

超広帯域レーダのための 超分解能イメージング手法 の研究

電気通信大学 情報理工学研究科

木寺 正平

第57回自動制御連合講演会

2014年 11月10日, 群馬伊香保

発表のアウトライン

研究背景と目的

超分解能イメージング法 (RPM法)

多重散乱波による不可視領域イメージング法

誘電体内部画像化への展開

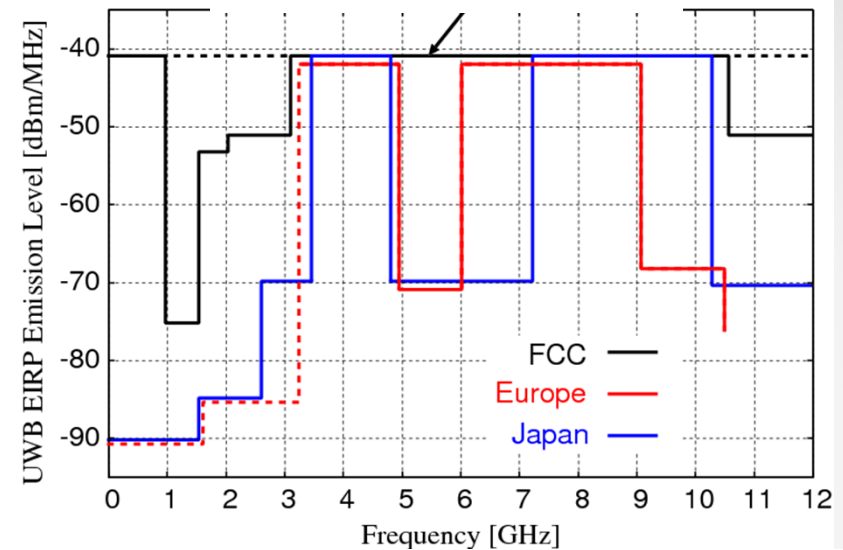
超広帯域 (UWB) 信号

UWB (Ultra Wide-Band) 信号 :
近年各国で小電力に限り
空間利用が認可

UWB 信号の定義

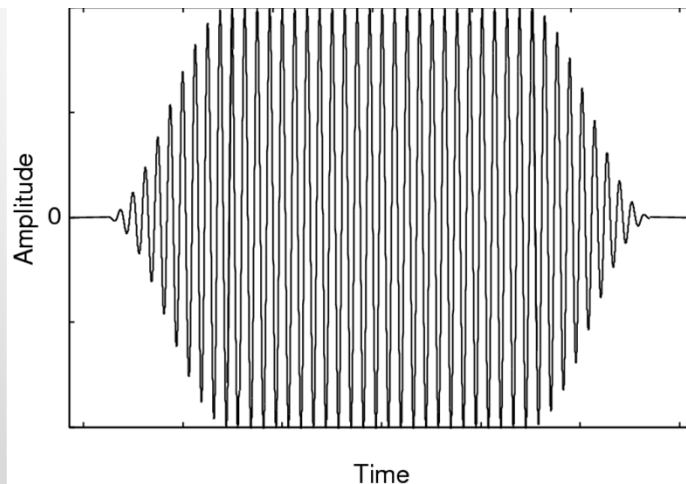
- ・ 比帯域幅が25%以上
- ・ 10 dB帯域幅が 500 MHz以上
(FCC, 2002)

実効放射電力制限 -30 dBm



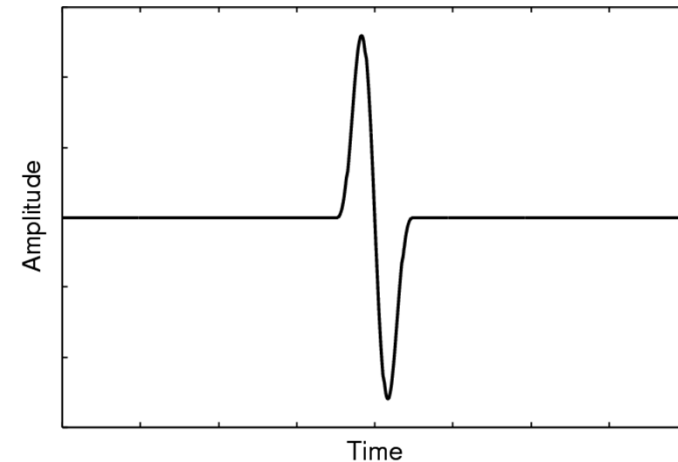
従来のレーダパルス

距離分解能 : **1.5 m** (帯域幅 : 100 MHz)



UWB パルス

距離分解能 : **5 cm** (帯域幅 : 3GHz)



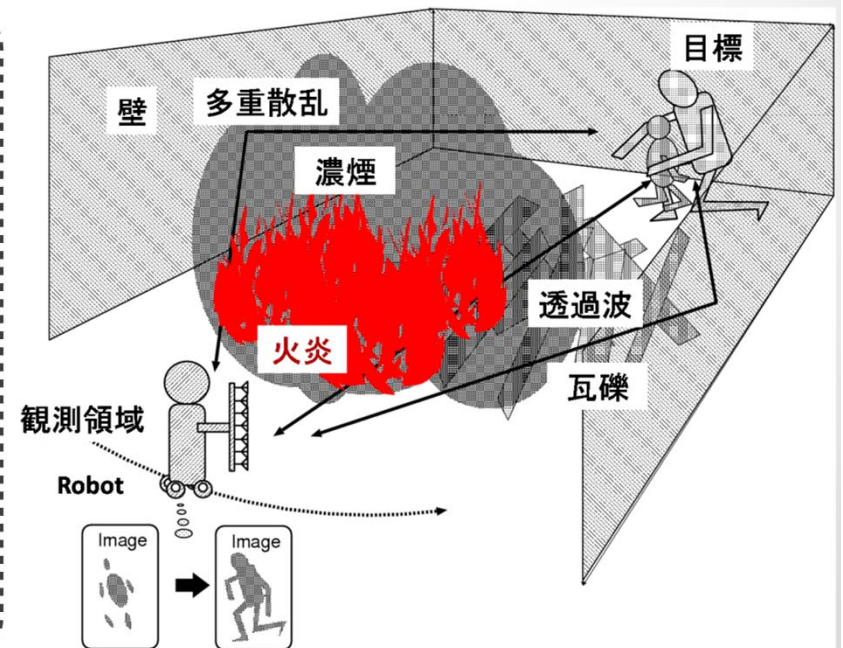
UWBレーダの応用例

UWBレーダ：高い距離分解能（cm級）

- ・ 粉塵・暗闇・強い逆光・見通し外等の環境下で適用可能
 - ・ Laser range finder：3次元的ビーム走査が必要
 - ・ TOF カメラ（赤外線）：精度が環境光・観測距離に強く依存

UWBレーダセンサの用途

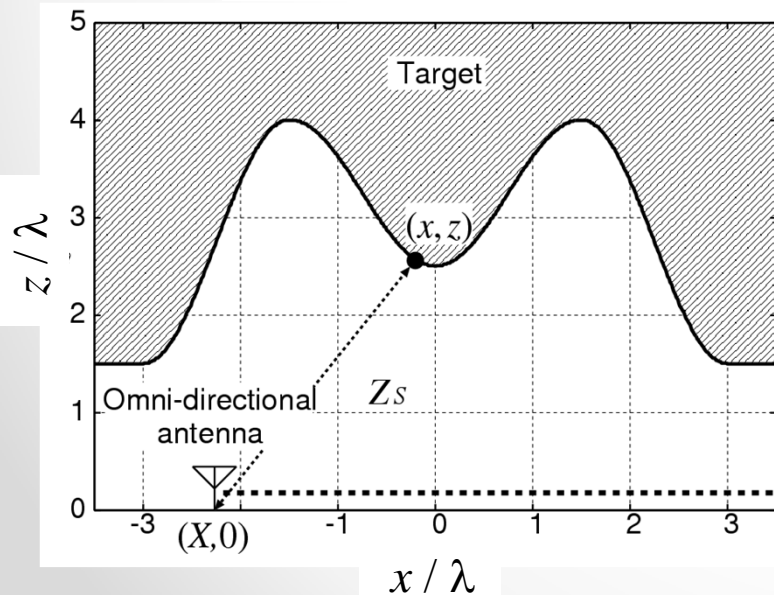
- ・ 救助・資源探査ロボットセンサ
（劣悪な環境下での目標認識・障害物検知）
- ・ セキュリティセンサ
（プライバシー保護＋高い監視性能の両立）
⇒ 単独生活の老齢者・身障者監視
- ・ 誘電体内部センシング技術
（非破壊検査・生体内部イメージング）



システムモデル

- ・無指向性アンテナを直線走査
- ・明瞭な境界面を持つ任意形状目標
- ・送信電流波形：モノサイクルパルス（中心波長： λ ）
（比帯域幅 $\doteq 100\%$ ，距離分解能 $\doteq \lambda/2$ ）

目標境界とアンテナ



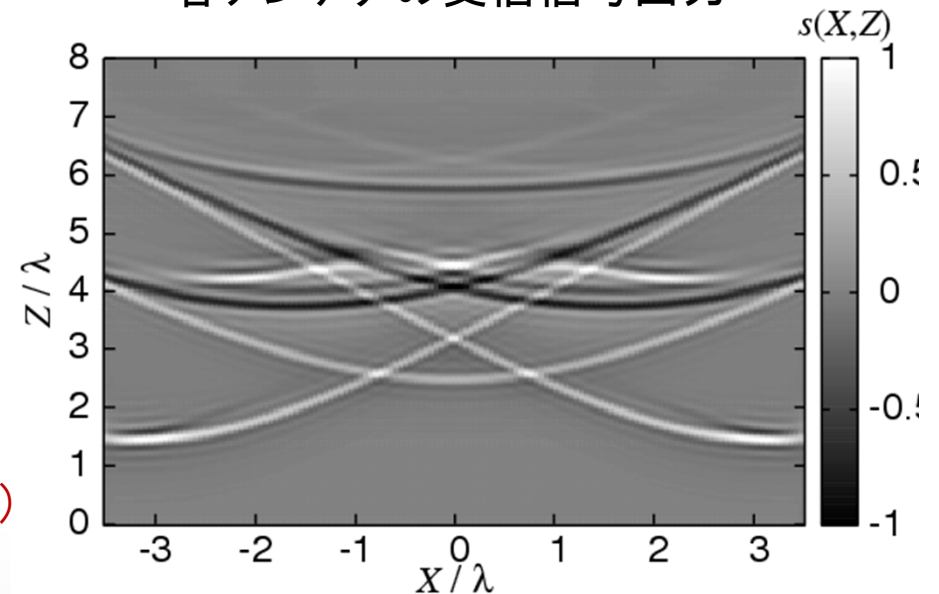
順問題
(観測)

➡

⬅

逆問題
(画像化)

各アンテナの受信信号出力



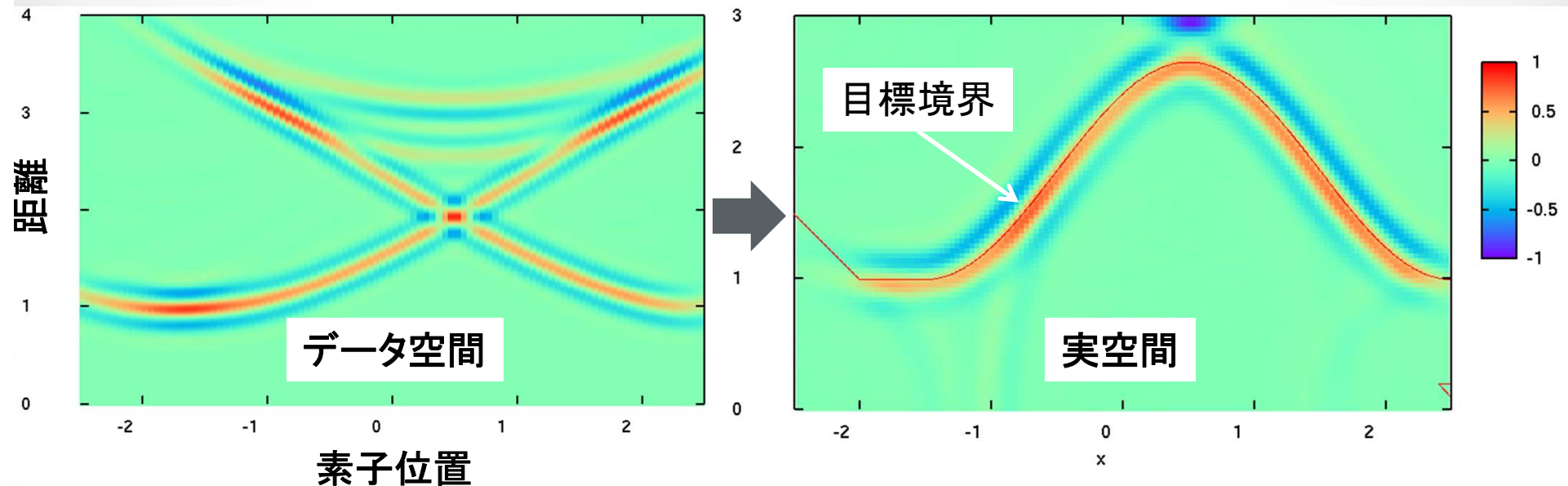
従来のレーダ画像化法(SAR)

合成開口レーダ: Synthetic Aperture Radar (SAR)

原理: 受信信号を位相補償し, 走査方向に積分

観測データ(整合フィルタ出力)

推定像(SAR)



- ・ 空間分解能: 周波数帯域で制限 (技術的・法律的な制約)
- ・ 点像応答のサイドローブによる精度劣化
- ・ 全目標存在領域で信号積分処理: 計算量が膨大

発表のアウトライン

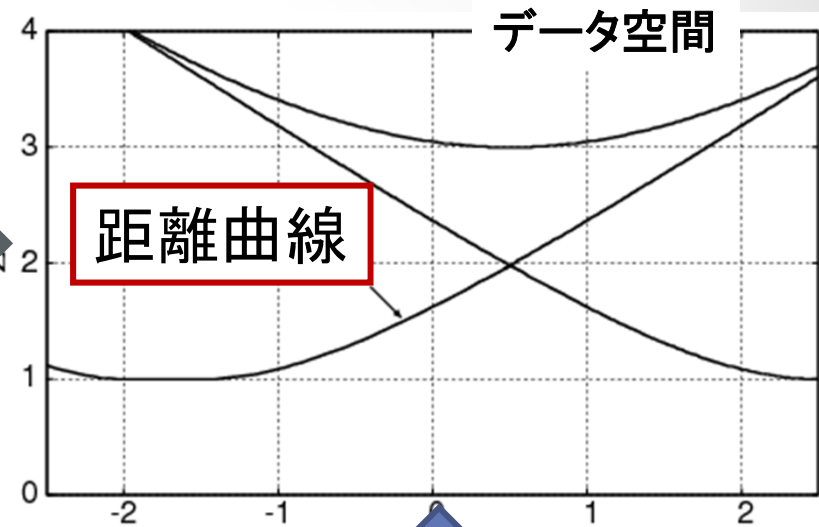
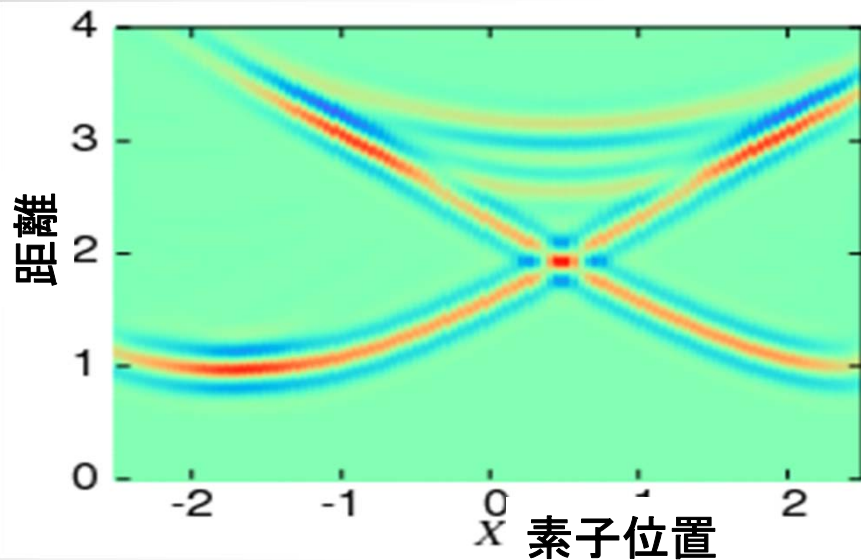
研究背景と目的

超分解能イメージング法 (RPM法)

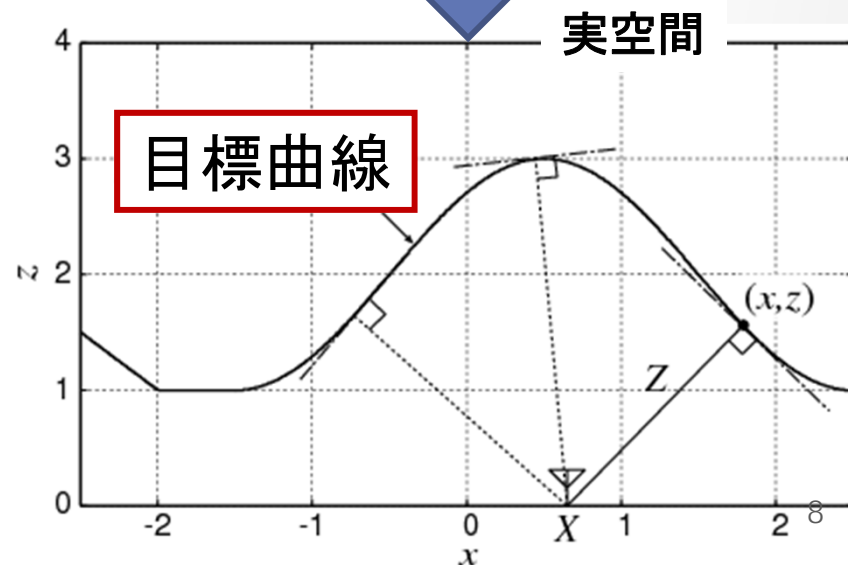
多重散乱波による不可視領域イメージング法

誘電体内部画像化への展開

高速化・高精度化への指針



解析的な関係？



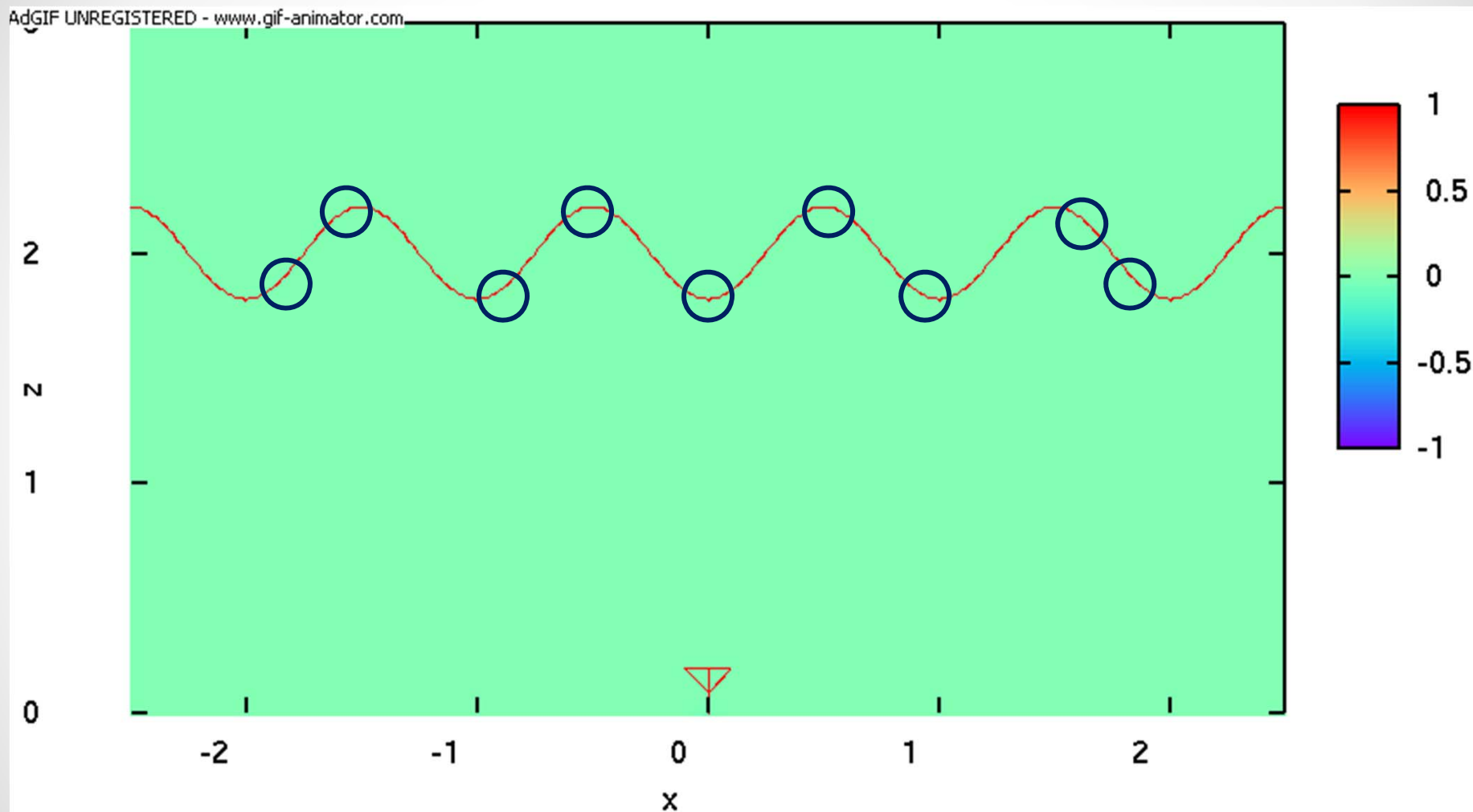
距離曲線と目標曲線との
解析的な関係 (境界散乱変換)

$$\begin{cases} x = X - Z \partial Z / \partial X \\ z = Z \sqrt{1 - (\partial Z / \partial X)^2} \end{cases}$$

⇒ SEABED法

(T. Sakamoto and T. Sato, IEICE 2004.)

複雑目標境界からの散乱現象



- ・多数の目標位置(散乱中心)からの散乱波が干渉する

複雑目標境界からの距離分布

多数の散乱中心からの
観測距離を受信



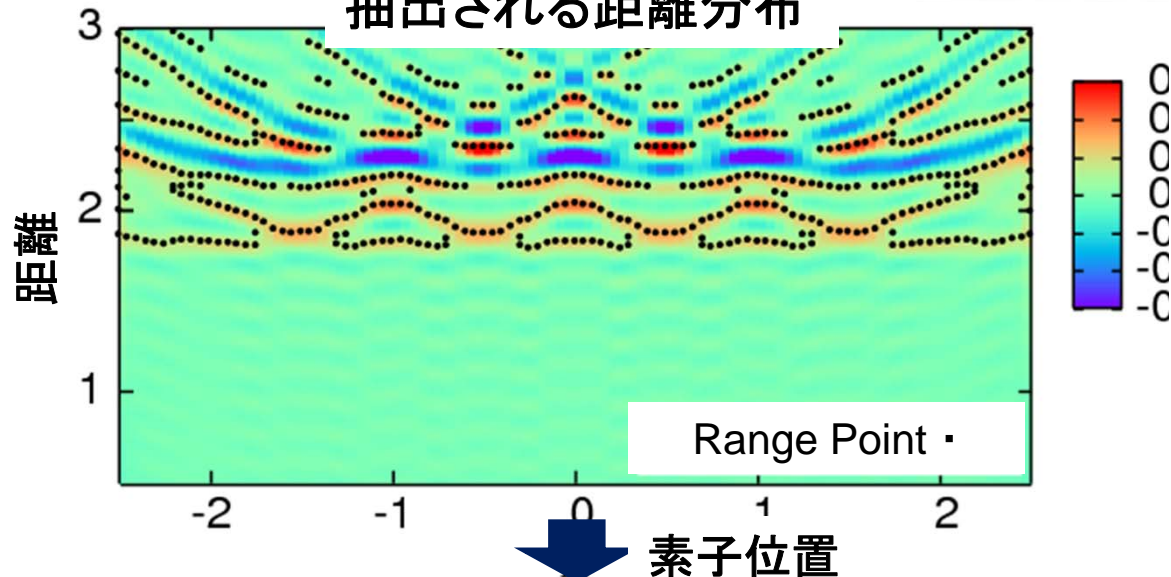
複雑な距離分布が生成



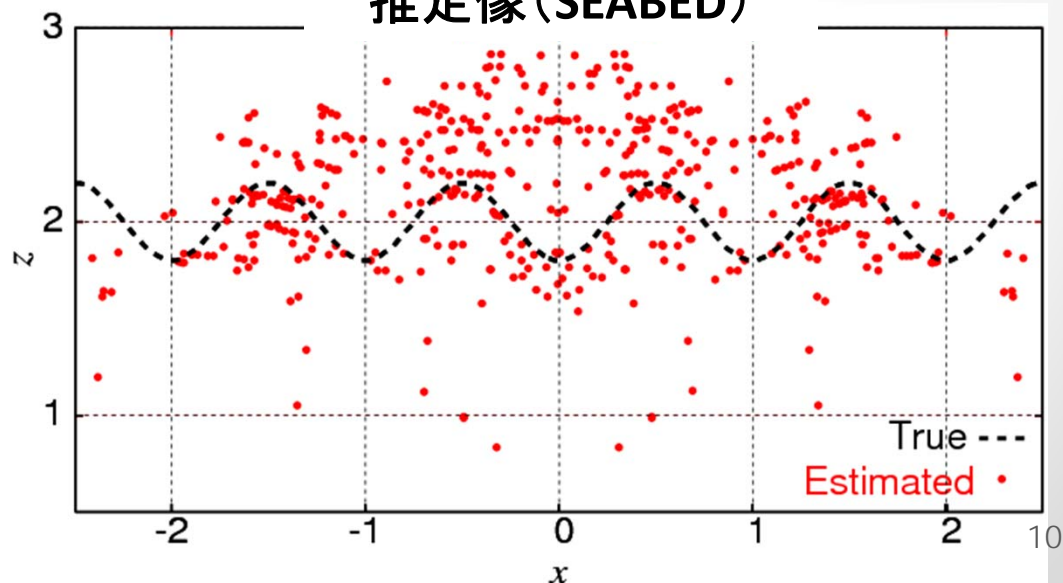
SEABED法

干渉・雑音成分が
微分演算で強調され
不安定性を有する

抽出される距離分布



推定像 (SEABED)



RPM (Range Points Migration)法

原理: 距離点 (素子位置・距離) の大域的特徴に注目

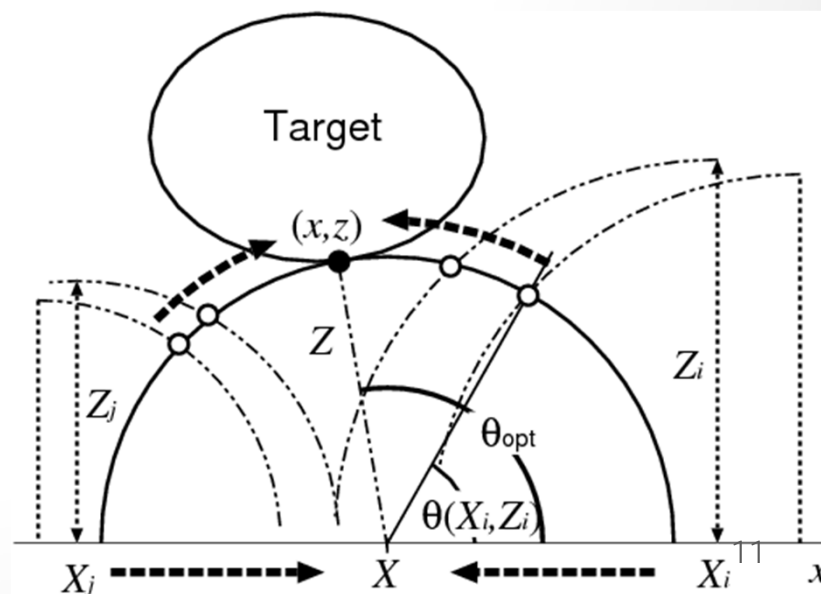
各円 (中心: 素子位置, 半径: 距離) の交点の集中度を統計的に評価

$$\theta_{\text{opt}} = \arg \max_{0 \leq \theta \leq \pi} \left\{ \sum_i s(X_i, Z_i) \exp \left[-\frac{\{\theta - \theta(X_i, Z_i)\}^2}{2\sigma_\theta^2} - \frac{(X - X_i)^2}{2\sigma_X^2} \right] \right\}$$

$s(X_i, Z_i)$: 受信信号 アンテナ位置: $(X, 0)$ 距離: Z

目標境界点 \Rightarrow
$$\left. \begin{aligned} x &= X + Z \cos \theta_{\text{opt}} \\ z &= Z \sin \theta_{\text{opt}} \end{aligned} \right\}$$

- 距離点群の大域的分布を評価
 \Rightarrow 干渉・雑音に起因する
距離誤差にロバスト



RPM法の適用例

RPM法の特徴

到来角推定：

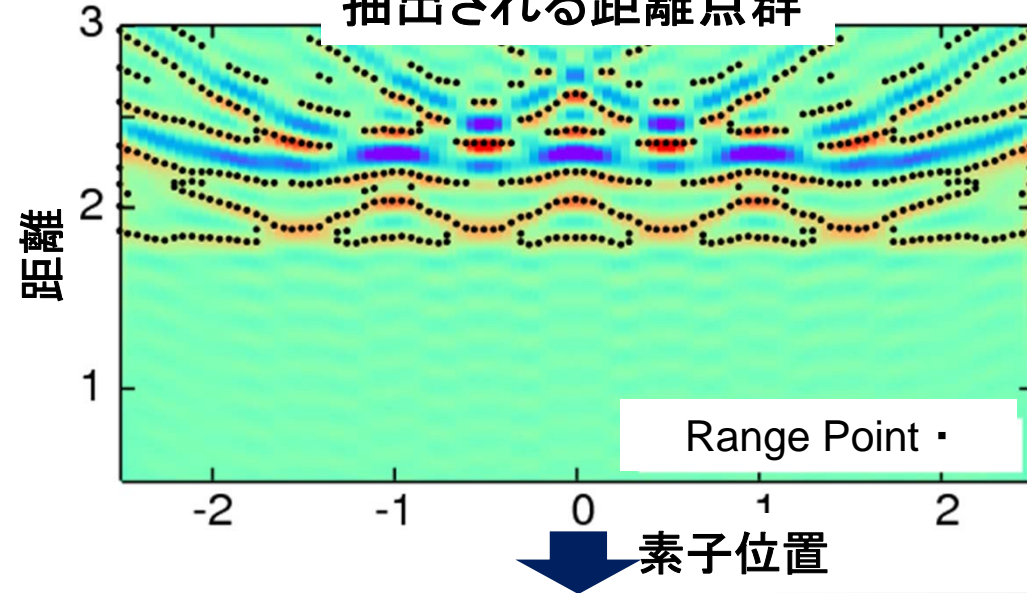
- ・ 距離点分布の大域的特徴を統計的に評価



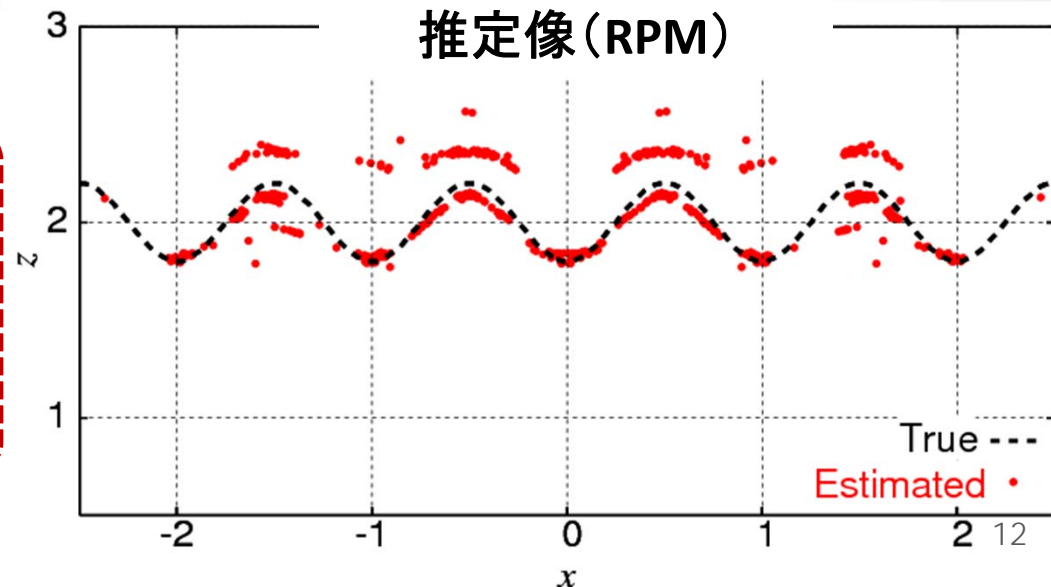
距離点連結が困難な状況でも正確な角度推定を実現

- ・ 距離点連結操作が不要
→ 簡易な実装
- ・ 干渉雑音下でも精度保持
- ・ 処理時間：約0.1sec

抽出される距離点群



推定像 (RPM)

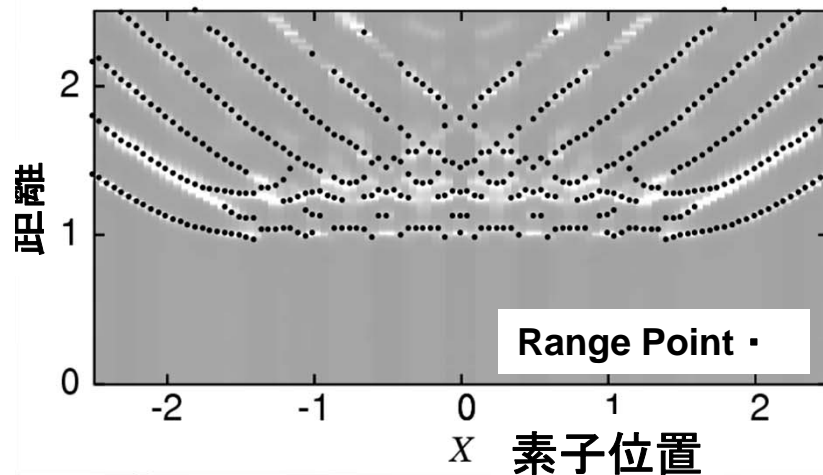


超分解能・超波長精度の実現

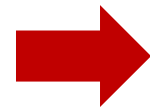
RPM法の精度・分解能
: 距離分解能・精度で決定

周波数干渉計法との併用
⇒ 限界を超える空間分解能・
精度を実現

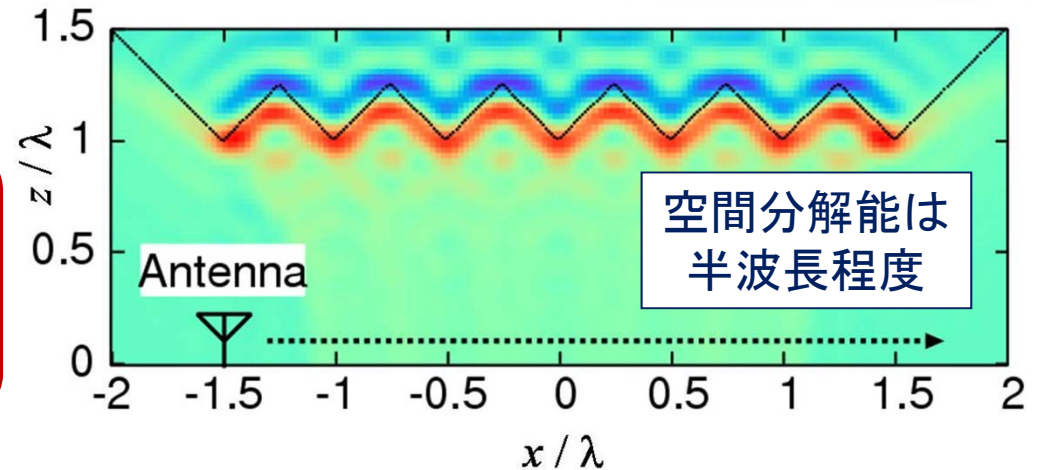
周波数干渉(Capon法)による距離抽出



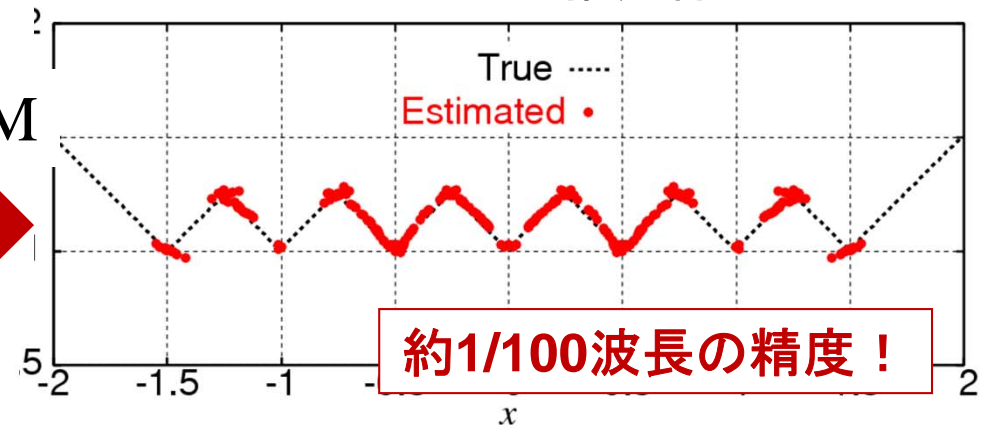
RPM



SARによる推定像



RPMによる推定像



発表のアウトライン

研究背景と目的

超分解能イメージング法 (RPM法)

多重散乱波による不可視領域イメージング法

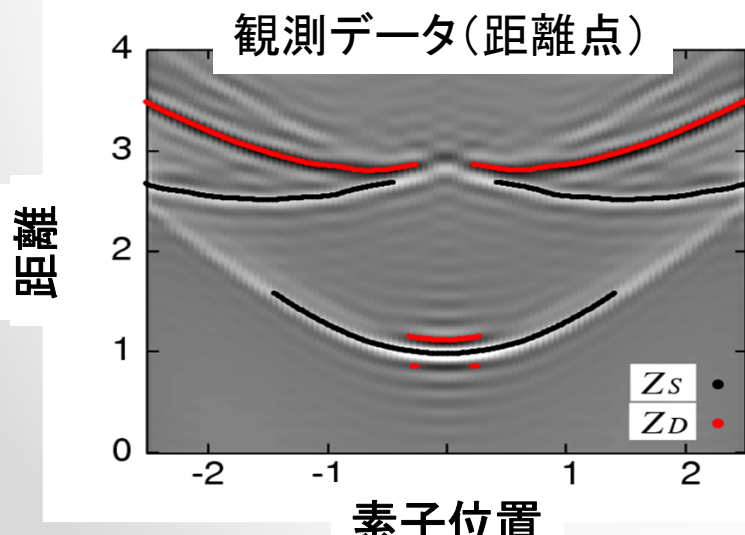
誘電体内部画像化への展開

従来画像化法の問題点

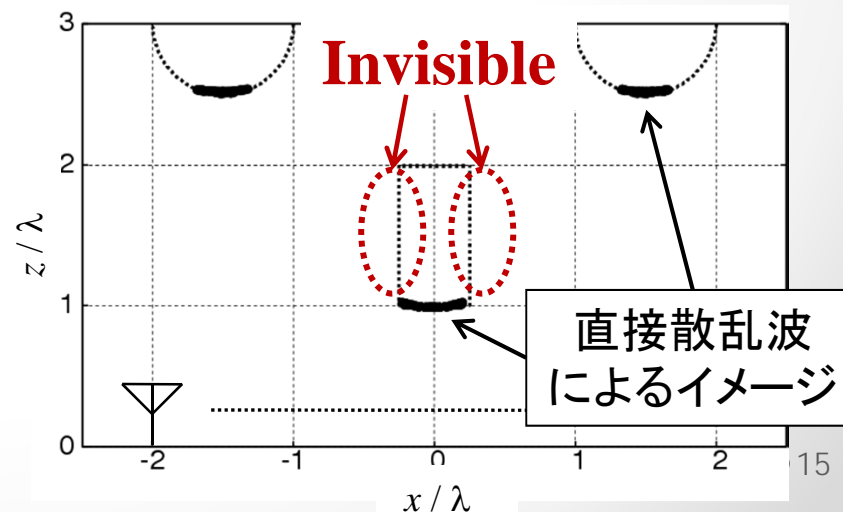
- 合成開口レーダ (SAR)
 - 受信信号を実空間領域で積分 ⇒ **安定性に優れる**
- SEABED法 (T. Sakamoto and T. Sato, 2004)
 - 距離と目標境界の可逆変換 ⇒ **実時間処理性能**
- RPM法 (S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, 2008)
 - 周波数干渉計法との併用 ⇒ **超波長分解能と精度を保持**

共通の問題点

直接散乱波のみを用いて画像化 ⇒ 目標再現領域に制限
複数・複雑目標境界で影領域が増大



RPM



多重散乱波の有用性

複数・複雑目標の場合：
多重散乱波が存在

多重散乱波：
複数散乱点の位置情報を有する

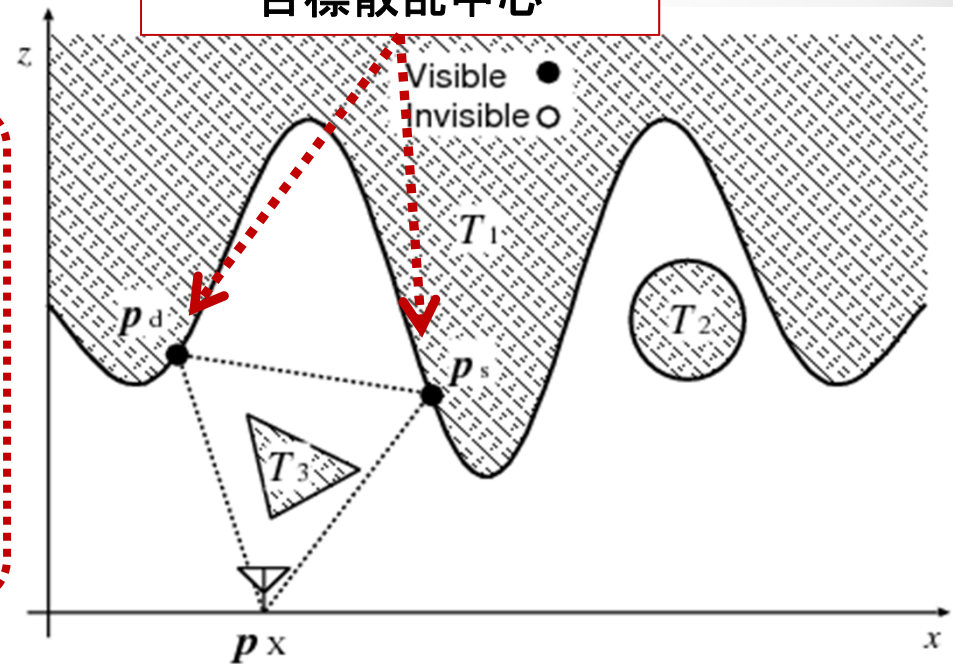


仮想素子による開口面積拡大
(目標再現範囲を拡大)

⇒ 影領域画像化に有用

多重散乱経路と仮想素子

二回散乱波が通過する
目標散乱中心



二重散乱波画像化法の原理

RPM(Range Points Migration)法:
距離点群の大域的特徴を
利用した高精度イメージング法

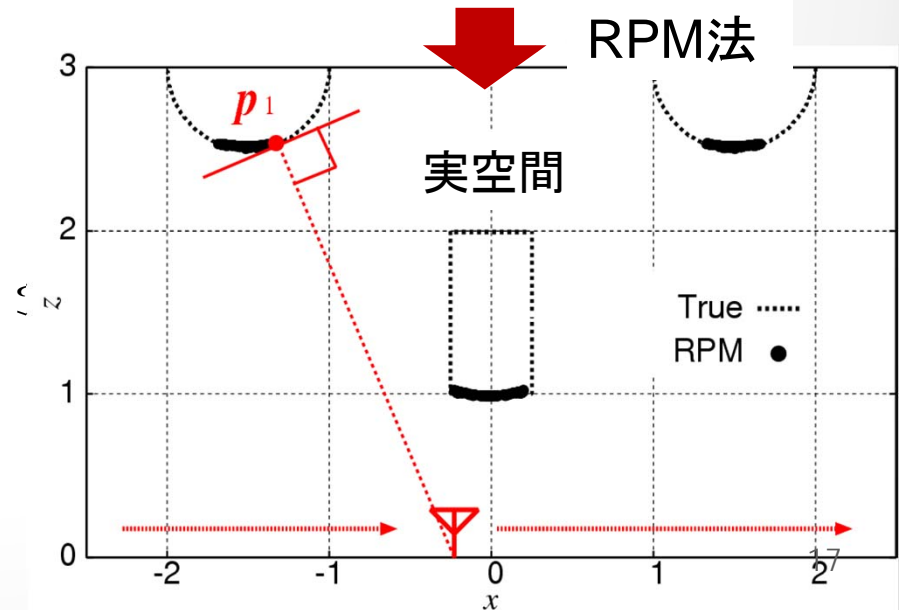
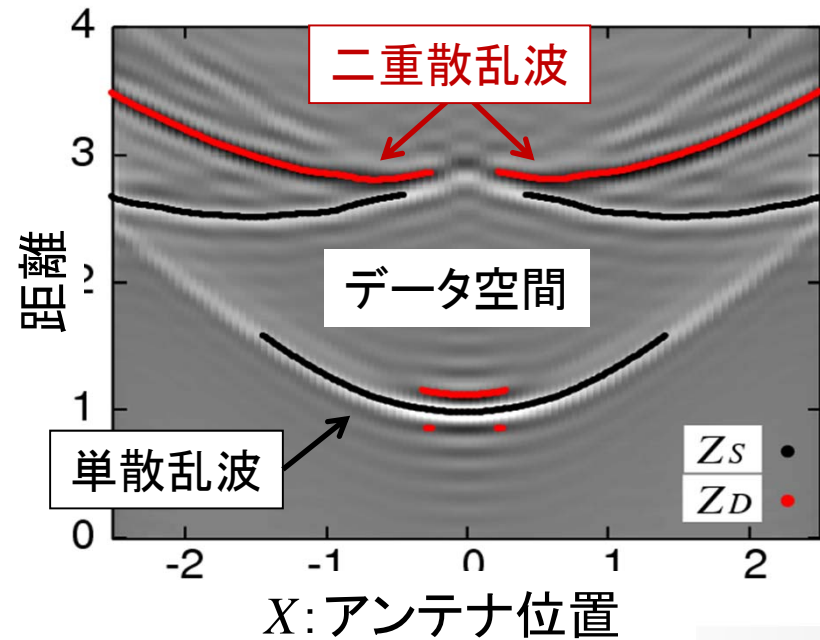
原理1

距離点群 目標点群

$$(X, Z_S) \Leftrightarrow (x, z)$$

単位法線ベクトル: $e_n = (x - X, z) / Z_S$

直接散乱点位置 + 法線ベクトル



二重散乱波画像化法の原理

RPM(Range Points Migration)法:
距離点群の大域的特徴を
利用した高精度イメージング法

原理1

距離点群 目標点群

$$(X, Z_S) \Leftrightarrow (x, z)$$

単位法線ベクトル: $e_n = (x - X, z) / Z_S$



直接散乱点位置 + 法線ベクトル

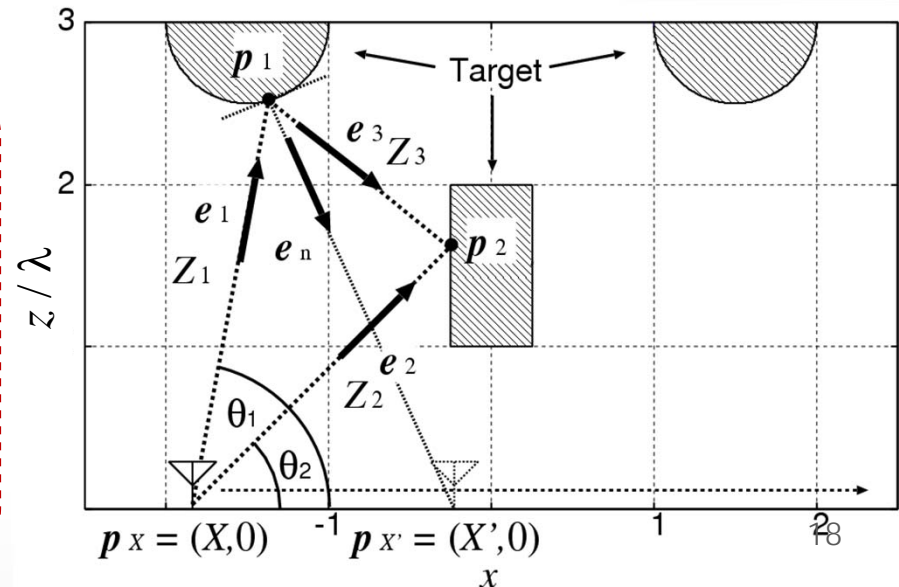
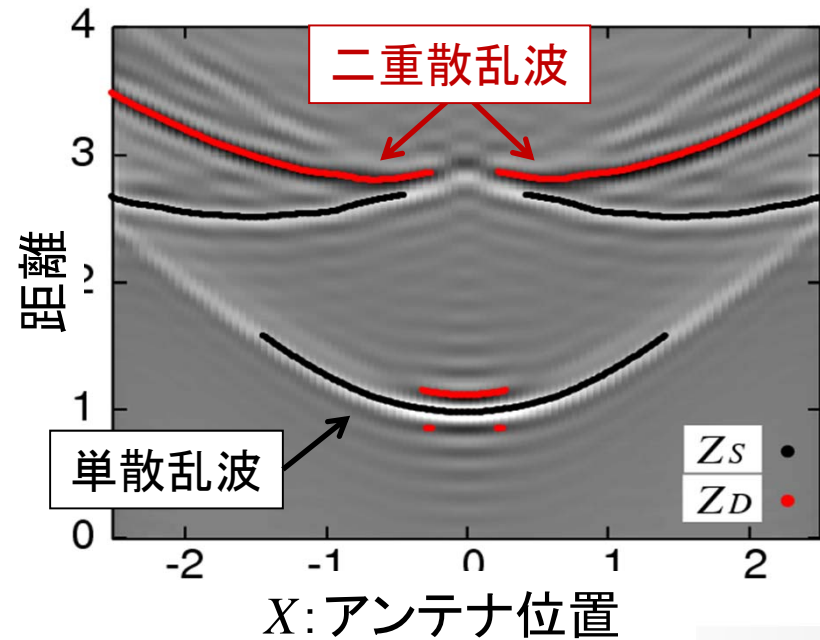
原理2

二重散乱波の距離点微分を利用

$$\frac{\partial Z_D}{\partial X} = -(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$$

θ_1 : 一回散乱点の到来角

θ_2 : 二回散乱点の到来角



二重散乱波画像化法の原理

RPM(Range Points Migration)法:
距離点群の大域的特徴を
利用した高精度イメージング法

原理1

距離点群 目標点群

$$(X, Z_S) \Leftrightarrow (x, z)$$

単位法線ベクトル: $e_n = (x - X, z) / Z_S$



直接散乱点位置 + 法線ベクトル

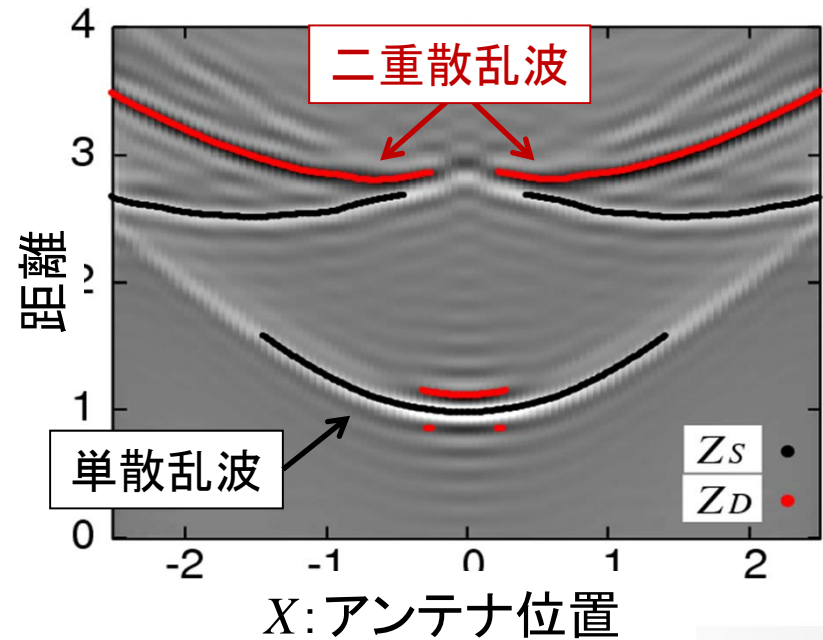
原理2

二重散乱波の距離点微分を利用

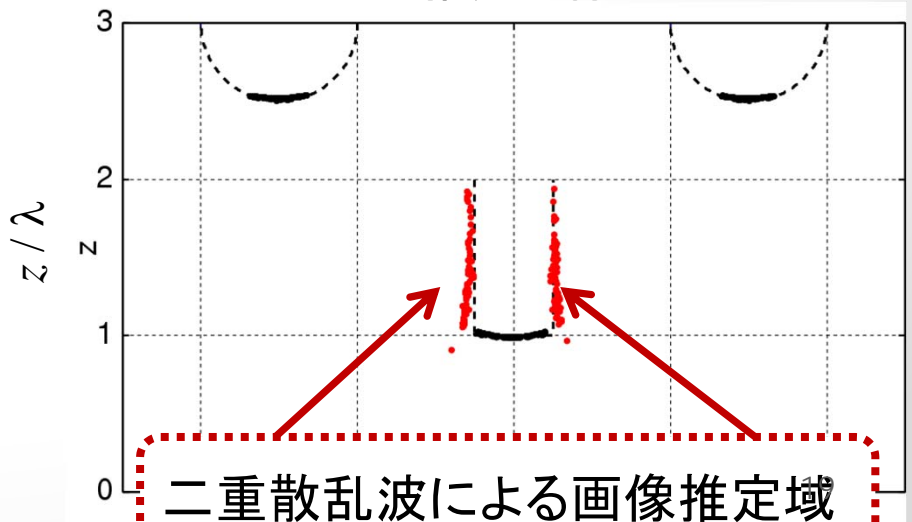
$$\frac{\partial Z_D}{\partial X} = -(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$$

θ_1 : 一回散乱点の到来角

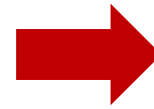
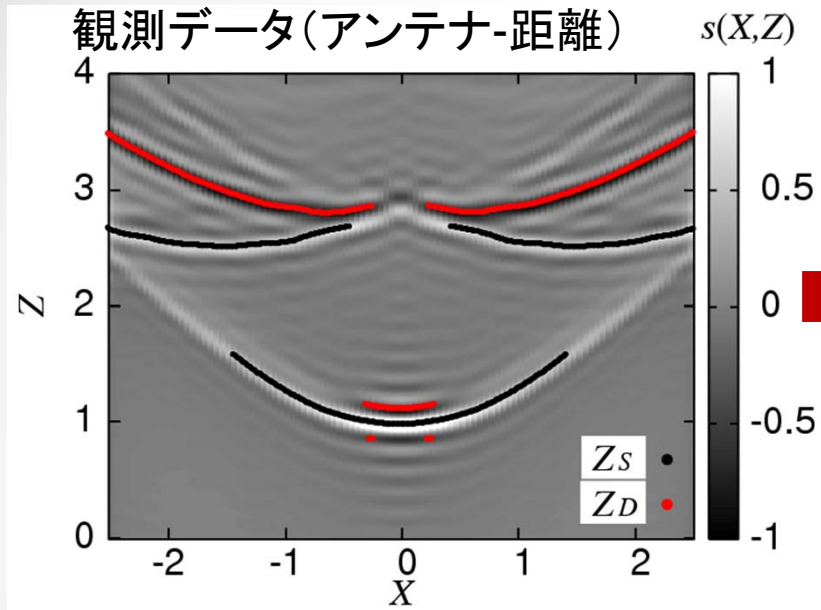
θ_2 : 二回散乱点の到来角



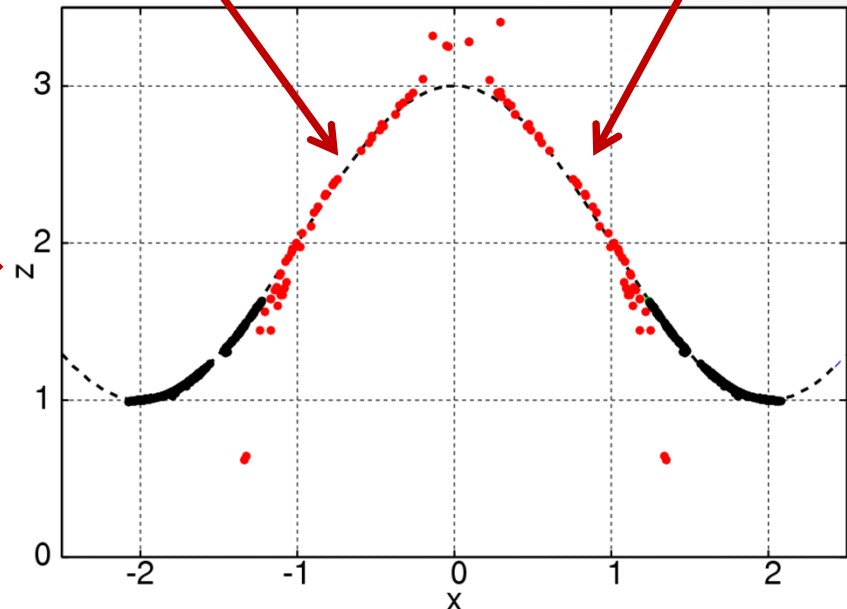
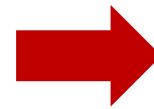
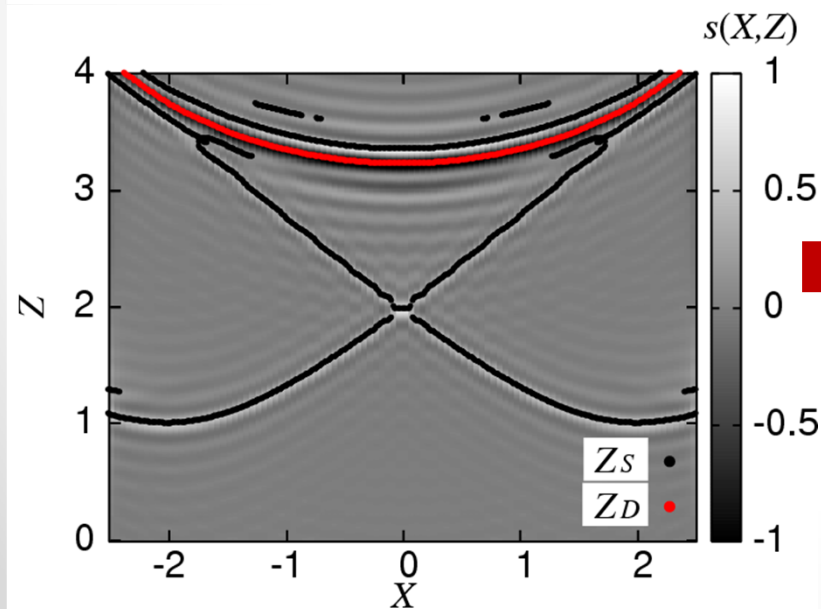
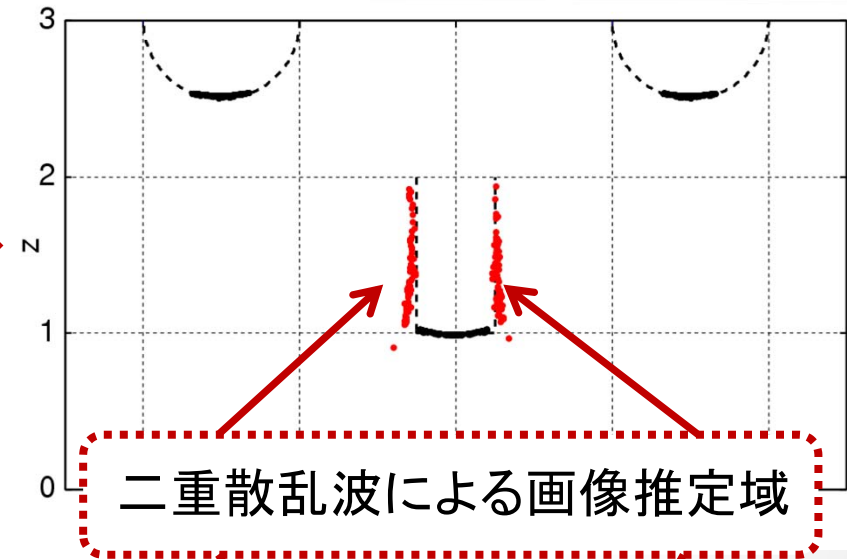
推定画像



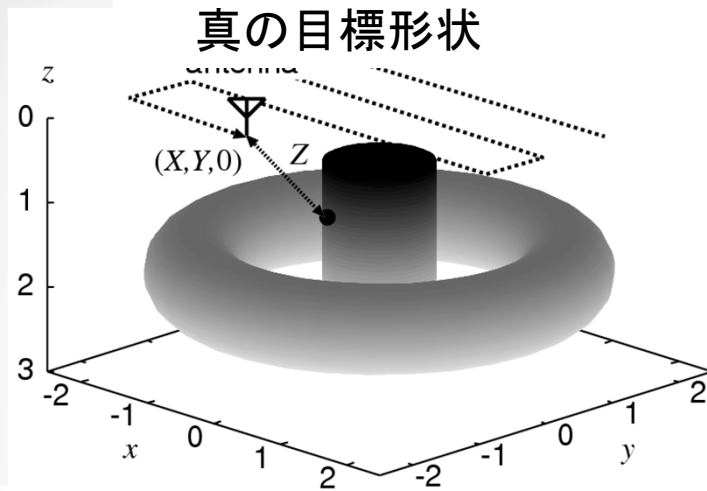
提案法の適用例



推定画像



3次元問題への拡張



観測

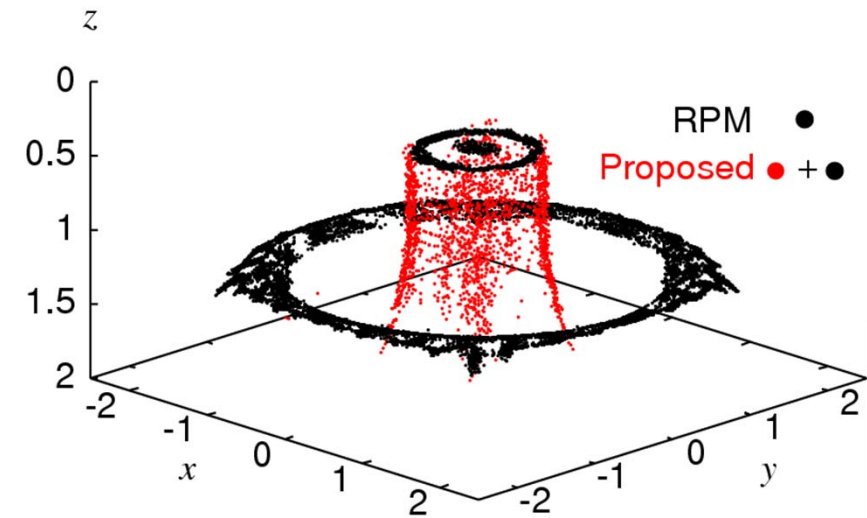
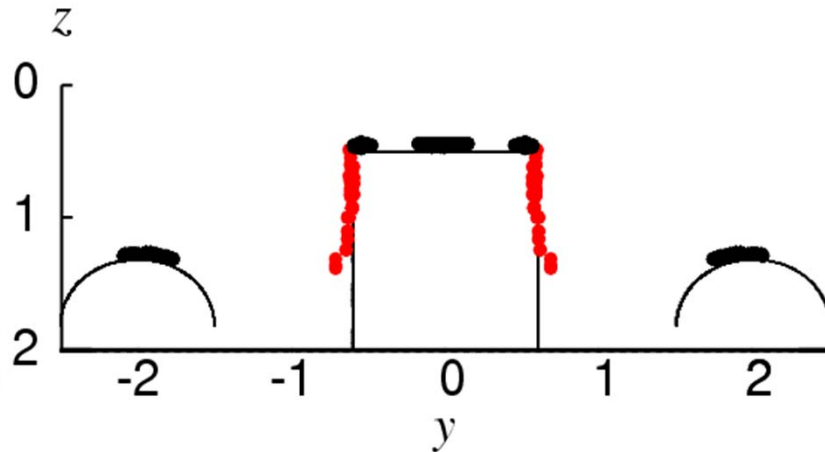
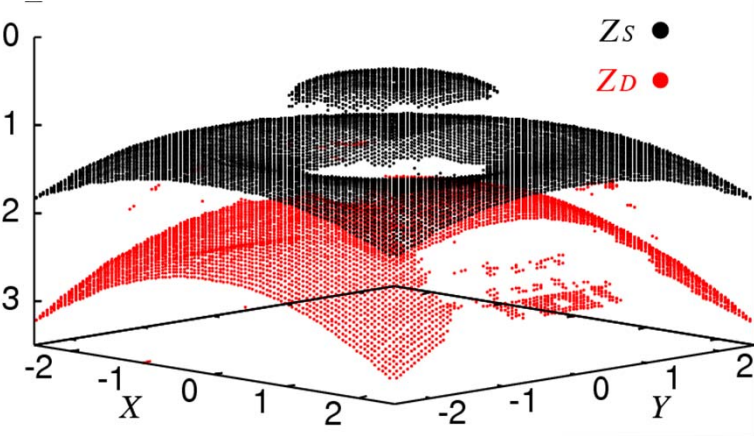


画像化



距離

距離点群



処理時間：(Intel Pentium D 2.8GHz Processor)

SAR：約10万秒 提案法：約10秒

発表のアウトライン

研究背景と目的

超分解能イメージング法（RPM法）

多重散乱波による不可視領域イメージング法

誘電体内部画像化への展開

内部画像化への応用

- 誘電体内部UWBレーダ技術の応用例

非侵襲生体内部計測：癌細胞検知・薬物，爆発物探知

非破壊計測：橋・道路内部等の破損・腐食探知

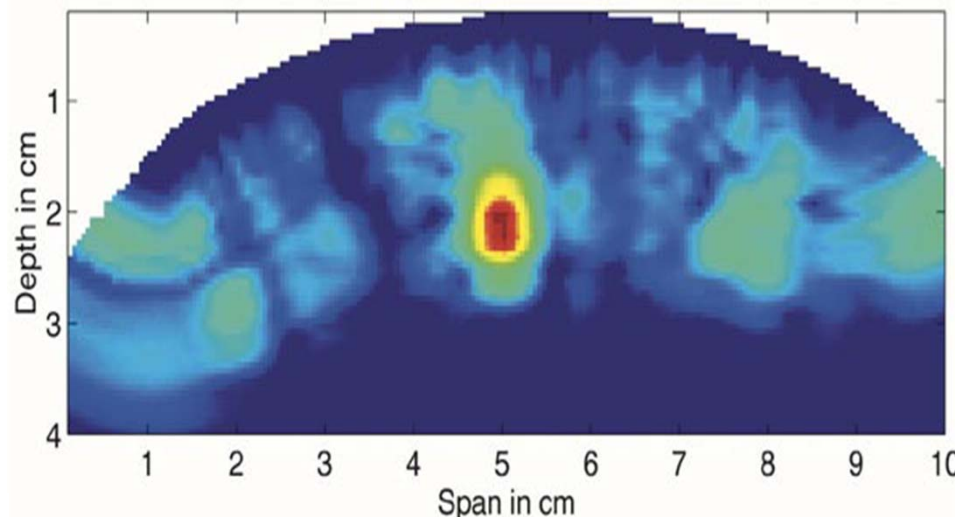
地中埋設物計測：地雷・水道管位置特定

深刻なインフラの老朽化



中央自動車道笹子トンネル天井崩落事故

乳癌イメージング(UWBレーダ)



S. C. Hagness, and B. D. Van Veen, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003.

各種計測技術の特徴

超音波

- 利点：低コスト・簡易・非電離
- 欠点：高周波減衰・弾性圧依存

X線

- 利点：高分解能・高透過性
- 欠点：被験者の被曝・3次元位置の把握困難

MRI

- 利点：高分解能
- 欠点：高コスト・吸収減衰のみ・装置の大型化

THz波

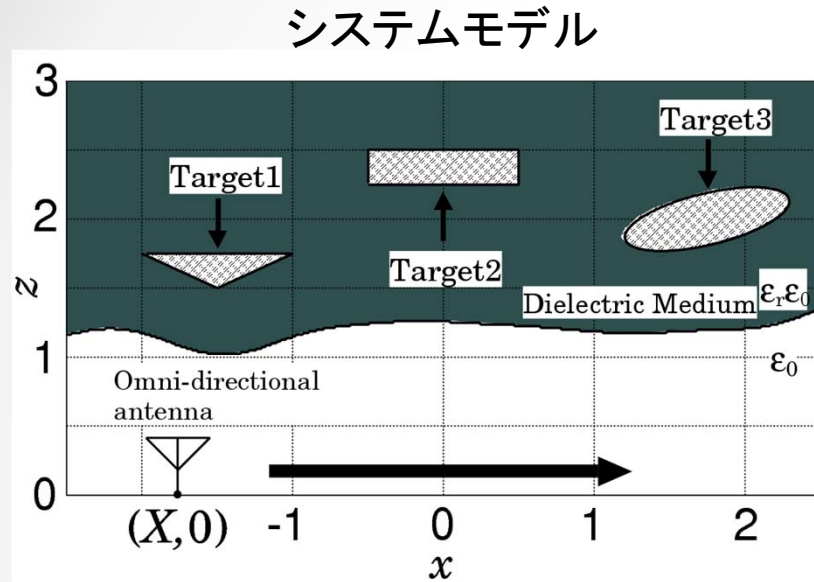
- 利点：皮膚等の表層部の高分解能画像化が可能
- 欠点：到達深度が浅い

Micro波

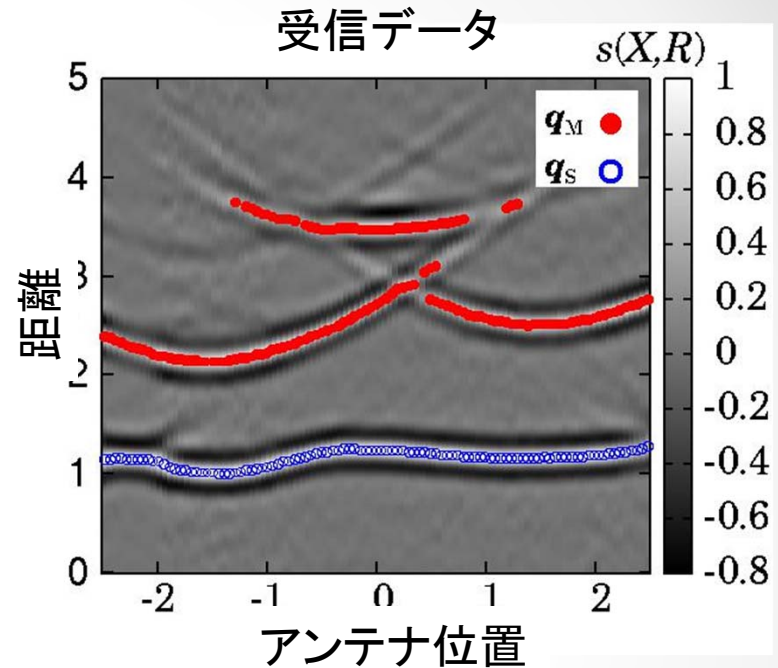
UWB

- 利点：高い透過性・非電離放射線 癌細胞・薬物等の誘電・導電特性を利用可能 治療への可能性：温熱療法 (Hyperthermia)
- 欠点：空間分解能が低い

システムモデルと従来の問題点



観測

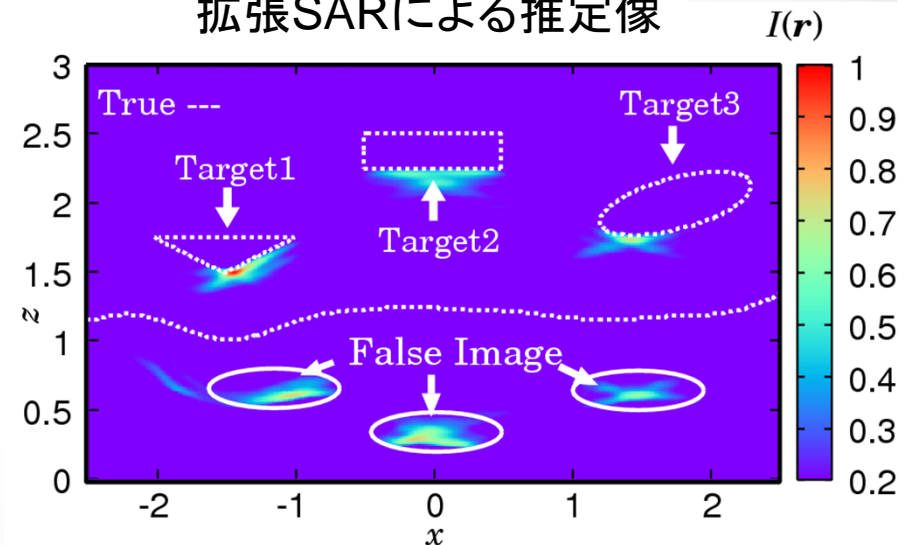


従来技術 (Beamformer, SAR等)

原理: 伝搬遅延信号積分
に基づく結像処理

- ・空間分解能は半波長程度
- ・処理時間が膨大 (特に3次元問題)
- ・虚像の生成

拡張SARによる推定像



拡張RPMによる高分解能画像化法

RPM(Range Points Migration, Kidera et al., 2008)法の特徴:

距離点群の大域的分布を利用

⇒高精度かつ安定な目標境界及び法線ベクトルの推定が可能

内部画像化の原理

境界点＋法線ベクトル



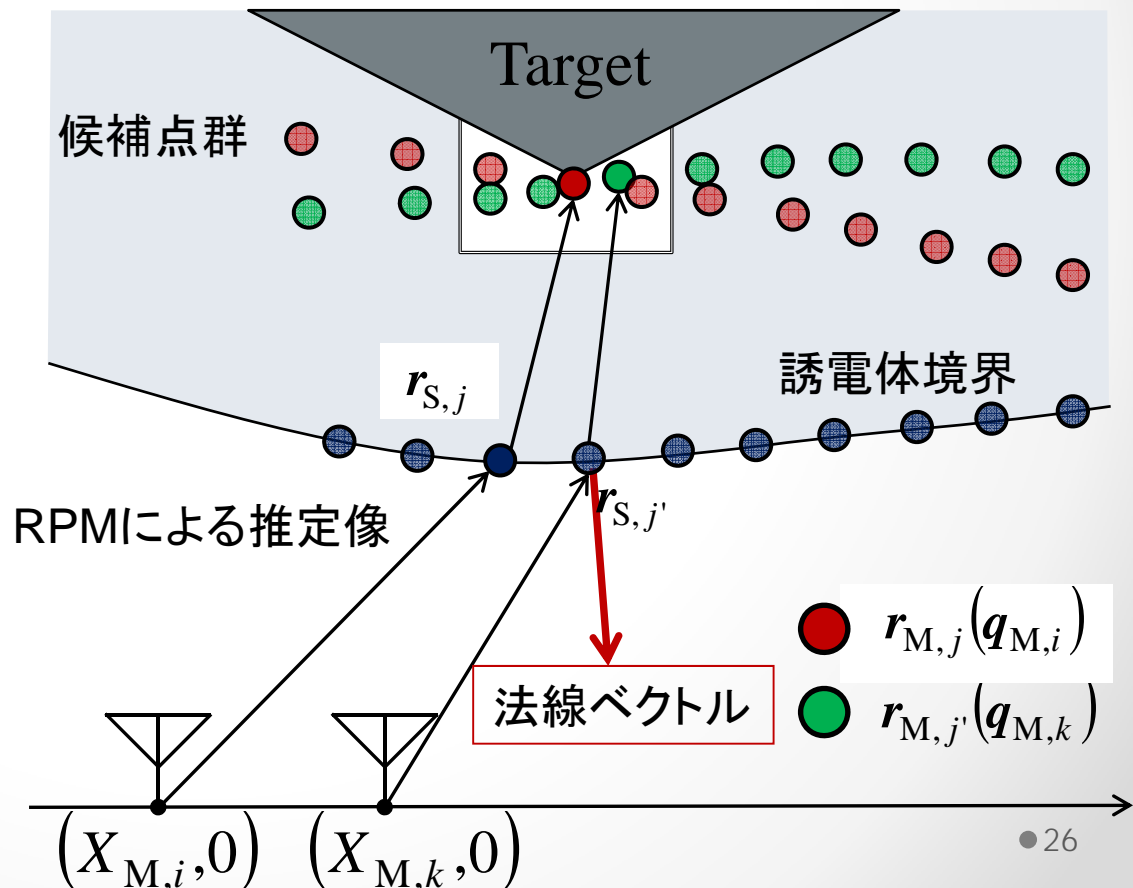
幾何光学近似

内部散乱中心点の候補を決定



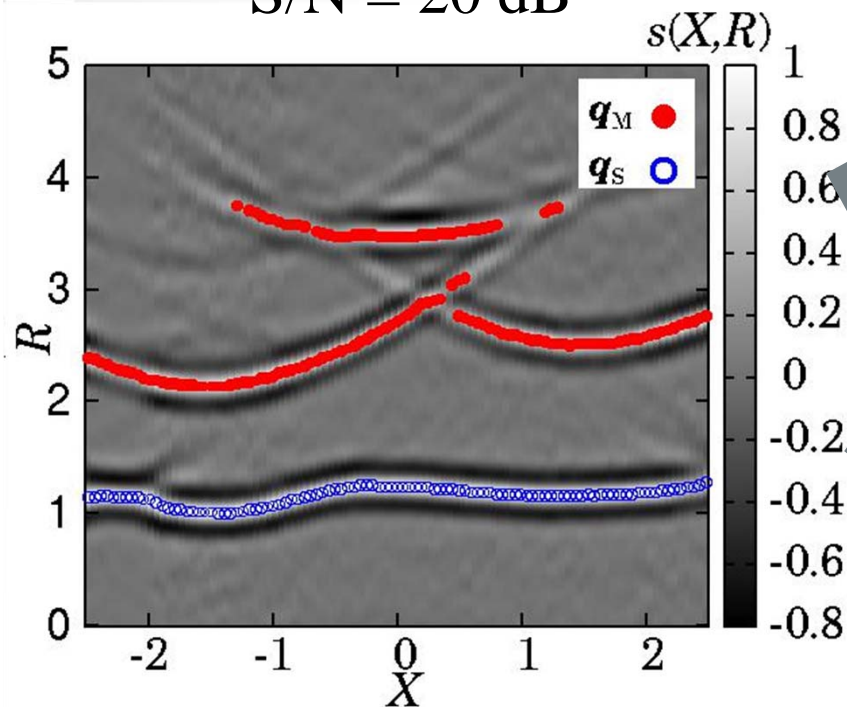
RPMの原理

候補点群曲線の交点の集積度を評価



数値計算による性能評価

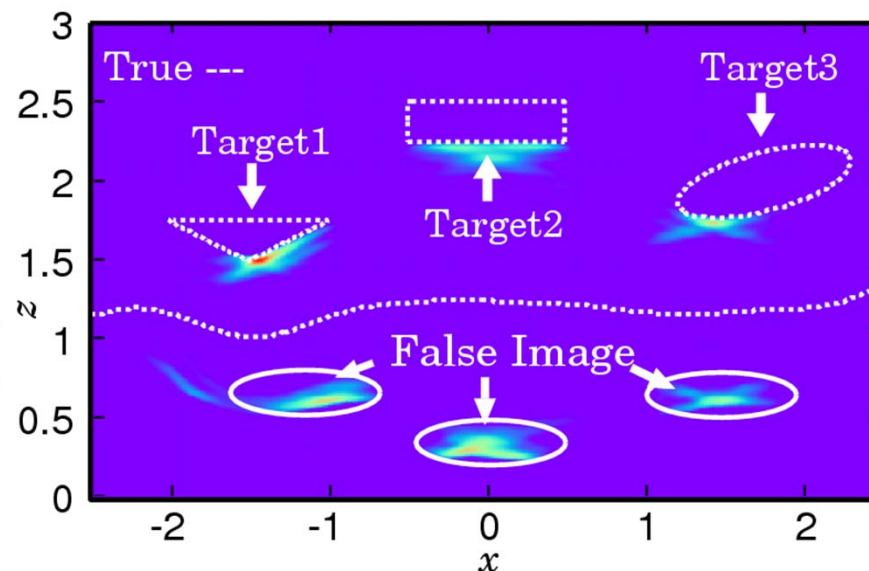
受信データ
S/N = 20 dB



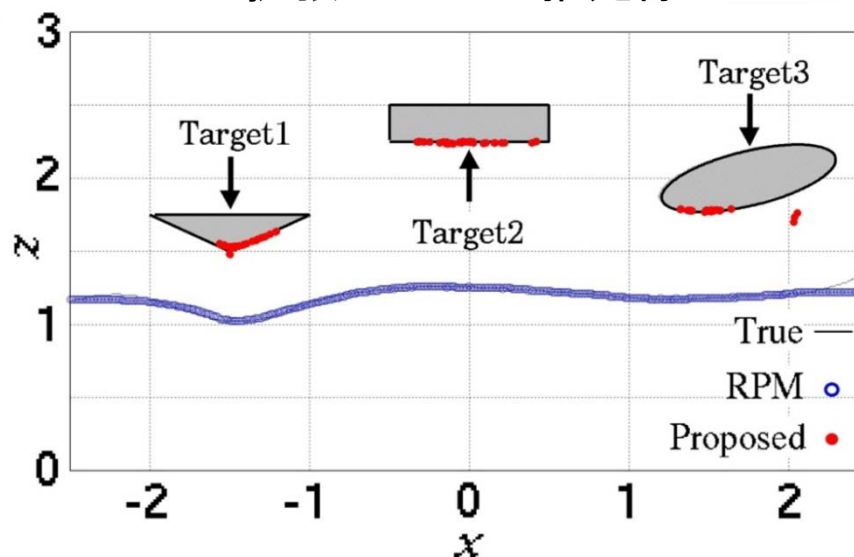
虚像を抑圧し,
高精度内部境界推定が可能
(RMS誤差: 1/20波長程度)

従来法での推定像

$I(r)$



拡張RPMでの推定像



誘電率推定法との融合

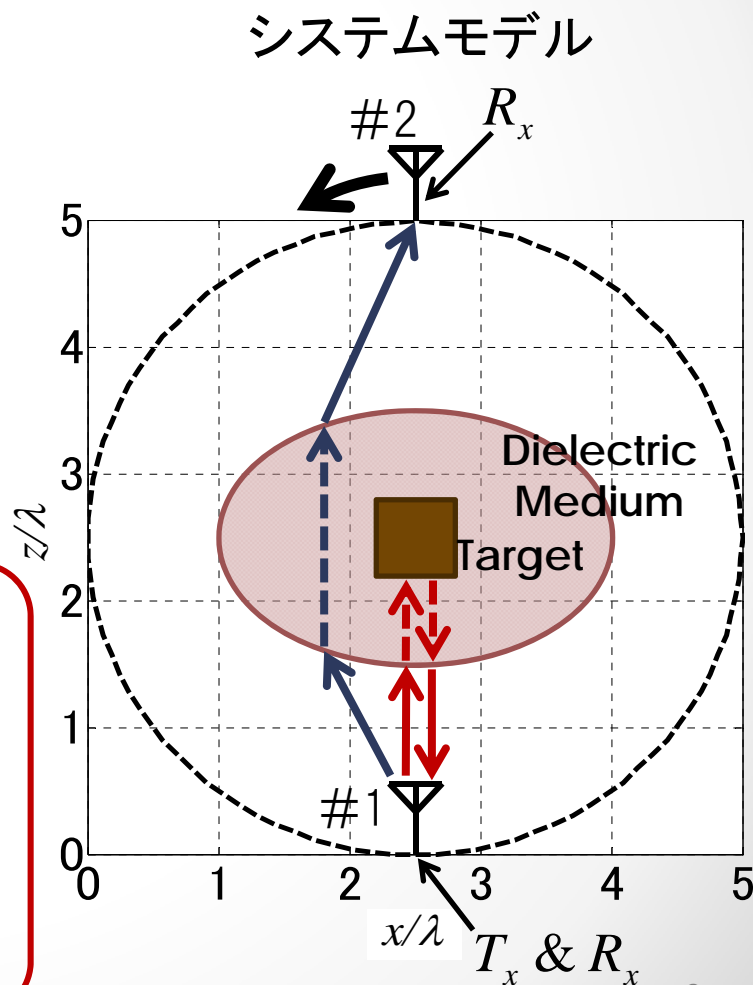
拡張RPM法：誘電体の誘電率推定が必須

従来の誘電率推定法

- ・ 領域積分方程式の数値解析手法
 - ・ 幾何光学近似による推定
- 波長規模誘電体では精度が劣化
(散乱波の周波数特性が要因)

システムモデル

送受信(#1) + 受信素子(#2) を走査
反射波 → 誘電体境界推定
内部目標推定
透過波 → 誘電率推定



実験環境

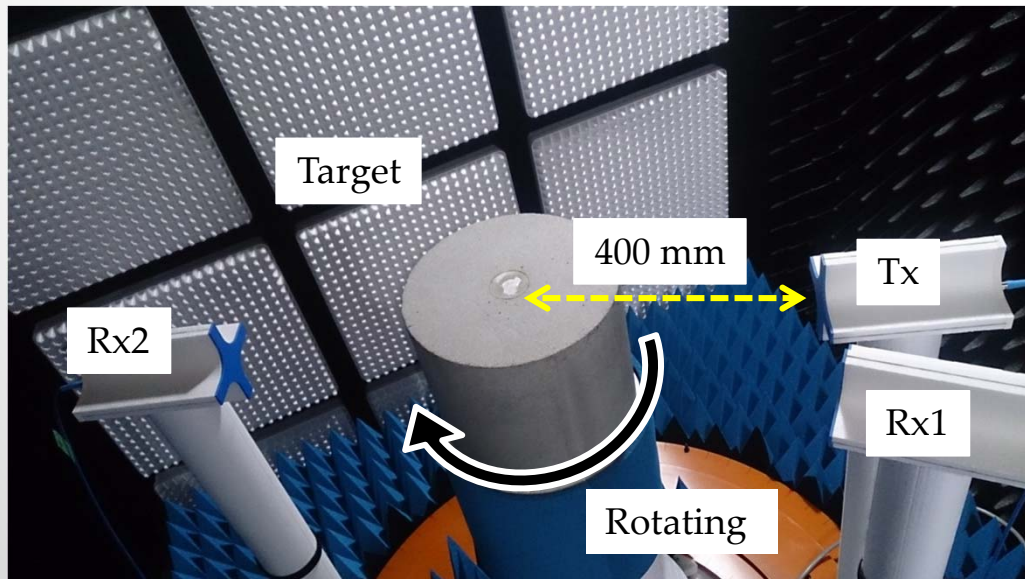
実験システム

- ・ダイポールアンテナ(垂直方向直線偏波)
- ・送受信信号生成: Vector Network Analyzer
- ・周波数掃引幅: 50MHz -5550 MHz (10MHz間隔)
- ・有効帯域幅: 2.0GHz (公称距離分解能: 7.5cm)
- ・有効中心周波数: 2GHz, 波長: 15cm
- ・目標を回転(3.6度刻みで101サンプル)

反射波: Tx-Rx1での受信信号

透過波: Tx-Rx2での受信信号

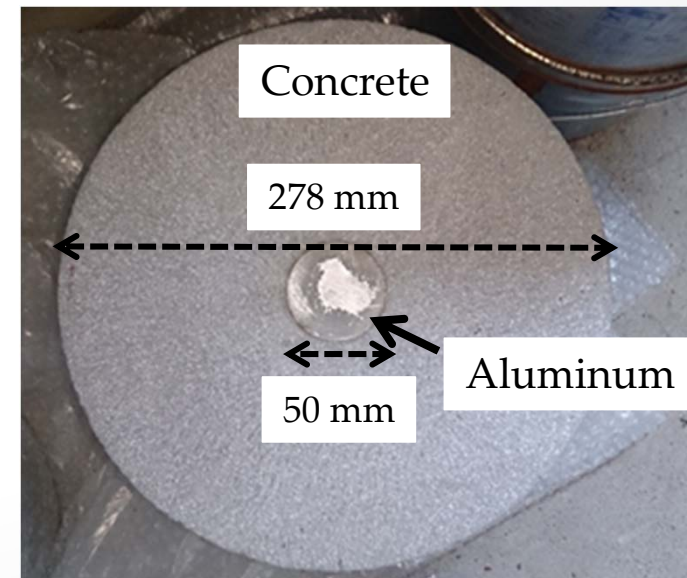
アンテナと目標回転台(本研究助成で一部購入)



RF信号切替スイッチ(18素子対応)
(本研究助成で一部購入)

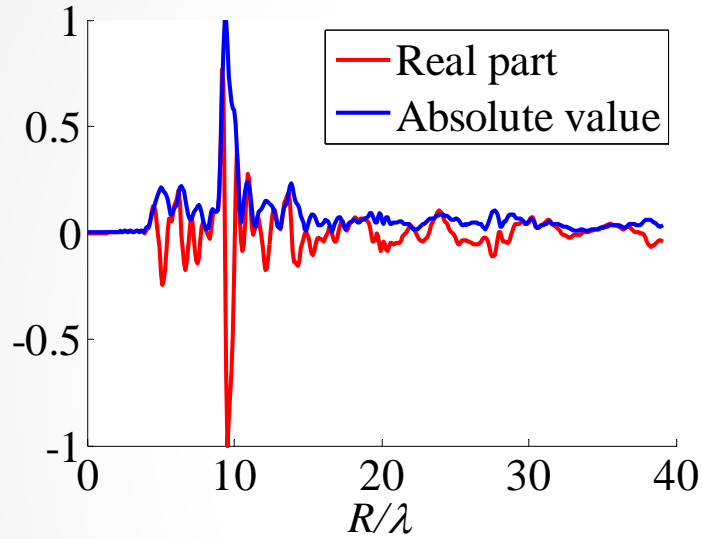


高さ: 250 mm

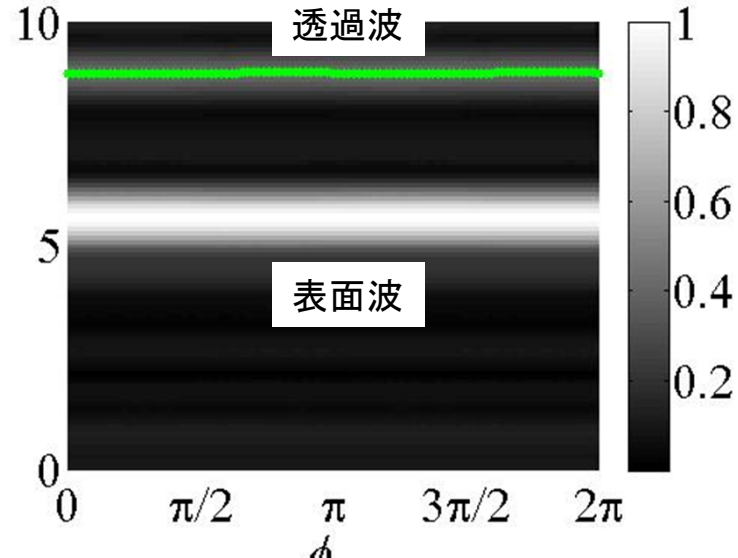
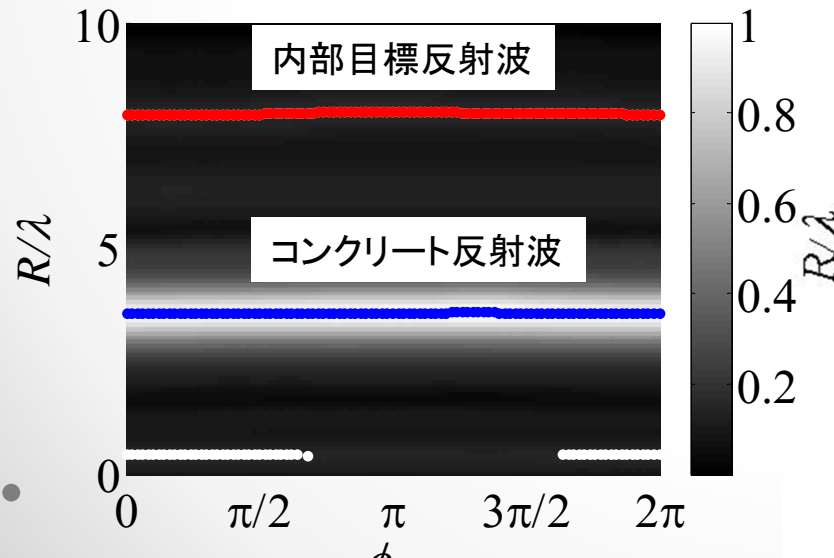
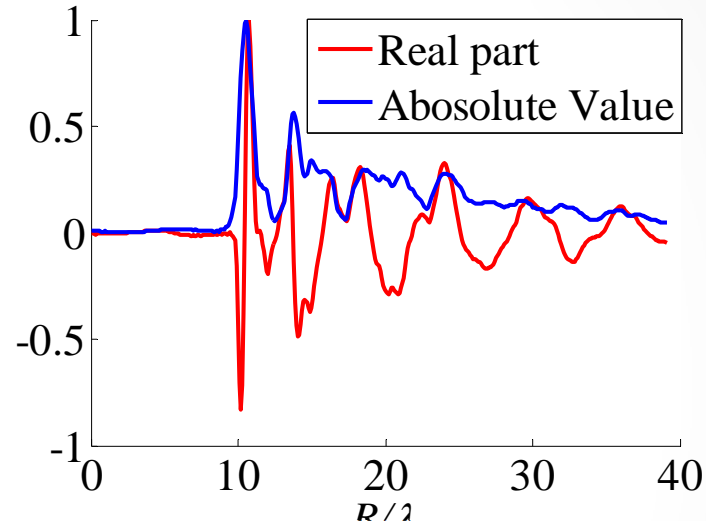


実験データ (反射波, 透過波)

反射波(Tx-Rx1)



透過波(Tx-Rx2)

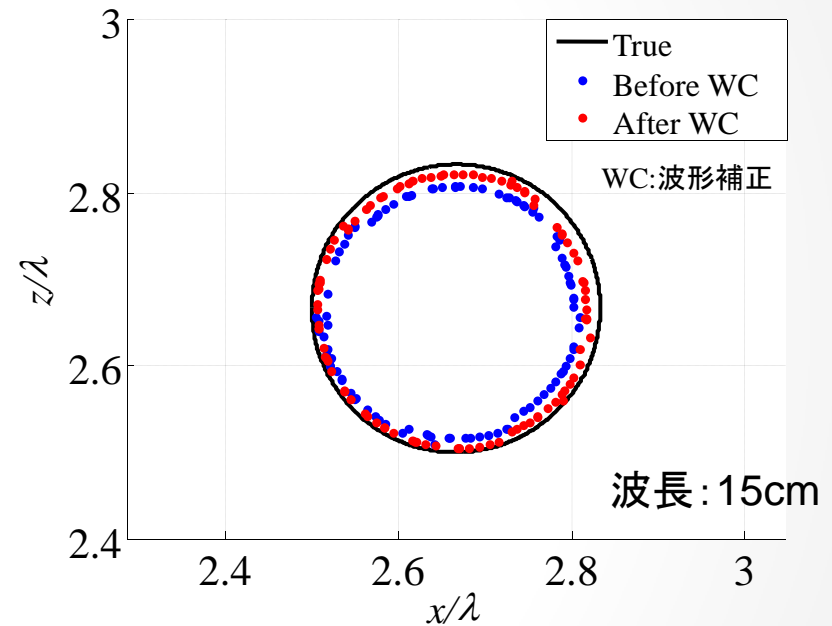


誘電率及び 内部目標推定結果

直方体誘電体の透過伝搬遅延量
⇒推定比誘電率:9.07(真値とする)



拡張RPM法による内部推定像



	波形補正なし	波形補正あり
比誘電率推定 (相対誤差)	8.56(5.4%)	8.84(2.4%)
内部目標推定誤差RMS (波長:15cmで換算)	$2.30 \times 10^{-2} \lambda$ (3.45 mm)	$1.27 \times 10^{-2} \lambda$ (1.90 mm)

まとめ

UWBLレーダのための画像化法の提案

- ・周波数干渉計に基づく
超波長分解能レーダイメージング法
 - ・RPM法 + Caponフィルタ
 - ⇒ 1/100波長の精度, 1/10波長の分解能を達成
- ・二回散乱距離情報を用いた影領域イメージング法
 - ・画像化再現域を拡大
- ・拡張RPM法による内部画像化と誘電率推定
 - ・実験環境下で高精度誘電率推定と1/100波長精度を達成

今後の展望

- ・偏波解析を用いた画像化
- ・各種応用(非破壊計測等)における実データ解析