{N_r} S_R(\mathbf{q}_{\text{R},k})} \quad (3.7)$$

但し,  $N_r$  は透過波距離点群の総数である.

### 3.4 提案法の処理手順

提案法の手順を以下にまとめる. また, 図 3.7 に同手法のフローチャートを示す.

**手順 1)** 反射波の Wiener フィルタ出力  $S_{\text{TR}}(X, Z, R)$  から距離点群

$$\mathcal{Q}_{\text{tr}} = \{ \mathbf{q}_{\text{tr},i} = (X_{\text{tr},i}, Z_{\text{tr},i}, R_{\text{tr},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{tr}}) \}$$

及び,  $\mathcal{Q}_{\text{r}} = \{ \mathbf{q}_{\text{r},i} = (X_{\text{r},i}, Z_{\text{r},i}, R_{\text{r},i}), (i = 1, \dots, N_{\text{r}}) \}$  を抽出する. そして,  $\mathbf{q}_{\text{tr}}$  に RPM 法及び Envelope 法を適用し, 外部層境界の推定点群  $\partial\hat{\Omega}_1$  を得る.

**手順 2)** 手順 1) で得た透過波距離点及び外部層境界推定点群  $\partial\hat{\Omega}_1$  を用いて, 2.3.3 節の単層誘電層媒質の誘電率推定法により推定する. 単層と仮定した場合の誘電率  $\epsilon_{1\text{st}}$  を推定し, 比誘電率の初期値  $(\epsilon_1, \epsilon_2) = (\epsilon_{1\text{st}}, \epsilon_{1\text{st}})$  に設定する.

第 3 章 二層誘電媒質に対する誘電率及び各層境界推定法

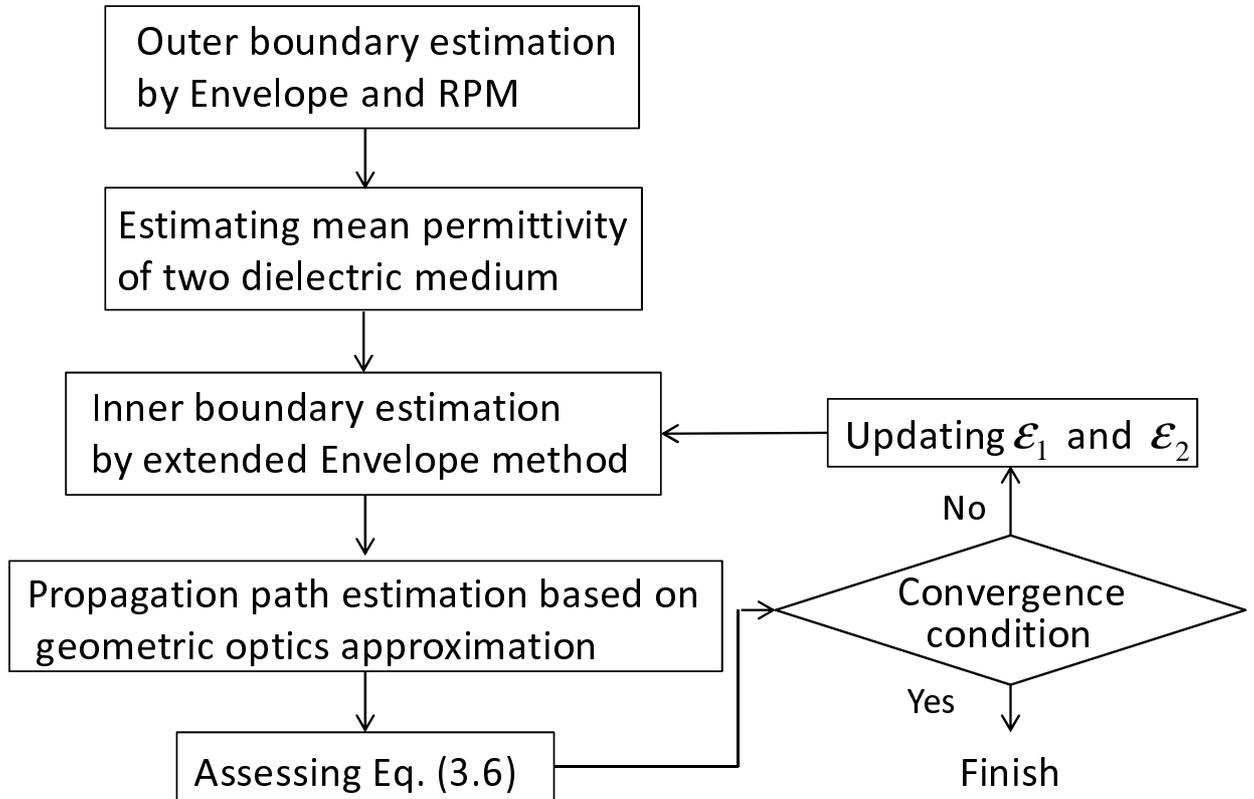


図 3.7: 提案法のフローチャート

手順 3) 比誘電率  $(\epsilon_1, \epsilon_2)$  において, 第二到来波距離点群  $\mathbf{q}_M$  に拡張 Envelope 法を適用し,  $\partial\hat{\Omega}_2$  を推定する.

手順 4) 手順 3) までで得た各層境界推定点群及び, 透過波距離点群  $\mathbf{q}_T$  より幾何光学近似に基づく透過波伝搬経路を推定し, 伝搬遅延量  $\tilde{R}_k(\epsilon_1, \epsilon_2, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{in}}, \mathbf{p}_{1,k}^{\text{out}}, \mathbf{p}_{2,k}^{\text{out}})$  を推定する.

手順 5) 式 (3.6) より最適化を行う. 収束条件を満たさない場合は, 収束するまで比誘電率  $(\epsilon_1, \epsilon_2)$  を更新する. 手順 3) と手順 4) を繰り返す, 最終の比誘電率  $(\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2)$  を推定する.

### 3.5 数値計算による性能評価

本節では、前節で提案した誘電率推定法について、数値計算による特性評価を行い、その結果を示す。本研究では、中心  $\mathbf{r}_c = (2.5/\lambda, 2.5/\lambda)$ 、半径  $R_c = 2.5$  とする円周上に送受信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}}$  を配置し、走査円中心に対称の位置に受信素子を配置する。これら素子を回転させ、等間隔に 50 点で観測する。受信電界は FDTD 法により生成を行うものとする。ここで、送信波形は次式で定義される。

$$i(t) = \begin{cases} (1 - \cos(2\pi t/T)) \sin(2\pi t/T), & (0 < t \leq T) \\ 0, & (\text{otherwise}), \end{cases} \quad (3.8)$$

但し、 $T = \lambda/c$  である。時間ステップ幅は  $T/200$  とし、ピクセルサイズは各軸とも  $\lambda/80$  に固定するものとする。各層の再構成画像の定量評価は、位置推定誤差 (RMSE: Root Mean Squared Error) を用いて、次式によって定義する。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{env}}} \min_{\mathbf{r}_{\text{true}}} |\mathbf{r}_{\text{true}} - \mathbf{r}_i|^2}{N_{\text{env}}}} \quad (3.9)$$

但し、 $N_{\text{env}}$  は各層境界に用いた Envelope 法及び拡張 RPM 法に用いた境界点数であり、 $\mathbf{r}_{\text{true}}$  は各誘電層境界の真値、 $\mathbf{r}_i$  は各誘電層境界推定点である。

次に、本稿で扱う雑音を定義する。ここで、受信信号に白色性ガウス雑音を付加したものを、雑音環境下にあるものとする。その際の SNR は次の式で定義する。

$$S/N = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_n} \quad (3.10)$$

ここで、 $P_s$  は内部反射波の距離点の電力であり、 $P_n$  は  $\pm 1.5\lambda$  の範囲内の雑音の整合フィルタ通過時の平均電力とする。各素子毎での平均値を雑音の値とする。

図 3.1 の二層誘電体構造モデルを想定する。誘電体の比誘電率は外部誘電層が 5.0、内部誘電層が 3.0、導電率は両誘電層とも 0.01S/m である。また、各層の誘電層境界を推定する Envelope 法及び拡張 Envelope 法に用いるサンプル点は各層とも 180 点である。図 3.8 に整合フィルタ出力及び距離点を示す。

第二到来波距離点  $\mathbf{q}_M$ 、透過波距離点  $\mathbf{q}_T$  に提案する誘電率推定法を適用する。各観測位置での推定比誘電率の組み合わせ  $(\epsilon_{1,k}, \epsilon_{2,k})$ 、 $(k = 1, \dots, N_r)$  が得られる。

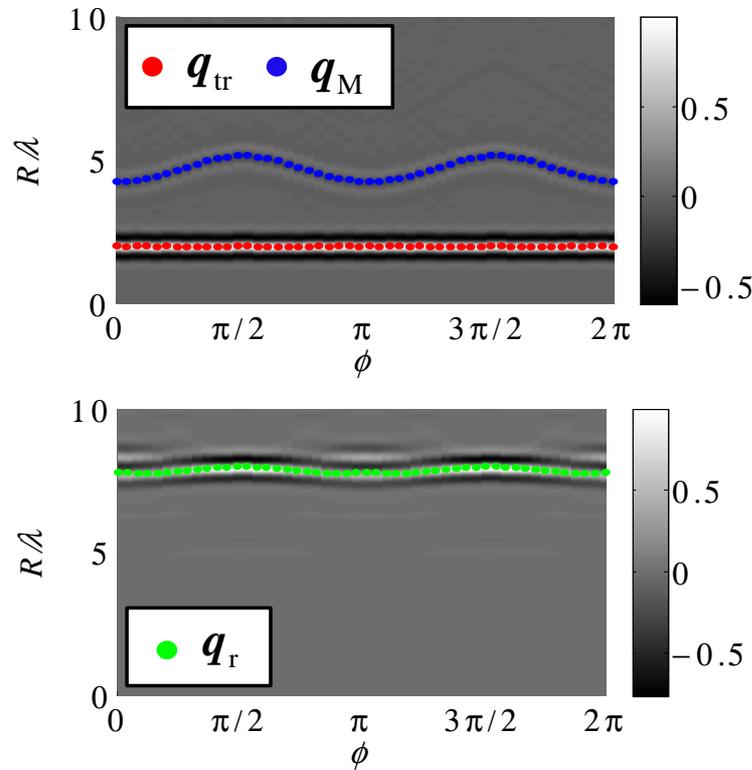


図 3.8: 整合フィルタ出力 (上: 反射波 下: 透過波)

図 3.9 に比誘電率推定値のヒストグラムを示す。但し，縦軸が外部層誘電率，横軸が内部層誘電率の値である。但し，比誘電率の探索範囲はそれぞれ，外部誘電層は 4.5 から 6.5，内部誘電層は 2.0 から 4.0 とし，刻み幅はともに 0.1 に設定する。各観測位置での比誘電率推定値に式 (3.7) より誘電率推定値が求められる。これら本手法の比誘電率推定値は外部誘電層が 5.29，内部誘電層が 2.95 となる。各層の比誘電率推定値の相対誤差は，外部層が約 6%，内部層が約 2% となり，かなりの高精度で誘電率を推定していることが確認できる。しかし，比誘電率推定値が真値以外の領域に分布していることが確認できる。これは透過波伝搬遅延量のみで各層比誘電率の 2 つの変数を推定するためであり，評価関数が真値以外の適当な組合せで極小値をとるためである。比誘電率推定値のばらつきが大きいため，ばらつきの特性に対応した重みづけ処理の導入が，今後の課題として挙げられる。また，推定比誘電率における各層再構成画像の定量評価では，各層の境界推定点の位置推定誤差

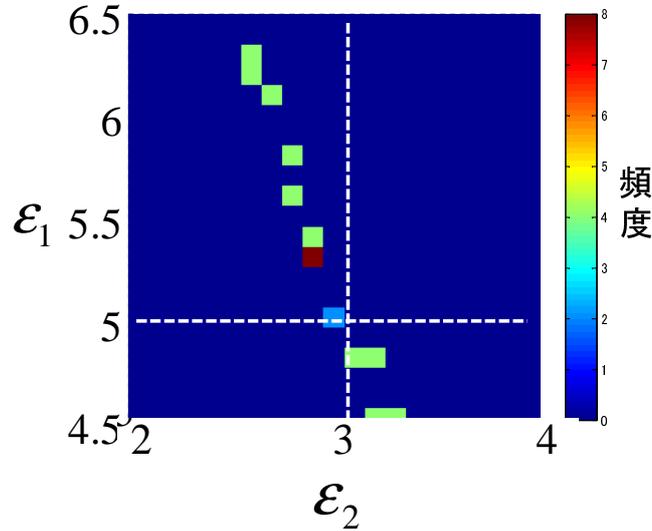


図 3.9: 比誘電率推定値のヒストグラム

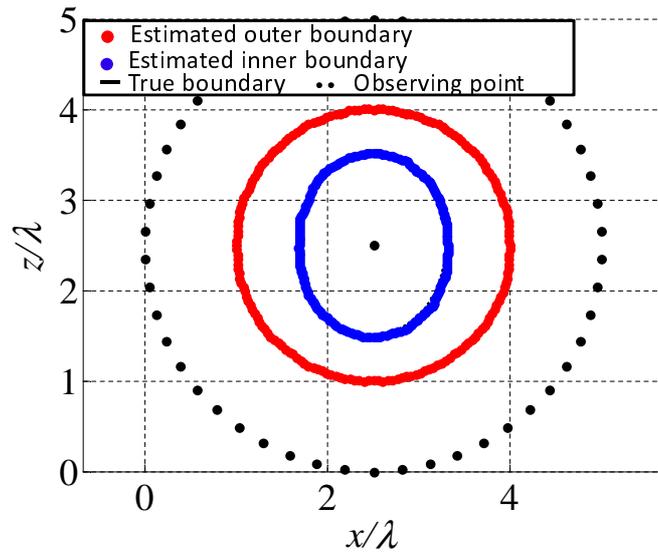


図 3.10: 比誘電率推定値における再構成画像

(RMSE) はそれぞれ, 外部層境界が  $6.2 \times 10^{-3}\lambda$ , 内部層境界が  $2.9 \times 10^{-2}\lambda$  となる. 外部境界は  $1/100\lambda$ , 内部境界は  $1/20\lambda$  の精度での再構成を達成することが確認できる.

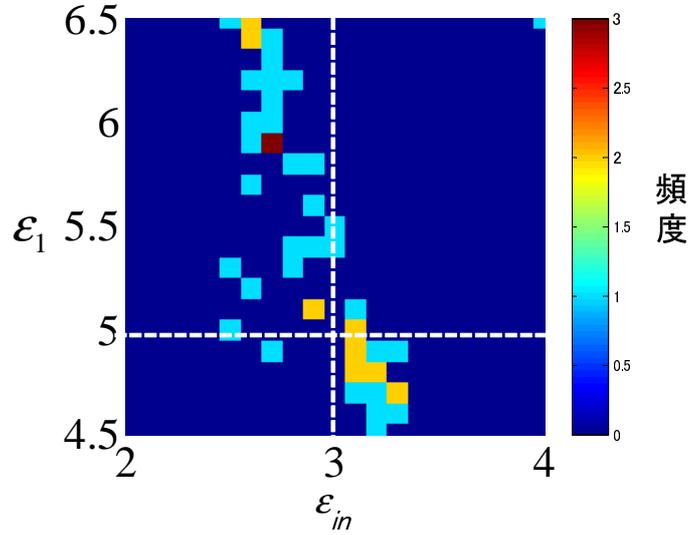


図 3.11: 比誘電率推定値のヒストグラム (SNR8dB)

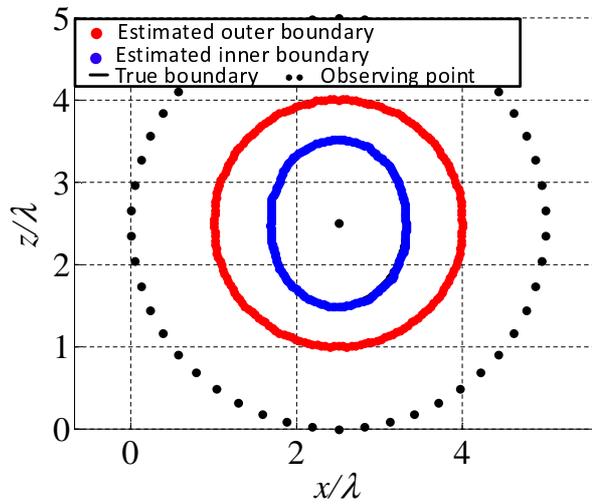


図 3.12: 比誘電率推定値における再構成画像 (SNR8dB)

次に、同モデルの観測信号に対して、雑音を付加した場合の特性評価を行う。雑音環境の例として、SNR8dB の場合を考える。図 3.11 に比推定誘電率のヒストグラムを示す。同図より、雑音環境下においては、比誘電率推定値の分布のばらつきが広

がっていることがわかる。比誘電率推定値は，外部層が5.43，内部層が2.90となる。各層の推定比誘電率の相対誤差は，外部誘電層が約9%，内部誘電層が約4%となる。この結果より，SNR8dBの雑音環境下においても本提案法が有効であることが確認できる。また，位置推定誤差 (RMSE) はそれぞれ，外部層境界が  $5.5 \times 10^{-3}\lambda$ ，内部層境界が  $2.5 \times 10^{-2}\lambda$  となり，外部境界は  $1/100\lambda$ ，内部境界は  $1/40\lambda$  の精度で再構成達成することが確認できる。雑音なしの場合と比較したときに各誘電層境界とも，SNR8dBの場合の方が，高精度で境界を再現できていることがわかる。主な原因として考えられることは，各層反射波から抽出した距離点誤差である。雑音によって生じた抽出距離点の誤差が，誘電体境界を推定するときに真の各誘電層境界よりも走査円中心方向に誤差を生じてしまうためである。これにより，雑音なしの場合より，再構成精度が向上する結果となったと考えられる。

## 第 4 章

### 実験データによる性能評価

本章では、本提案法における実験データの特性評価を行い、その結果を示す。本実験ではバイスタティックモデルを用いるため、外部境界推定法及び、拡張 Envelope 法をバイスタティックモデルに拡張した。導入したバイスタティック型 RPM 法 [24] の原理を説明する。

#### 4.1 実験緒元

図 4.1 に本研究で用いる実験の外観を示す。素子は垂直方向のダイポールアンテナを用いる。また、VNA(Vector Network Analyzer) を用いて、周波数を 0.8GHz から 3.0GHz までを 10MHz 刻みで掃引し、逆フーリエ変換によって受信信号を得る。送信素子  $\mathbf{r}_{TR}$ 、反射波及び透過波の受信素子  $\mathbf{r}_{R1}$ ,  $\mathbf{r}_{R2}$  は半径 40cm の円周上に配置し、目標を等間隔に 51 点で回転させて観測する。中心  $\mathbf{r}_c = (0.4, 0.4)$  とする。目標の比誘電率真値は、図 4.2 の空洞構造円目標及び二層構造円目標の透過波伝搬遅延より推定した値とする。まず、空洞構造円目標の透過波信号から伝搬遅延距離を推定し、比誘電率真値  $\epsilon_{true,1}$  を次式により求める。

$$\epsilon_{true,1} = \frac{R_{obs} - d_{air}}{d_{out}} \quad (4.1)$$

但し、 $R_{obs}$  は観測伝搬遅延距離、 $d_{air}$  は空気中の実計測距離、 $d_{out}$  は誘電体内の実計測距離である。次に、二層構造円目標から観測距離及び、前式から求めた比誘電率真値  $\epsilon_{true,1}$  を用いて、他層の比誘電率真値  $\epsilon_{true,2}$  を決定する。空洞構造及び二層

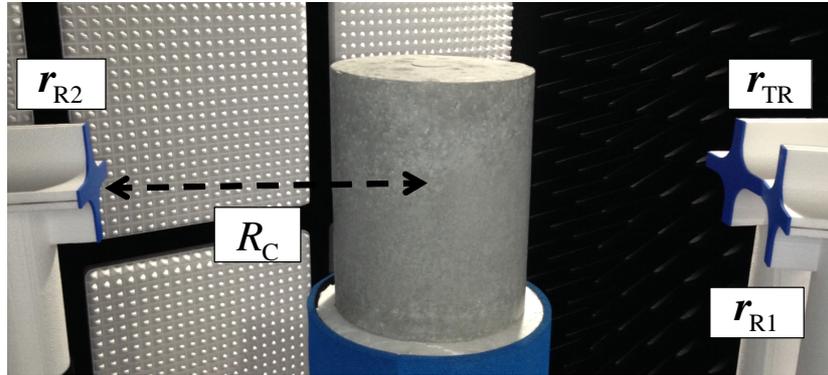


図 4.1: 実験外観

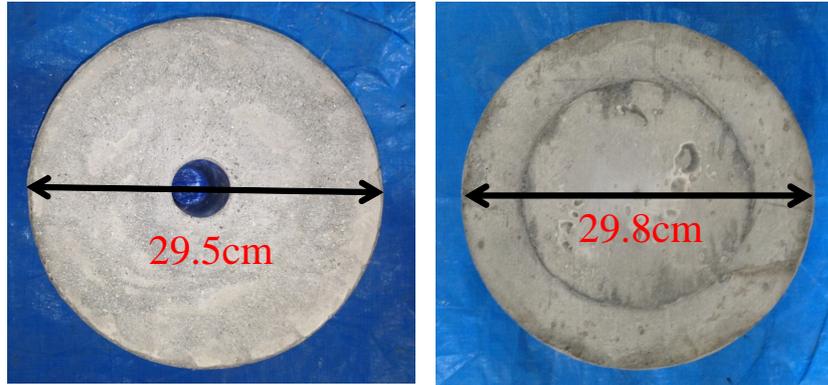


図 4.2: 左：空洞円目標 右：二層構造円目標

構造外部層はセメント層であり，比誘電率真値は 10.95，内部層はモルタル層であり，比誘電率真値は 9.70 となった．比誘電率 10 における分解能は 2.2cm である．本研究で用いたパラメータは， $\eta = 0.95$ ， $S_0 = 1$  であり， $\sigma_\theta = \pi/12.5\lambda$ ， $\sigma_x = 0.5\lambda$  とする．また，Envelope 法に用いる点数は，内部層の境界候補点を描く際の外部層境界推定サンプルは 2160 点，伝搬経路推定に使用するサンプル点数は 180 点とし，内部層境界推定サンプルは 180 点とする．

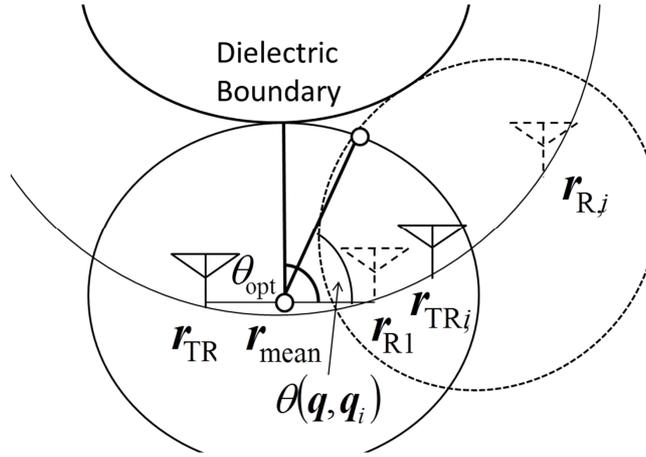


図 4.3: 楕円及び到来角の関係

## 4.2 バイスタティック型 RPM 法の導入

本節では、バイスタティック型 RPM 法の原理について説明する。1 組の送信・受信素子に注目する。送信素子  $\mathbf{r}_{\text{TR}}(X_{\text{TR}}, Z_{\text{TR}})$  及び受信素子  $\mathbf{r}_{\text{R1}}(X_{\text{R1}}, Z_{\text{R1}})$  を焦点、受信信号から取得した距離点  $\mathbf{q}_a(\mathbf{r}_{\text{TR}}, \mathbf{r}_{\text{R1}}, R_a)$  の  $R_a$  を楕円の長軸半径とする楕円が定まる。他の送信・受信素子位置  $\mathbf{r}_{\text{TR},i}(X_{\text{TR},i}, Z_{\text{TR},i})$ ,  $\mathbf{r}_{\text{R1},i}(X_{\text{R1},i}, Z_{\text{R1},i})$  から定まる楕円との交点から楕円中心からの角度  $\theta(\mathbf{q}, \mathbf{q}_i)$  を求める。ただし、 $\mathbf{q} \neq \mathbf{q}_i$  とする。従来の RPM 法のメンバシップ関数  $f(\theta, \mathbf{q}, \mathbf{q}_i)$  より同手法の評価関数を次式で定義する。

$$F(\theta; \mathbf{q}) = \left| \sum_{i=1}^{N_q} s(\mathbf{r}_{\text{TR},i}, \mathbf{r}_{\text{R1},i}, R_{a,i}) f(\theta, \mathbf{q}, \mathbf{q}_i) e^{-\frac{D^2}{2\sigma_D^2}} \right| \quad (4.2)$$

但し、 $D = \min(|\mathbf{r}_{\text{TR}} - \mathbf{r}_{\text{TR},i}| + |\mathbf{r}_{\text{R1}} - \mathbf{r}_{\text{R1},i}|, |\mathbf{r}_{\text{TR}} - \mathbf{r}_{\text{R1},i}| + |\mathbf{r}_{\text{TR},i} - \mathbf{r}_{\text{TR}}|)$  である。真の到来角  $\theta_{\text{opt}}$  が定まるとき、目標境界は次式によって推定できる。図 4.3 に送信素子及び受信素子から定まる楕円及び到来角との関係を示す。

$$\left. \begin{aligned} x &= a_1 \cos \phi_1 \cos \theta_{\text{opt}} - b_1 \sin \phi_1 \sin \theta_{\text{opt}} + x_{\text{mean}} \\ z &= a_1 \sin \phi_1 \cos \theta_{\text{opt}} - b_1 \cos \phi_1 \sin \theta_{\text{opt}} + z_{\text{mean}} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

但し、 $a_1$  は楕円の長軸、 $b_1$  は楕円の短軸、 $x$  軸からの回転角度であり、送信素子・受信素子の中心  $\mathbf{r}_{\text{mean}} = (x_{\text{mean}}, z_{\text{mean}})$  とする。

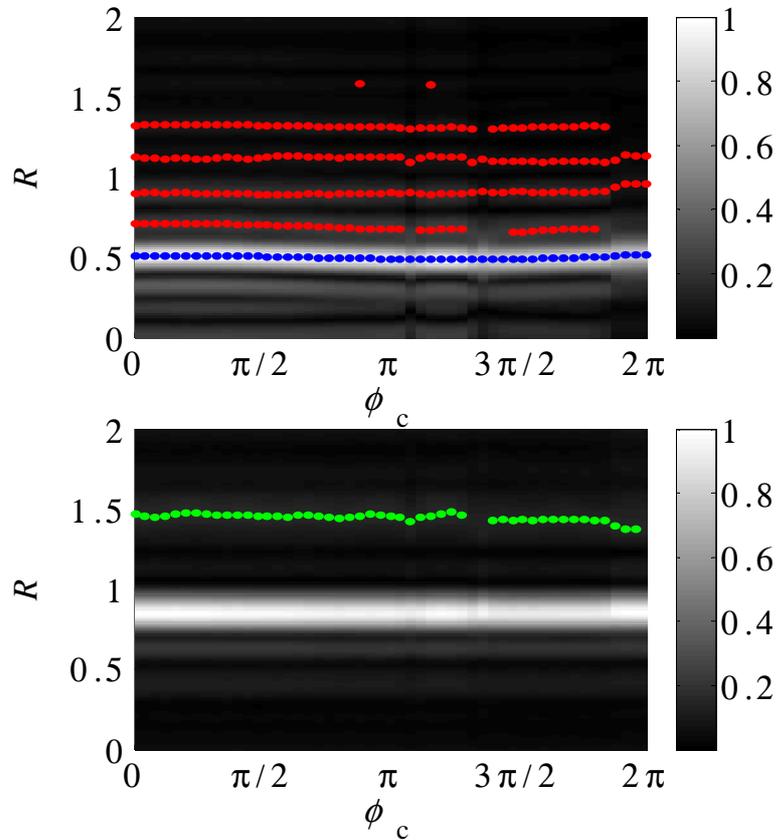


図 4.4: 反射波及び透過波の Wiener フィルタ出力

### 4.3 性能評価

本節では，二層構造誘電体及び，空洞構造誘電体における提案法の比誘電率及び各層の境界推定の結果を示し，定量的に評価する．

#### 4.3.1 二層構造誘電体

はじめに図 4.2 左の二層構造誘電体を想定した場合における特性評価を行う．同目標は外部誘電体の直径を 29.8cm としたセメント，内部誘電体の直径を 19.5cm としたモルタルであり，高さは 30cm で，各層とも円柱形状である．比誘電率の真値は，セメント層が 10.95，モルタル層が 9.70 とする．図 4.4 に，本モデルにおける

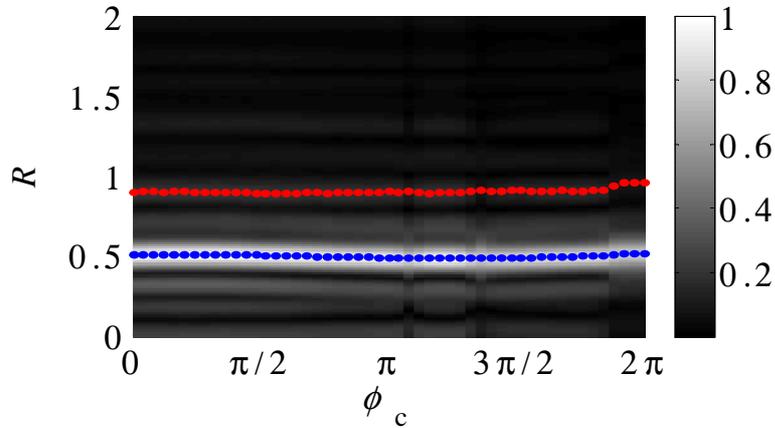


図 4.5: 先験情報を用いた反射波の Wiener フィルタ出力

反射波と透過波の Wiener フィルタ出力及び距離点を示す。同図の第一到来波距離点群に RPM 法及び Envelope 法を適用し、外部層境界を推定する。本モデルの誘電層の誘電率コントラストの差異が小さいため、図 4.4 から真の内部層反射波と、その他の外部層境界反射波サイドローブ等と比較した際、内部層反射波応答が微弱となる。そのため、内部層反射波だけでなく設定閾値を超えた雑音等も同様に抽出されることが確認できる。本実験では、誘電率等の先験的情報を利用し、適切に選択された内部層境界反射波距離点を抽出する。同図の内部層反射波が外部層反射波サイドローブに埋没する等のケースにおいても、反射波信号を識別し、所望する距離点の抽出が、大きな課題として挙げられる。図 4.5 に先験情報を利用した抽出距離点を示す。図 4.4 より、透過波の距離点抽出において、 $R = 0.9\text{m}$  付近に大きな応答が得られることが確認できる。これは外部層境界表面を電磁波が伝わることで生じるクリーピング波である。同クリーピング波は、外部層境界推定値を用いて [25] の手法により、同表面波を抑圧することができる。このため、図 4.4 透過波に同クリーピング波の距離点として抽出されていない。これら反射波距離点及び透過波距離点を用いて、誘電率推定法を適用する。図 4.6 に各層の比誘電率のヒストグラムを示す。数値計算同様に真値以外の領域に分布していることが確認できる。透過波振幅重み付け平均による推定比誘電率を求めると、外部誘電層が 10.95、内部誘電層が 8.96 となる。ここで、各層の探索範囲は外部誘電層が 9.0 から 13.0、内部誘電

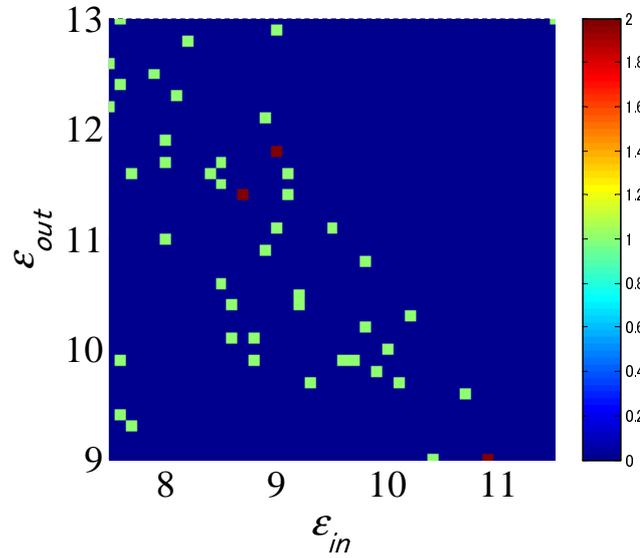


図 4.6: 二層構造誘電体の比誘電率推定値ヒストグラム

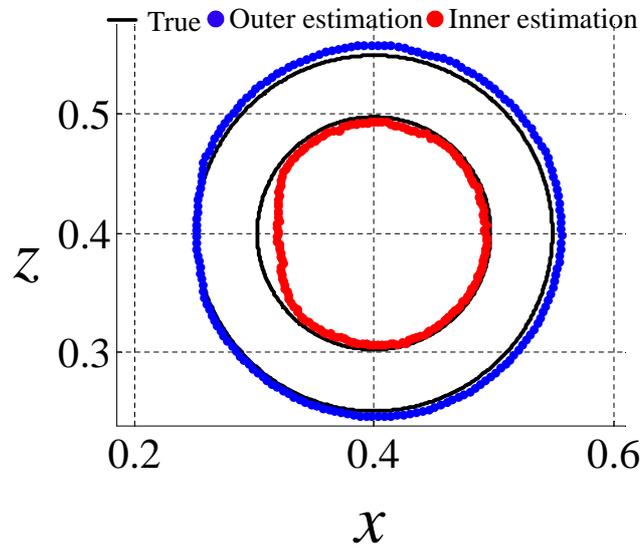


図 4.7: 比誘電率推定値の二層構造誘電体の再構成画像

層は 7.5 から 11.5 に設定し、刻み幅は 0.1 とする。各層の推定比誘電率の相対誤差は、外部誘電層が約 1%、内部誘電層が約 7% となり、かなりの高精度で比誘電率

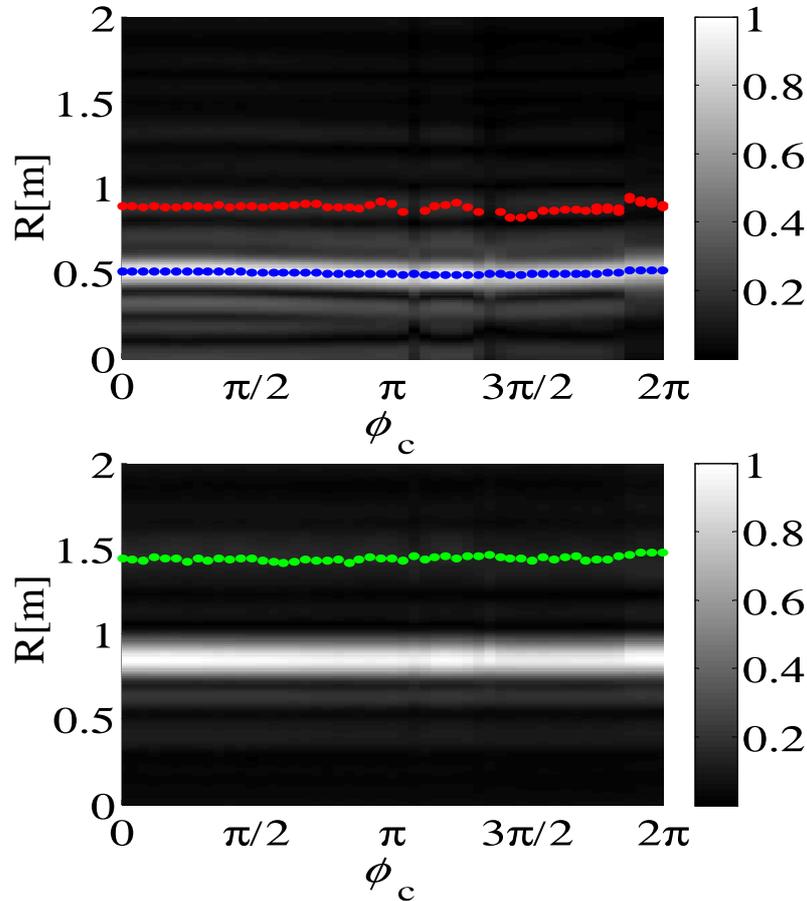


図 4.8: 先験情報を用いた反射波及び透過波の Capon 法出力

を推定することができるのが確認できる．図 4.5 に比誘電率推定値における各誘電層境界の再構成画像を示す．位置推定誤差から各誘電層境界の定量評価を行う．外部層境界及び，内部層境界の位置推定誤差はそれぞれ約 7.3mm，約 8.5mm となった．各層とも 1cm 以内の精度で推定できることが確認できる．また，同図の内部境界推定点の  $x = 3.0\text{m}$  付近の境界の精度が劣化していることが確認できる．反射波信号からこの回転角度  $\phi = 2\pi$  付近の受信信号の応答が小さくなっていることが読み取れ，境界推定精度は観測距離の抽出誤差が主要な原因である．

次に，同誘電体目標に対し，各受信信号に Capon 法を適用した場合の性能評価を示す．そこで，Capon 法を適用することで，レンジサイドローブを抑圧する．図 4.8

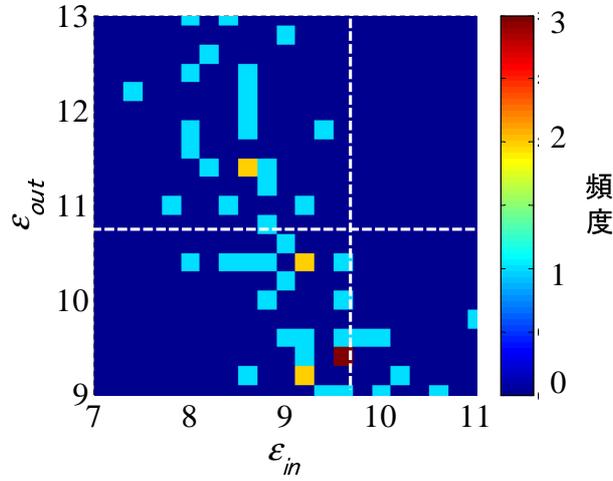


図 4.9: 二層構造誘電体の比誘電率推定値ヒストグラム (Capon 法)

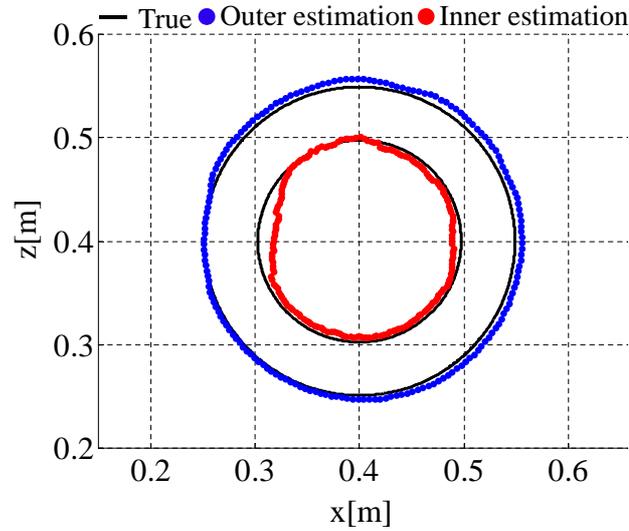


図 4.10: 比誘電率推定値の二層構造誘電体の再構成画像 (Capon 法)

に Capon 法出力及び距離点を示す. 図 4.4 と比較すると, 外部層境界反射波サイドローブが抑圧されていることが確認できる. 同図の第一到来波距離点群に RPM 法及び, Envelope 法を適用し, 外部層境界を推定する. 同反射波距離点及び透過波

距離点を用いて、誘電率推定法を適用する。図 4.9 に各層の比誘電率推定値のヒストグラムを示す。比誘電率推定値は外部誘電層が 10.68, 内部誘電層が 9.02 となる。ここで、各層の探索範囲は外部誘電層が 9.0 から 13.0, 内部誘電層は 7.5 から 11.5 に設定し、刻み幅は 0.2 とする。各層の推定比誘電率の相対誤差は、外部誘電層が約 2.5%, 内部誘電層が約 7% となり、かなりの高精度で比誘電率を推定することができるのが確認できる。しかし、各層の比誘電率推定値のばらつきが大きいため、ばらつき特性に対応した重みづけ処理の導入が課題として挙げられる。図 4.8 に比誘電率推定値における各誘電層境界の再構成画像を示す。外部層境界及び、内部層境界の位置推定誤差はそれぞれ約 6.5mm, 約 7.7mm となった。各層とも 1cm 以内の精度で推定できることが確認できる。Wiener フィルタの推定結果と比較すると、比誘電率推定精度は外部層は精度が劣化し、内部層は精度が向上していることがわかる。外部層の比誘電率推定精度が劣化した原因として、Capon 法出力結果の外部層距離点を抽出できなかった素子が存在するため、伝搬経路推定および比誘電率推定に誤差が生じたものと考えられる。

### 4.3.2 空洞構造誘電体

次に、空洞構造誘電体を想定した場合における特性評価を行う。図 4.2 右目標を使用する。同目標は外部誘電体の直径を 29.cm としたセメント、内部は直径を 5cm とした空洞であり、高さは 29.8cm で、各層とも円柱形状である。誘電率の真値は、セメント層が 10.95 とする。図 4.11 に、本モデルにおける反射波と透過波の Wiener フィルタ出力及び距離点を示す。二層構造誘電体と同様に内部層反射波応答が微弱であり、比誘電率等の先験情報から内部反射波を抽出する。図 4.12 に先験情報を用いた反射波距離点を示す。図 4.13 に比誘電率推定値のヒストグラムを示す。但し、比誘電率の探索範囲は、外部層が 9 から 13, 内部層が 1 から 5 までとし、刻み幅は 0.2 に設定する。透過波振幅重み付け平均によって、比誘電率推定値は外部誘電層が 9.21, 内部誘電層が 1.46 となり、各層の比誘電率推定値の相対誤差はそれぞれ、外部層が約 15.9%, 内部層が約 46% となる。図 4.14 に比誘電率推定値における各層境界推定の再構成画像を示す。各誘電層境界の位置推定誤差はそれぞれ、約 5.7mm, 約 16mm となる。再構成画像は内部誘電層境界が再現できていないこ

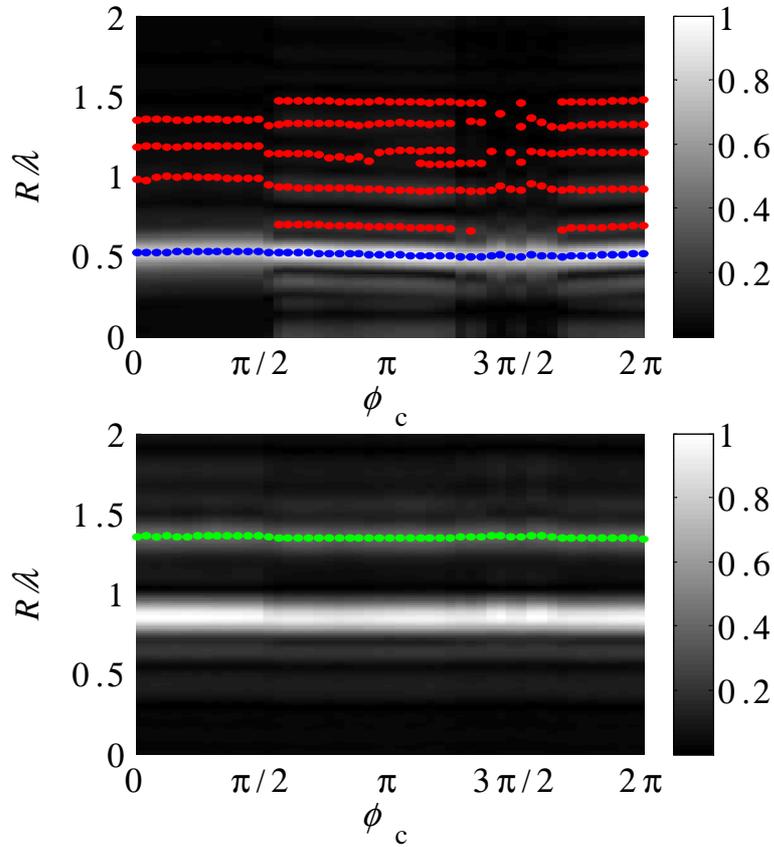


図 4.11: 反射波及び透過波の Wiener フィルタ出力

とが確認できる．これは内部誘電層境界推定に用いた拡張 Envelope 法が，各観測位置から描かれる候補点群の包絡線上に境界が存在するという原理に基づくため，距離点誤差が大きく画像再構成に影響してしまうためだと考えられる．このことから，二層構造誘電体及び本空洞誘電体では，内部層境界反射波距離点の抽出精度に問題があったと考えられる．Envelope 法及び拡張 Envelope 法は候補点群の包絡線を取ることで，誘電層境界を密に推定することができ，伝搬経路推定を可能にする利点を有するが，一方で，距離点抽出時の距離点誤差が境界推定および透過波伝搬経路推定の誤差になってしまう問題を有する．本手法の問題点を解決するためには，距離点抽出精度の改善が必要となることがわかる．さらに，二層構造誘電体の誘電率推定結果と比較したとき，空洞誘電体の誘電率推定精度が劣化しているこ

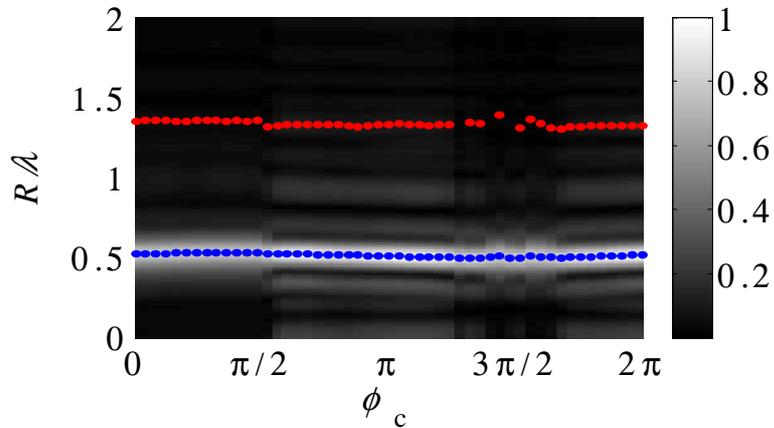


図 4.12: 先験情報を用いた反射波の Wiener フィルタ出力

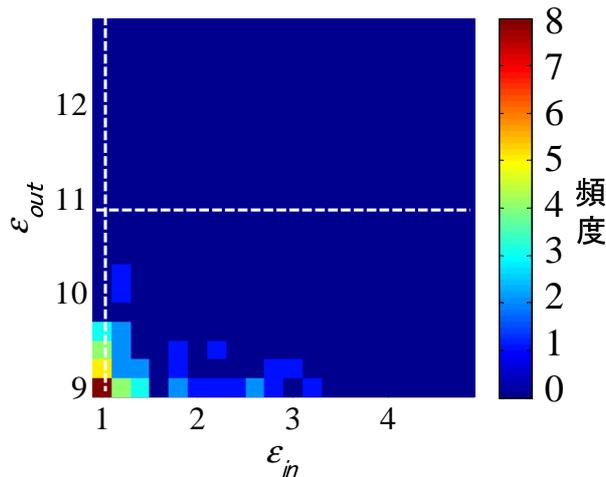


図 4.13: 空洞構造誘電体の比誘電率推定値ヒストグラム

とが確認できる．これは，空洞誘電体は二層の各誘電率のコントラストが大きいためであると考えられる．

次に，同誘電体目標に対し，各受信信号に Capon 法を適用した場合の性能評価を示す．図 4.15 に Capon 法出力及び距離点を示す．図 4.12 と比較すると，外部層境界反射波サイドローブが抑圧されていることが確認できる．先験情報から  $R = 0.9\text{m}$  が内部反射波距離点であることがわかる．同図の第一到来波距離点群に RPM 法及

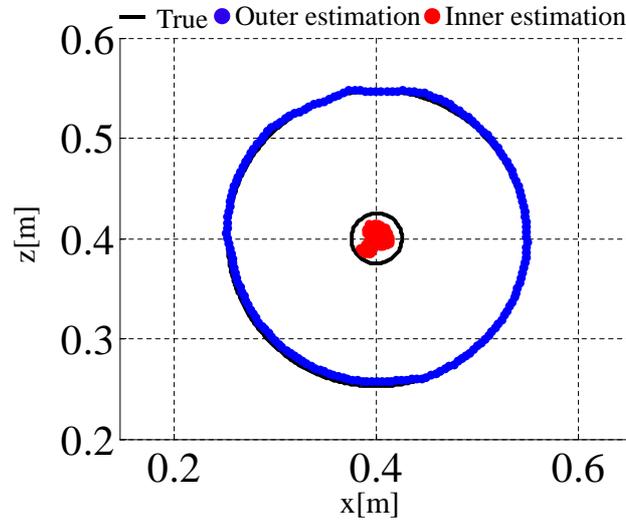


図 4.14: 比誘電率推定値の空洞構造誘電体の再構成画像

び, Envelope 法を適用し, 外部層境界を推定する. 同反射波距離点及び透過波距離点を用いて, 誘電率推定法を適用する. 図 4.16 に各層の比誘電率推定値のヒストグラムを示す. 比誘電率推定値は外部誘電層が 9.55, 内部誘電層が 1.85 となる. ここで, 各層の探索範囲は外部誘電層が 9.0 から 13.0, 内部誘電層は 1 から 5 に設定し, 刻み幅は 0.2 とする. 各層の比誘電率推定値の相対誤差は, 外部誘電層が約 13%, 内部誘電層が約 85% となり, 内部層境界の推定精度が大きく劣化していることが確認できる. 図 4.15 に比誘電率推定値における各誘電層境界の再構成画像を示す. 外部層境界及び, 内部層境界の位置推定誤差はそれぞれ約 6.5mm, 約 13mm となる. Wiener フィルタ同様に, Capon 法出力結果においても比誘電率推定精度が著しく低く, 推定出来ない結果となった.

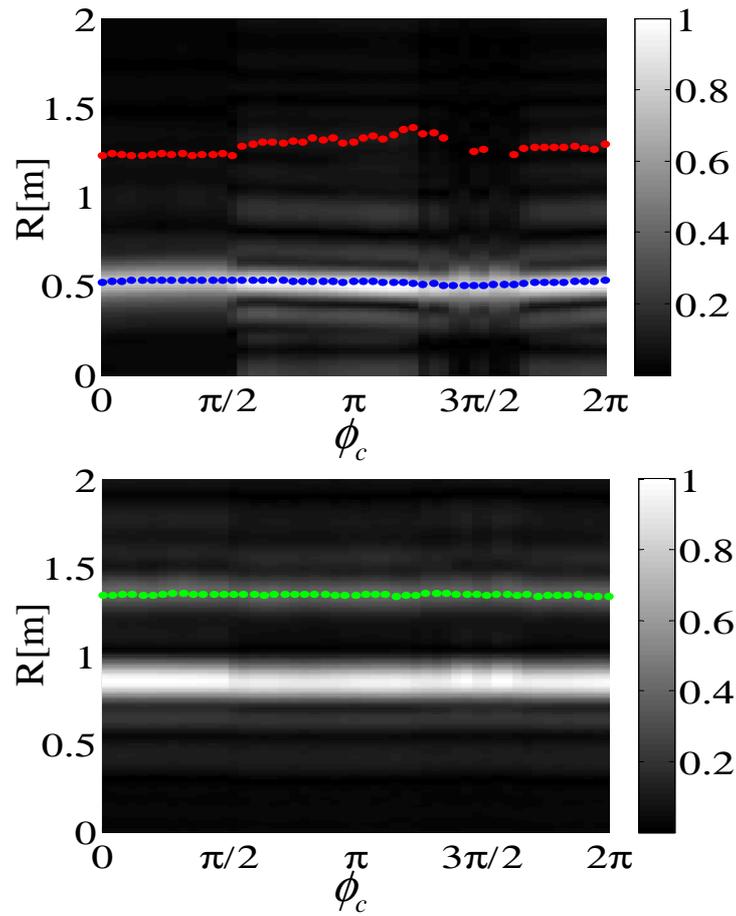


図 4.15: 先験情報を用いた反射波及び透過波の Capon 法出力

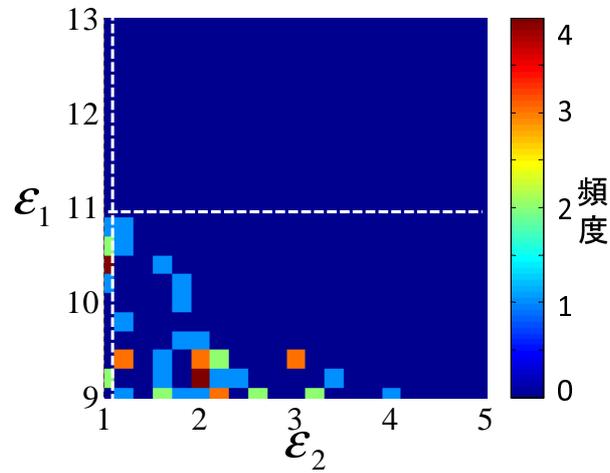


図 4.16: 空洞構造誘電体の比誘電率推定値ヒストグラム (Capon 法)

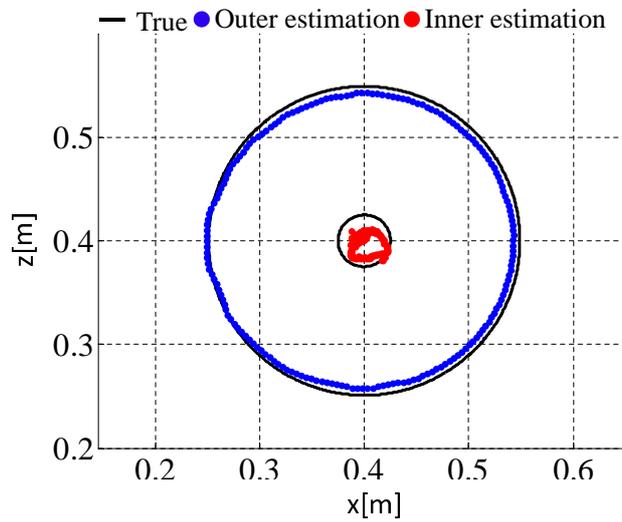


図 4.17: 比誘電率推定値の空洞構造誘電体の再構成画像 (Capon 法)

## 第 5 章

### 結論

本論文では、非侵襲生体計測や非破壊検査等を想定した UWB 内部画像レーダのための拡張 Envelope 法を用いた高精度誘電率境界及び誘電率推定法を提案した。従来法として、RPM 法による誘電体境界推定を利用した誘電率推定法が報告されている。しかし、同手法は単層誘電媒質のみを想定しているため、人体等の複数層構造の媒質に対応できない問題があった。本論文では、従来法を拡張し、二層構造誘電体を想定した誘電率推定法を提案した。各層内部への伝搬経路を推定するため、内部層境界推定のための拡張 Envelope 法を提案した。拡張 Envelope 法は、外部層境界推定点群及び同法線ベクトルから決定される内部層境界候補点群の包絡線上に内部層境界が存在する原理に基づいている。本手法では、各層境界推定点の法線ベクトルと幾何光学近似に基づいた伝搬経路及び同遅延量を推定し、観測遅延量との差分を最小化することで誘電率を推定する。数値計算において、雑音なしでは、外部層が 5.29 (相対誤差: 6%)、内部層が 2.96 (相対誤差: 2%) の精度で比誘電率を推定し、各層ともに  $1/20\lambda$  の精度の画像再構成を達成した。また、実験データによる性能評価では、実験モデルに対応するため、外部境界推定法及び拡張 Envelope 法をバイスタティックモデルに拡張した。反射波等を効率的に抽出するため、Capon 法を導入した。これによるサイドローブ抑圧の効果はあったものの、所望信号以外の不要な応答も距離点として抽出することを確認した。誘電率等の先験的情報を利用し、適切に選択された距離点を用いた場合、実験データにおいても高精度に誘電体境界及び誘電率推定が可能となることを確認した。今後は、壁内部からの微弱な反射波を正確に抽出する信号処理法の検討が必要になると考える。

## 謝辞

本研究を行うにあたり，多大なるご指導を賜りました桐本哲郎教授に心から御礼申し上げます。また，日頃から熱心なご指導を頂きました情報・通信工学専攻の木寺正平准教授に感謝の意を表します。合同ゼミを通じて貴重なご意見を頂きました内田雅文准教授に深く感謝致します。サーバ管理などの設備管理をして頂きました角田正男技官に御礼申し上げます。最後に，日頃から研究に限らず様々なことに協力頂きました研究室の皆様感謝致します。

## 参考文献

- [1] J.G. Elmore, M.B. Barton, V.M. Mocerri, S. Polk, P.J. Arena, and S.W. Fletcher, "Ten-year risk of false positive screening mammograms and clinical breast examinations," *New Eng. J. Med.*, vol. 338, no. 16, pp. 1089-1096, 1998.
- [2] W. Shao, B. Zhou, Z. Zheng, and G. Wang, "UWB Microwave Imaging for Breast Tumor Detection in Inhomogeneous Tissue," *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2005, pp. 1496-1499, Shanghai, China, Sep. 1-4, 2005.
- [3] W. C. Khor, A. A. Bakar, and M. E. Bialkowski, "Investigations into Breast Cancer Detection using Ultra Wide Band Microwave Radar Technique," *Microw. Conf., APMC* 2009, pp. 712-715, Singapore, Dec 7-10, 2009.
- [4] M. Krieger, Cecile T.M. Brekelmans, etc. "Efficacy of MRI and Mammography for Breast-Cancer Screening in Women with a Familial or Genetic Predisposition," *New Eng. J. Med.*, vol. 351, pp. 427-437, July 29, 2004.
- [5] R. J. Fontana, "Recent System Applications of Short-Pulse Ultra-Wideband (UWB) Technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 52., no. 9, pp. 2087-2103, Sep. 2004.
- [6] F. Ahmad, M. G. Amin, and S. A. Kassam, "Synthetic Aperture Beamformer for Imaging Through a Dielectric Wall," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 41, no. 1, pp. 271-283, Jan. 2005.

- [7] E. J. Bond, X. Li, S. C. Hagness, and B. D. VanVeen, “Microwave Imaging via Space-Time Beamforming for Early Detection of Breast Cancer,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 1, no. 8, pp. 1690-1705, Aug. 2003.
- [8] P. Kosmas, and C. M. Rappaport, “A Matched-Filter FDTD-Based Time Reversal Approach for Microwave Breast Cancer Detection,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 4, pp. 1257-1264, Apr. 2006.
- [9] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, “Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections,” *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens.*, vol. 48, no. 48, pp. 1993-2004, Apr. 2010.
- [10] K. Akune, S. Kidera, T. Kirimoto, “Acceleration for Shadow Region Imaging Algorithm with Multiple Scattered Waves for UWB Radars,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E94-B, no. 9, pp. 2696-2699, Sep. 2011.
- [11] K. Akune, S. Kidera, and T. Kirimoto, “Accurate and Nonparametric Imaging Algorithm for Targets Buried in Dielectric Medium for UWB Radars,” *IEICE Trans. Electronics*. E95-C, no. 8, pp. 1389–1398, Aug., 2012.
- [12] A. Franchois and C. Pichot, “Microwave Imaging-Complex Permittivity Reconstruction with a Levenberg-Marquardt Method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, no. 2, pp. 203–215, Feb., 1997.
- [13] R. Autieri, M. Urso, T. Isernia, and V. Pascazio, “Inverse Profiling via an Effective Linearized Scattering Model and MRF Regularization,” *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens.*, vol. 8, no. 6, pp. 1021–1025, Nov., 2011.
- [14] J. Ren, Y. Zhang, T. Jiang, and W. Chen, “Estimation of Wall Parameters From Time-Delay-Only Through-Wall Radar Measurements,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 59, no. 11, pp. 4268–4278, Nov., 2011.

- [15] R. Solimene, R. D. Napoli, F. Soldovieri, and R. Pierri, “TWI for an Unknown Symmetric Lossless Wall,” *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens.*, vol. 49, no. 8, pp. 2876–2886, Aug., 2011.
- [16] M. Dehmollaian, “Through-Wall Shape Reconstruction and Wall Parameters Estimation Using Differential Evolution,” *IEEE Geosci. & Remote Sens.*, vol. 8, no. 2, pp. 201–205, Mar., 2011.
- [17] 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.
- [18] P.A.Rosen, S.Hensley, I.R.Joughin, F.K.Li, S.N Madsen, E.Rodriguez, and R.M.Goldstein, “Synthetic aperture radar interferometry,” *Proc.ITTT*, vol. 88, No. 3, pp. 333-382, Mar. 2000.
- [19] Y.Yamaguchi, “Disaster Monitoring by Fully Polarimetric SAR Data Acquired,” *Proc. OFTHEIEEE.*, vol. 100, No. 10, pp. 2851-2860, Oct. 2012.
- [20] 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, May 2004.
- [21] 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, Jul. 2007.
- [22] 宇野 亨, “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析,” コロナ社, 1998.
- [23] S. Kidera, and T. Kirimoto, “Efficient 3-Dimensional Imaging Algorithm Using PI Extraction Based RPM for Quasi-Far Field UWB Radars,” *Proc. of IEEE Intl. Conf. on Ultra Wideband 2012*, pp. 561–565, Sep., 2012.

- [24] R. Yamaguchi, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Image Expansion Approach for Target Buried in Dielectric Medium with Extended RPM to Multi-static UWB Radar," *IEICE Trans. Electronics*, E96-B, no. 1, pp. 119–123, Apr., 2012.
- [25] T. Manaka, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Dielectric Constant and Buried Object Boundary Estimation Method with Creeping Wave Suppression for UWB Radars," *IEEE Geosci. & Remote Sens.* in press