

研究背景

超広帯域UWB(Ultra Wideband)パルスレーダ

特徴: 高い距離分解能(数cm~数mm程度)・高い誘電体透過性

→ 埋設水道管の破裂検知等の内部画像化技術に有望

従来の内部イメージング法

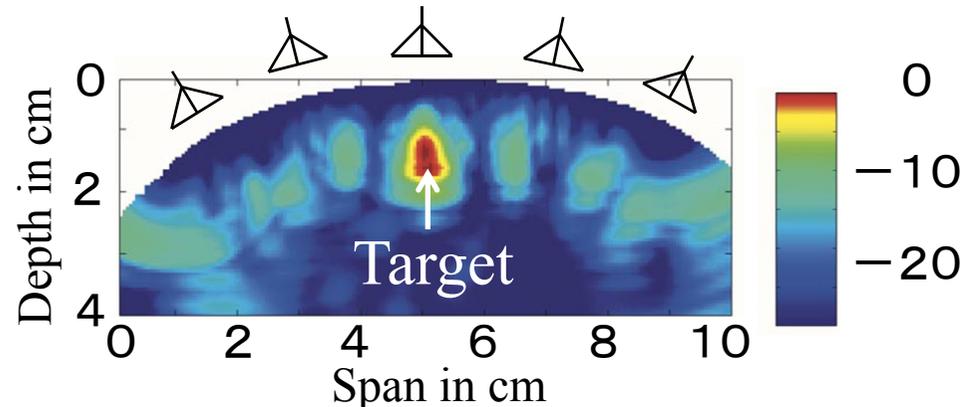
MIST(Microwave Imaging via Space-Time Beamforming)

(Essex J. Bond, et. al., *IEEE Trans. Antennas & Propagat.*, Aug. 2003)

Beamformer+表面反射波除去: 数mmサイズ of 目標物検知が可能

問題点 {
・分解能: 半波長程度
・外部誘電体境界に対して先験情報が必要

MISTによる乳房推定像



従来法の問題点と研究目的

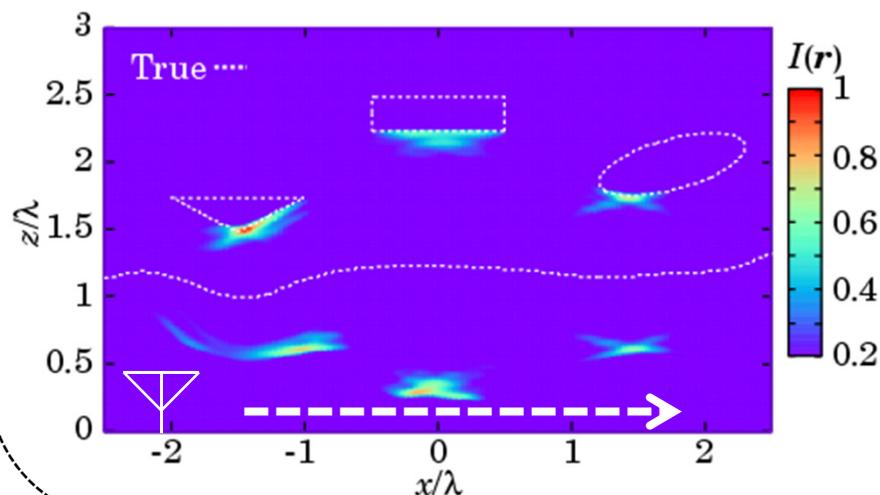
従来の内部イメージング法

SAR(Synthetic Aperture Radar)+RPM(Range Points Migration)

: 伝搬遅延を推定して受信信号を空間積分

特徴: 外部誘電体境界の先験情報が不要

(K. Akune, et. al., IEICE Trans. Commun., Sep. 2011)



問題点

- ・ 誘電体境界の**外部**に**虚像**が生じる
- ・ 推定像が**空間的な広がり**をもつ
- ・ 処理時間:1,000sec
(Xeon 2.40GHz)

研究目的

誘電体内部目標に対する高精度推定法の提案

システムモデル

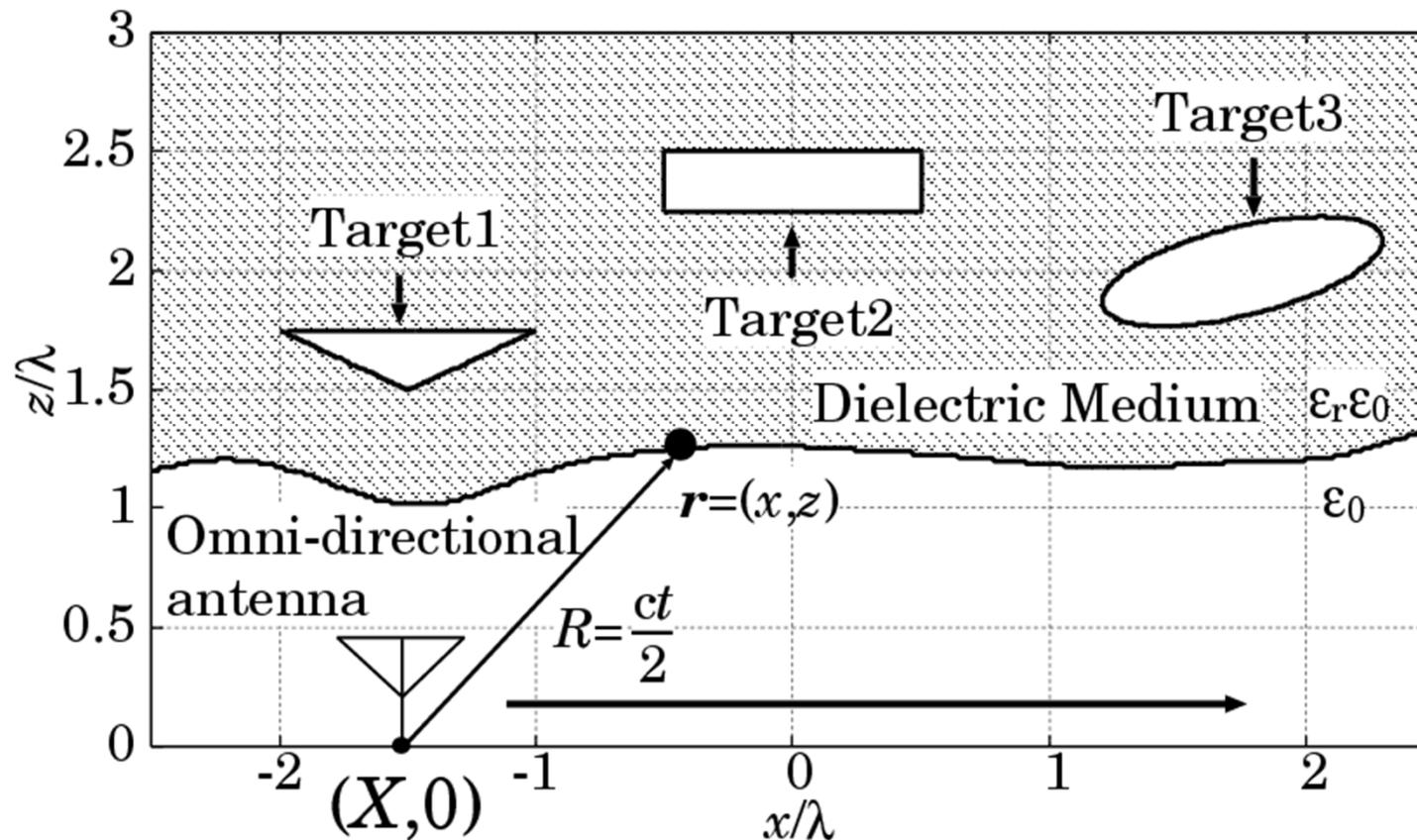
無指向性アンテナを直線走査

送信電流: モノサイクルパルス(波長: λ)

誘電体・内部目標: 任意形状(未知)

誘電体媒質: 均質

比誘電率: 既知



RPM法による誘電体境界推定

第一到来波距離点群 $q_{S,j}=(X_{S,j},R_{S,j})$ ($j=1,2,\dots,N_S$) から誘電体境界を推定

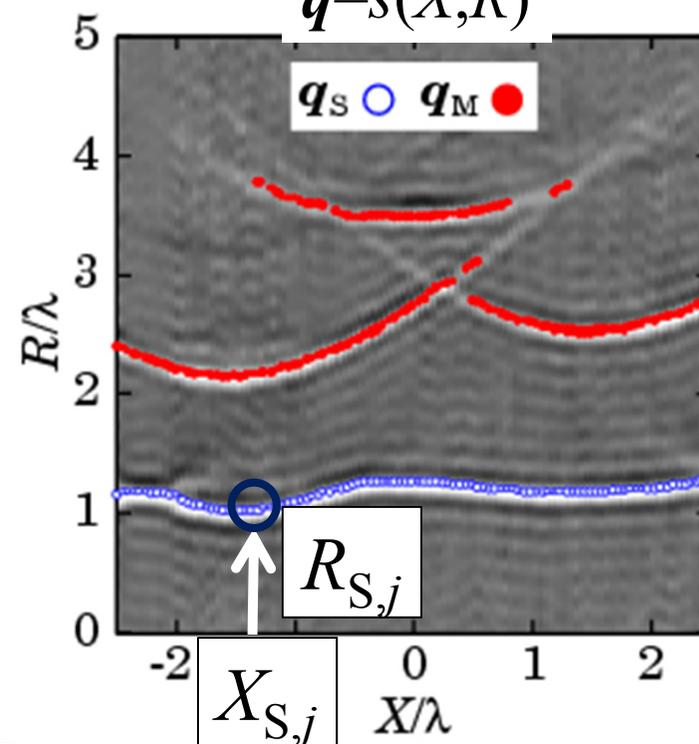
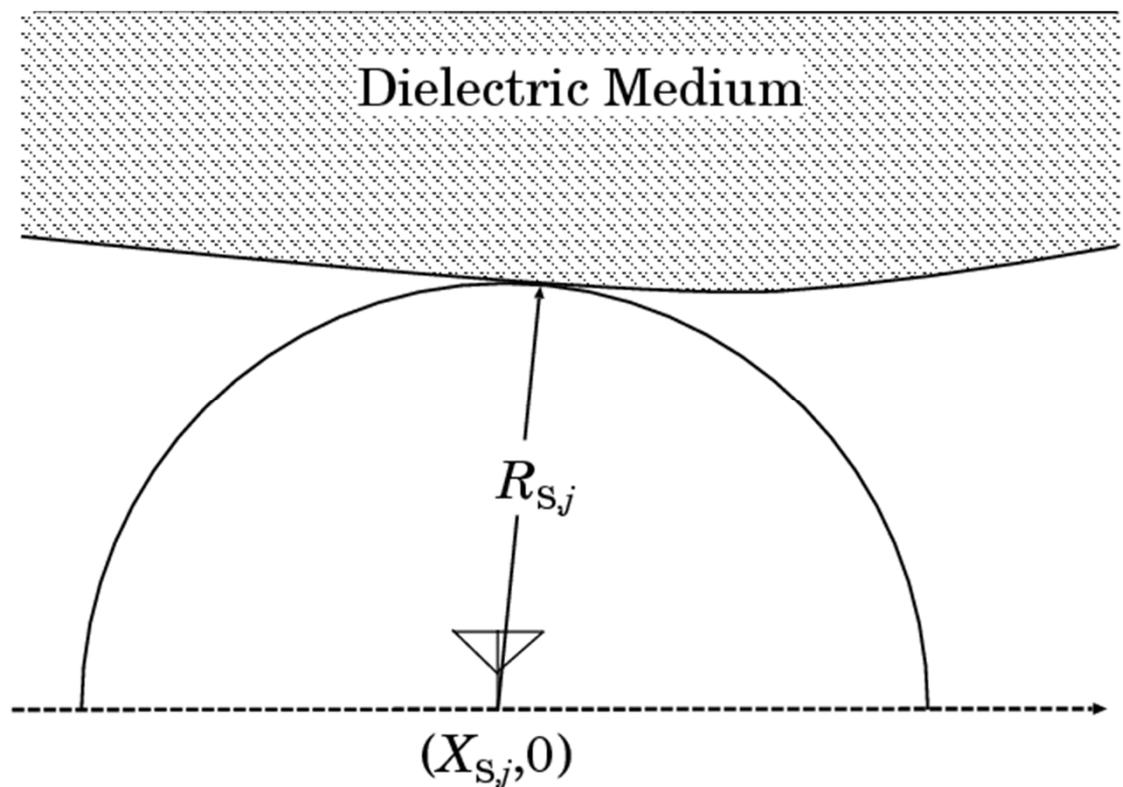
RPM法の原理(目標境界点:誘電体境界点)

① 目標境界点は中心($X_{S,j},0$) 半径 $R_{S,j}$ とする円上に存在する

受信信号出力

(Wienerフィルタ適用後)

$q=s(X,R)$

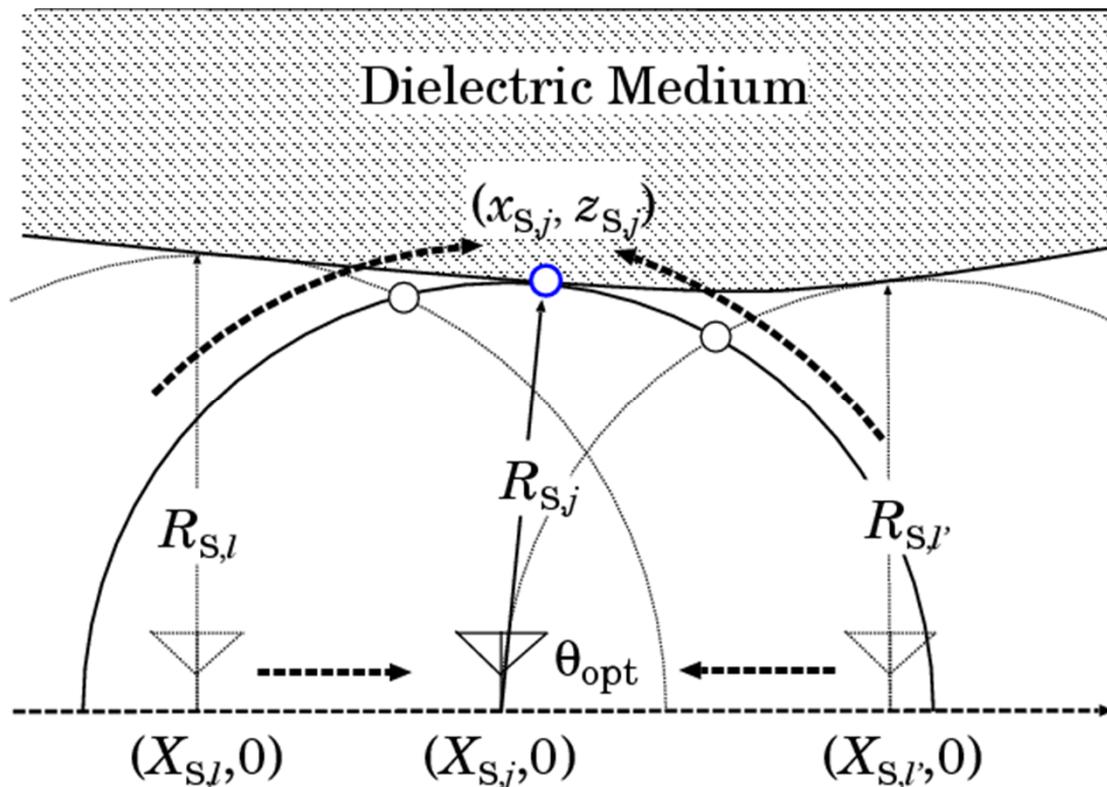


RPM法による誘電体境界推定

第一到来波距離点群 $q_{S,j}=(X_{S,j},R_{S,j})$ ($j=1,2,\dots,N_S$) から誘電体境界を推定

RPM法の原理(目標境界点:誘電体境界点)

- ① 目標境界点は中心 $(X_{S,j},0)$ 半径 $R_{S,j}$ とする円上に存在する
- ② 各素子での円との交点が密集する付近に散乱中心が存在



特徴

- ・ 目標境界を点群で再現
(高精度・高速性)
- ・ 誘電体境界上の法線
ベクトルを直接的に推定
(微分演算不要)

従来法 (拡張SAR)

RPM法の推定点群を利用して, **SARの原理に基づき内部イメージング**

(K. Akune, et. al., IEICE Trans. Commun., Sep. 2011)

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

Γ 素子走査範囲

$\mathbf{r}_{S,j} (j = 1, 2, \dots, N_s')$

RPM法 + Envelope補間で
得られる誘電体境界点

d_2 伝搬遅延を考慮した伝搬距離

問題点

分解能が送信帯域幅で制限される

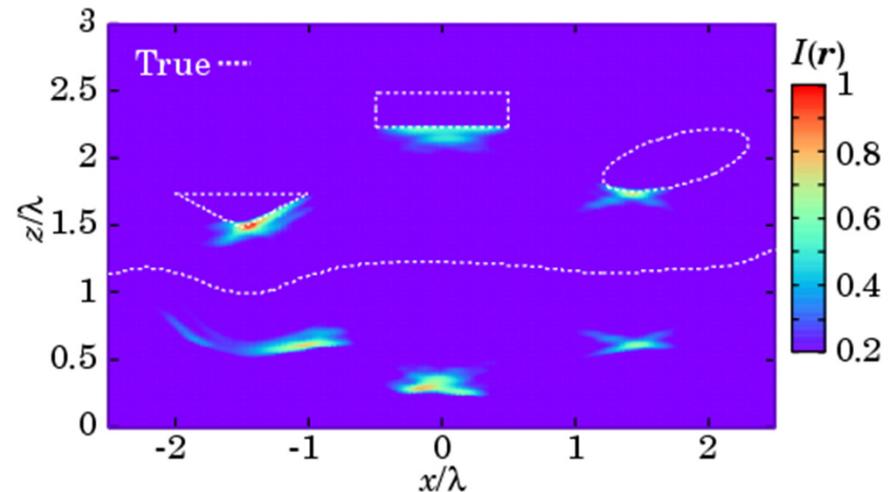
➡ 目標エッジ等の検出が困難

誘電体境界外部に虚像が生じる

➡ 虚像抑圧処理を
適用する必要性

提案法

RPM法の原理を拡張した高精度内部目標画像化手法の提案

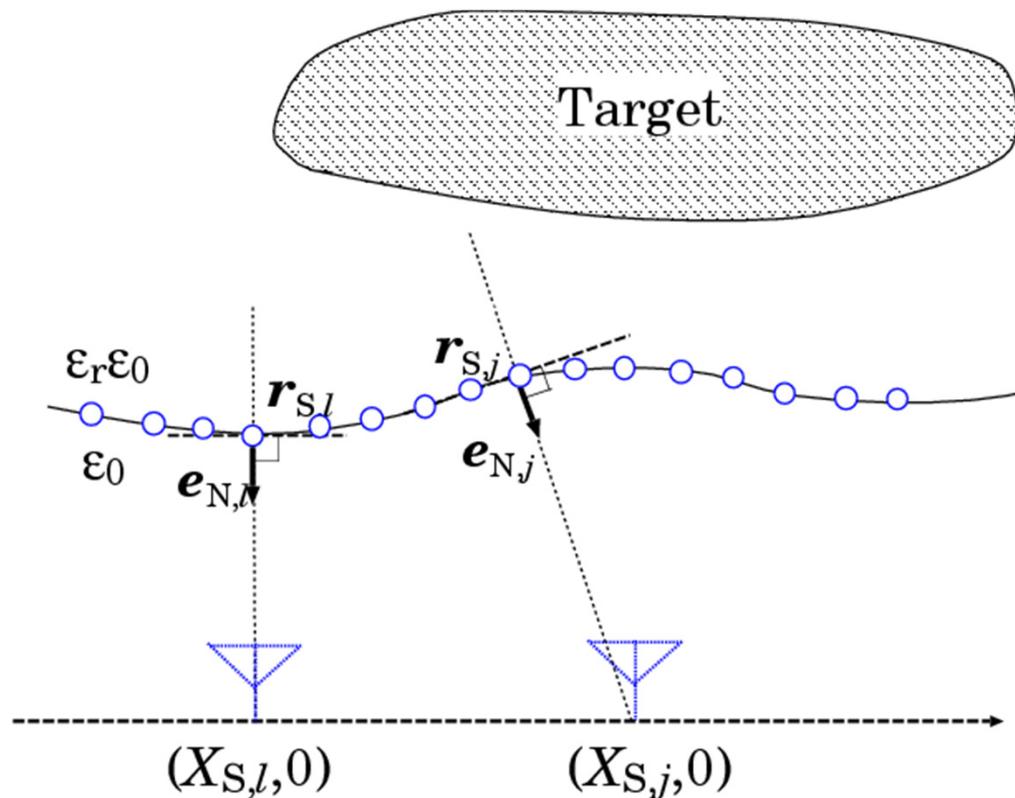


提案法(目標候補点の抽出)

内部目標に対する候補点

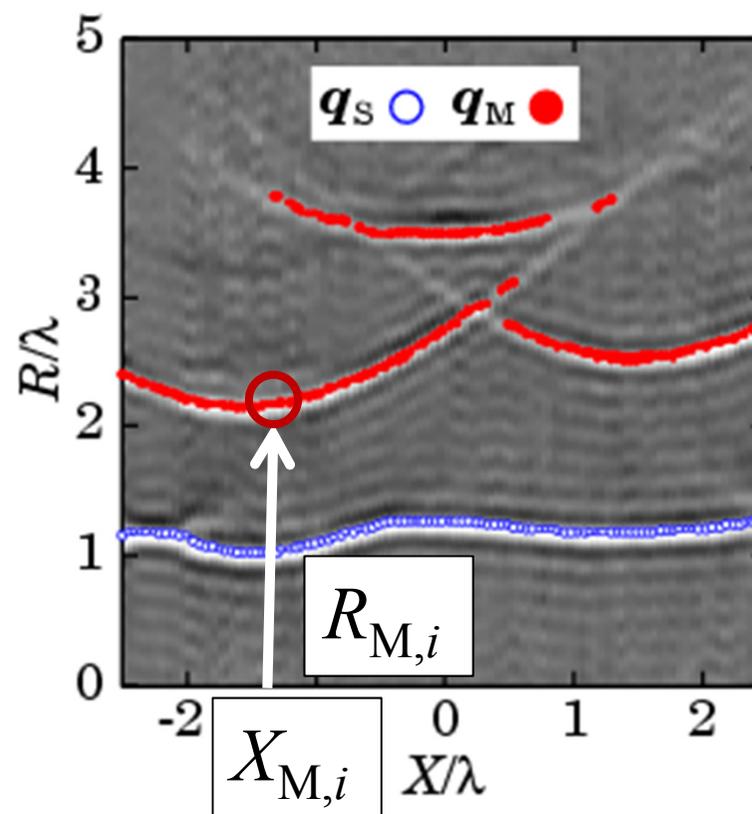
$$r_{M,j}(q_{M,i}) = r_{S,j} + \frac{(R_{M,i} - R_{1,j}(q_{M,i}))}{\sqrt{\epsilon_r}} e_{T,j}$$

$q_{M,i}$ ($i=1,2,\dots,N_M$): $q_{S,j}$ を除く距離点群



RPM法

誘電体境界点
及び法線ベクトルを推定



提案法(目標候補点の抽出)

内部目標に対する候補点

$$r_{M,j}(q_{M,i}) = r_{S,j} + \frac{(R_{M,i} - R_{1,j}(q_{M,i}))}{\sqrt{\epsilon_r}} e_{T,j}$$

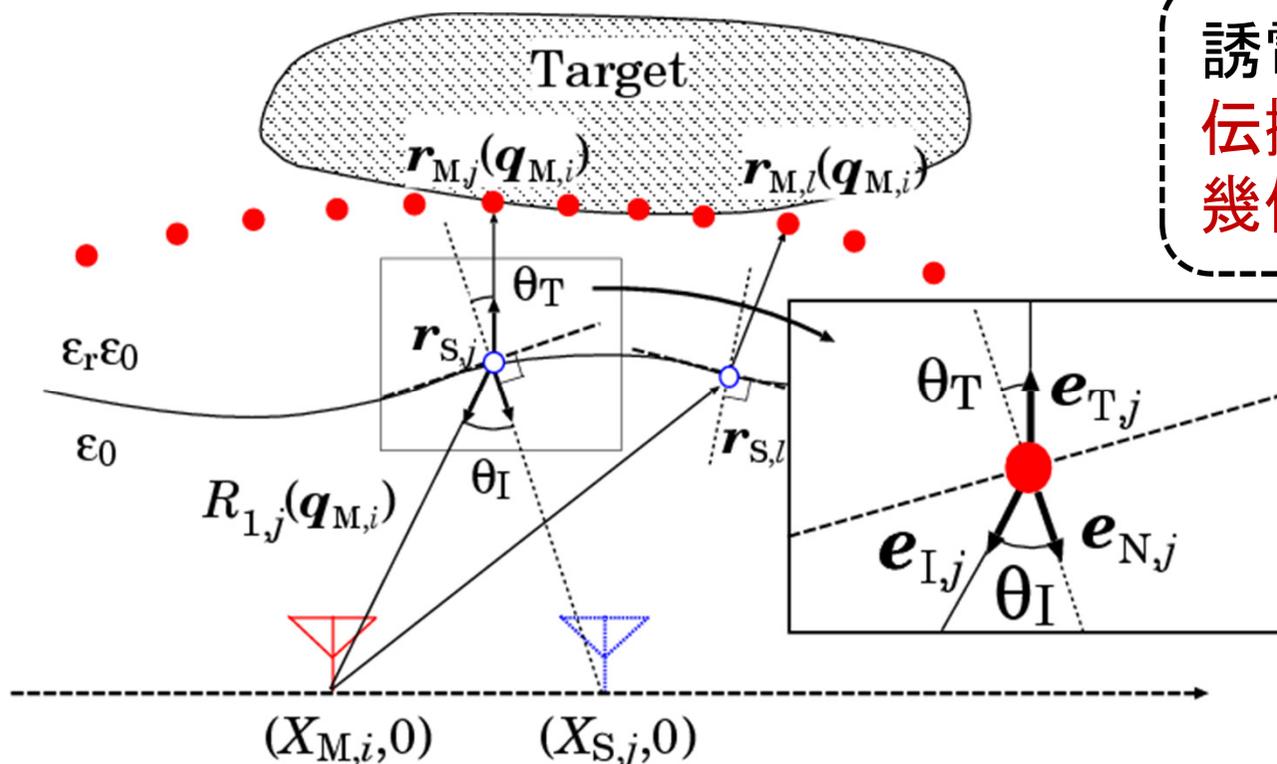
$q_{M,i}$ ($i=1,2,\dots,N_M$): $q_{S,j}$ を除く距離点群

RPM法

誘電体境界点
及び法線ベクトルを推定



誘電体境界面での
伝搬経路歪みを
幾何光学近似で推定

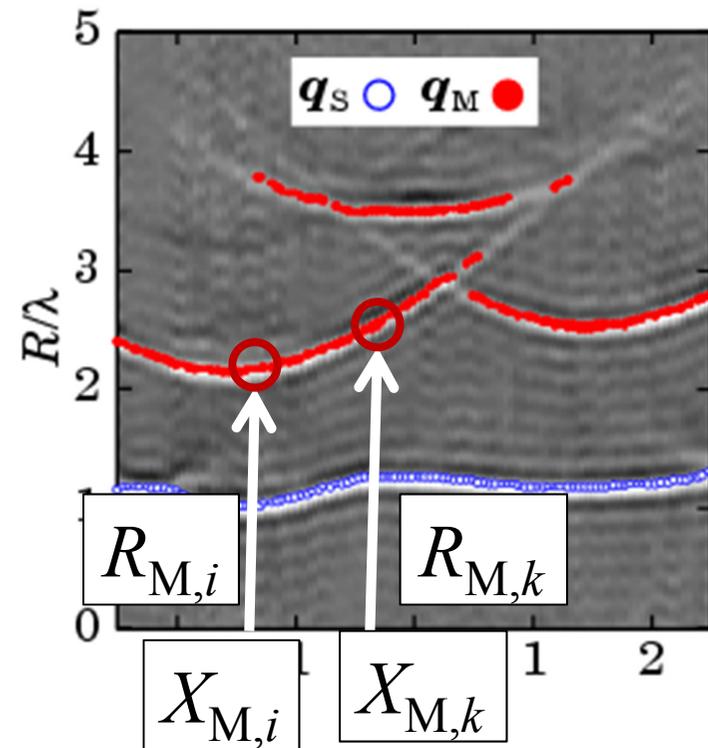
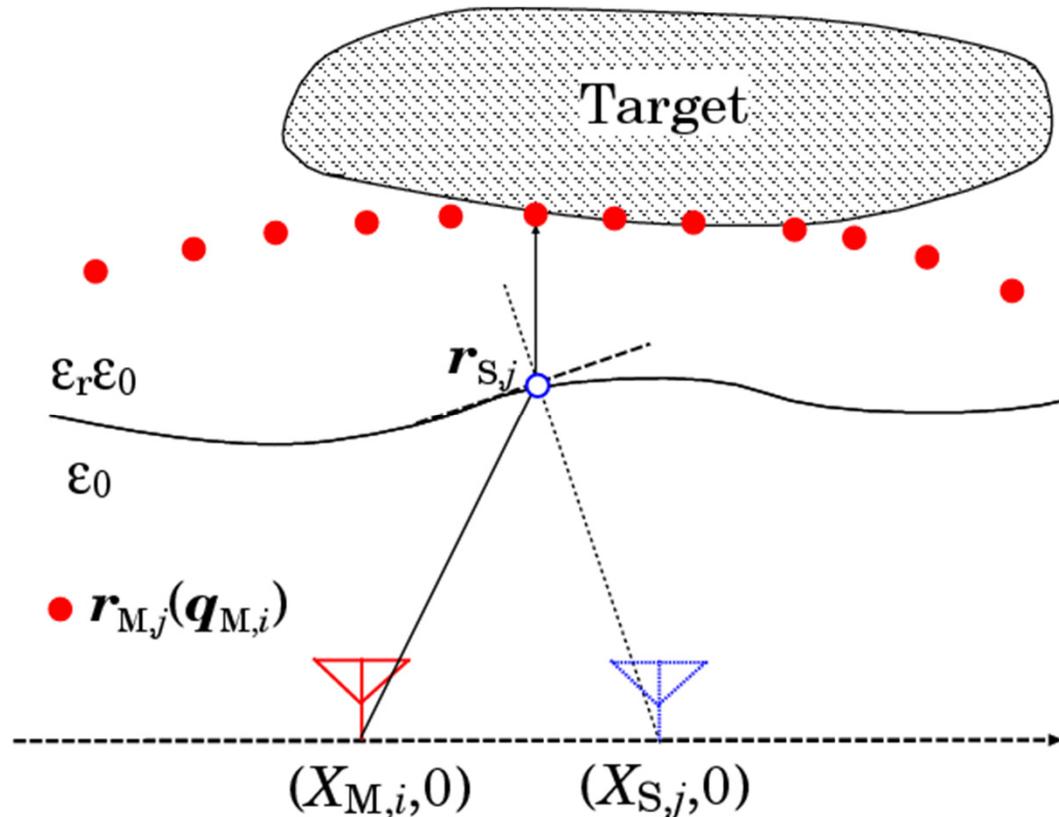


提案法(目標候補点の抽出)

内部目標に対する候補点

$$r_{M,j}(q_{M,i}) = r_{S,j} + \frac{(R_{M,i} - R_{1,j}(q_{M,i}))}{\sqrt{\epsilon_r}} e_{T,j}$$

$q_{M,i}$ ($i=1,2,\dots,N_M$): $q_{S,j}$ を除く距離点群



提案法(真の散乱点の抽出)

RPM法原理の拡張: 候補点の密集する付近に散乱中心が存在

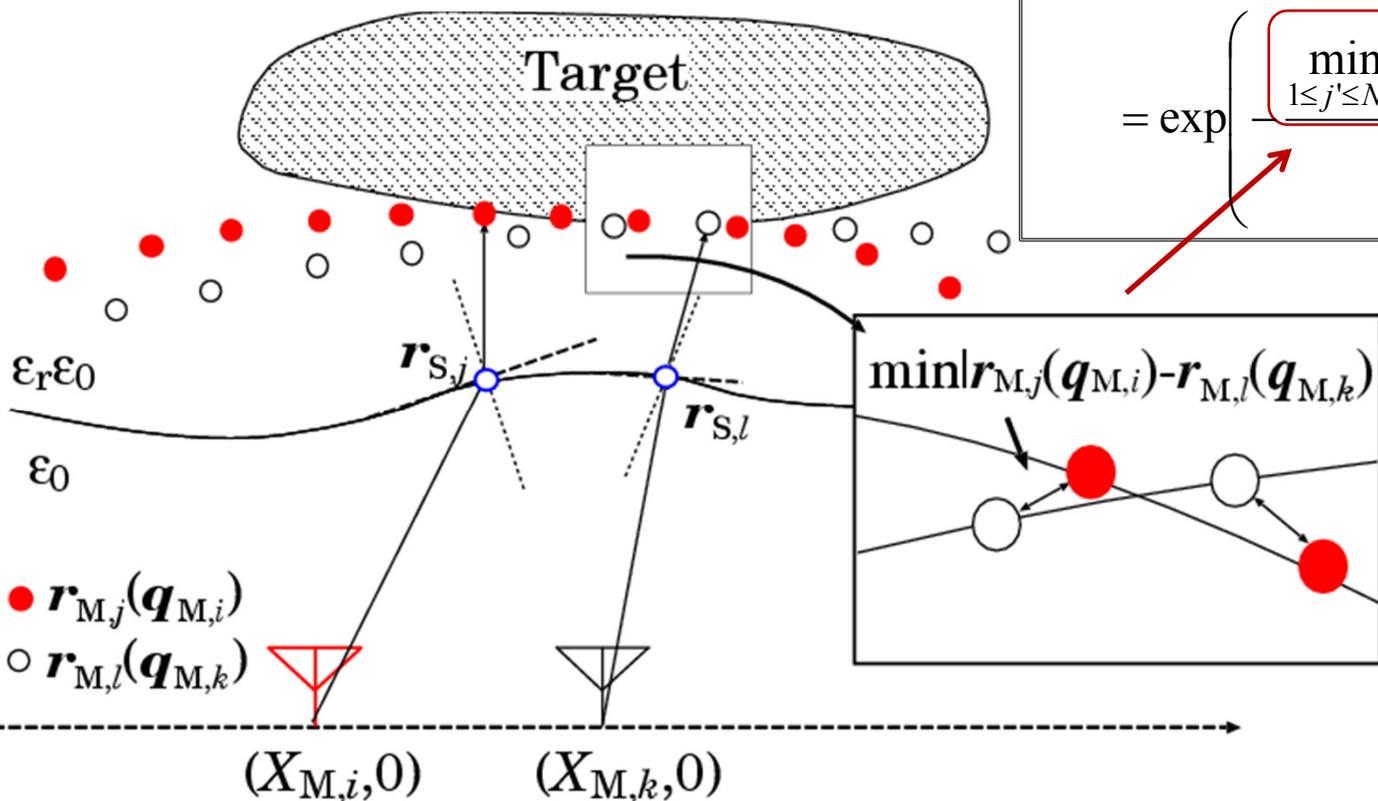
真の散乱点を求める評価関数

$$\hat{r}_M(q_{M,i}) = \arg \max_{r_{M,j}(q_{M,i})} \sum_{k=1}^{N_M} s(q_{M,k}) f(r_{M,j}(q_{M,i}), q_{M,k}) \exp \left(-\frac{|X_{M,i} - X_{M,k}|^2}{2\sigma_X^2} - \frac{|R_{M,i} - R_{M,k}|^2}{2\sigma_R^2} \right)$$

評価関数 f

$$f(r_{M,j}(q_{M,i}), q_{M,k})$$

$$= \exp \left(-\frac{\min_{1 \leq j' \leq N_s} |r_{M,j}(q_{M,i}) - r_{M,j'}(q_{M,k})|^2}{2\sigma_r^2} \right)$$



数値計算による推定結果(S/N=20dB)

誘電体: $\begin{cases} \text{比誘電率} & 5(\text{均質}) \\ \text{導電率} & 0.01\text{S/m} \end{cases}$

目標物: 導電率 $1 \times 10^6 \text{S/m}$

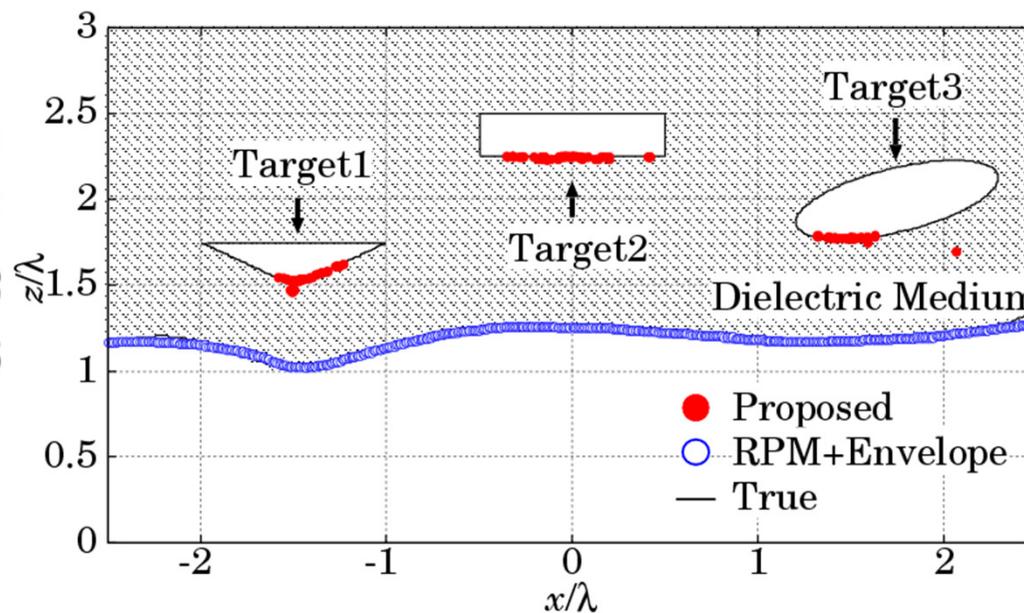
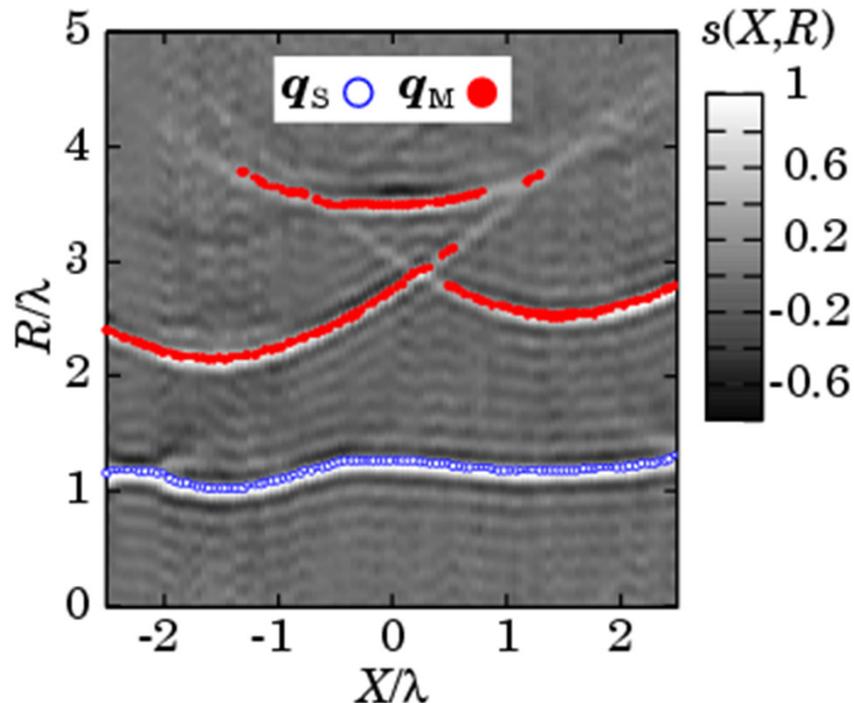
素子走査範囲: $-2.5\lambda \leq X \leq 2.5\lambda$

補間点総数: $N_S = 501$

$\sigma_X = 0.75\lambda$ $\sigma_R = 0.5\lambda$ $\sigma_r = 0.1\lambda$

信号電力: 整合フィルタ通過時の最大瞬時電力

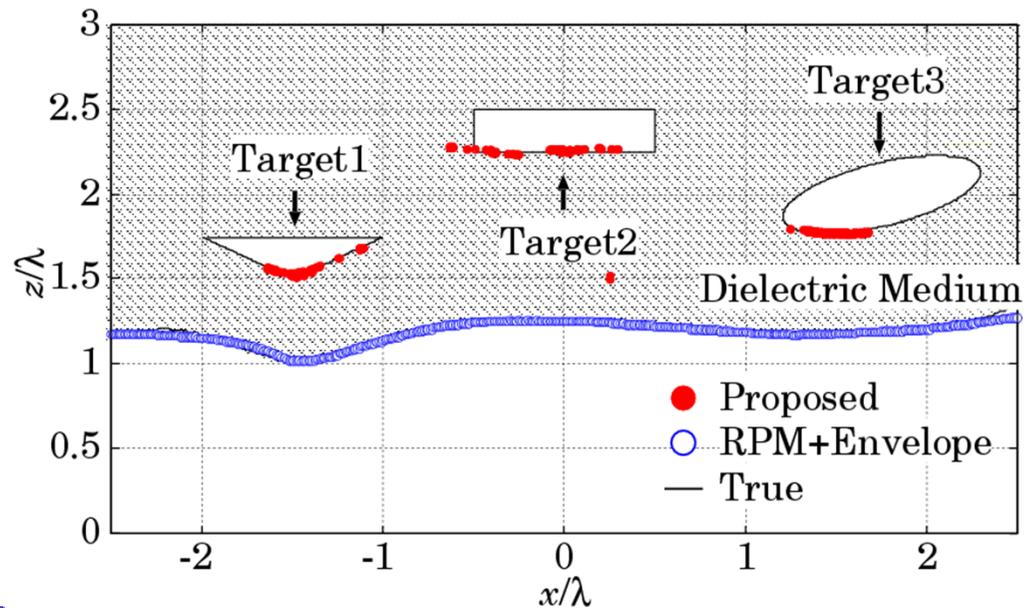
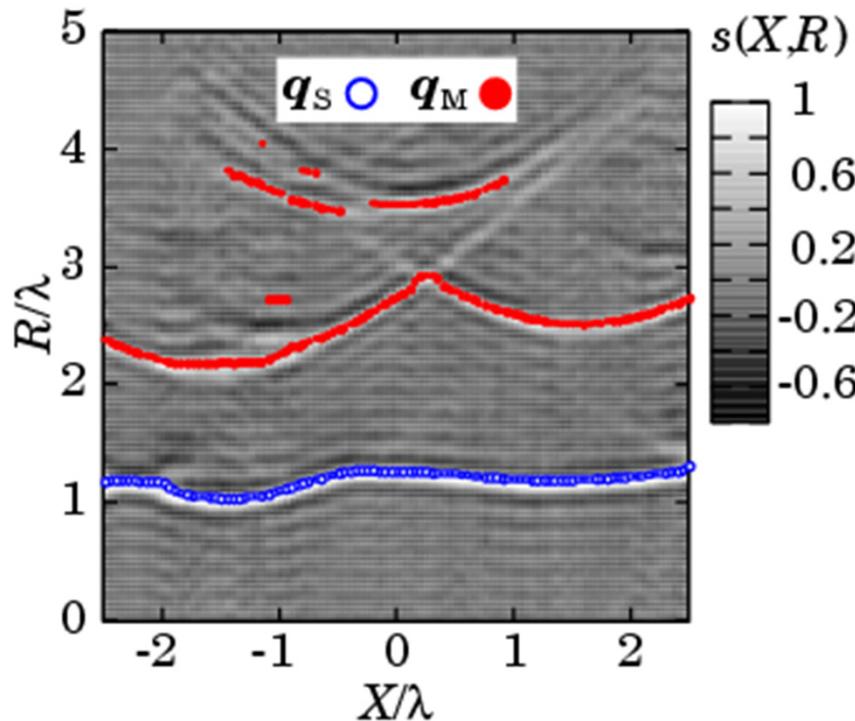
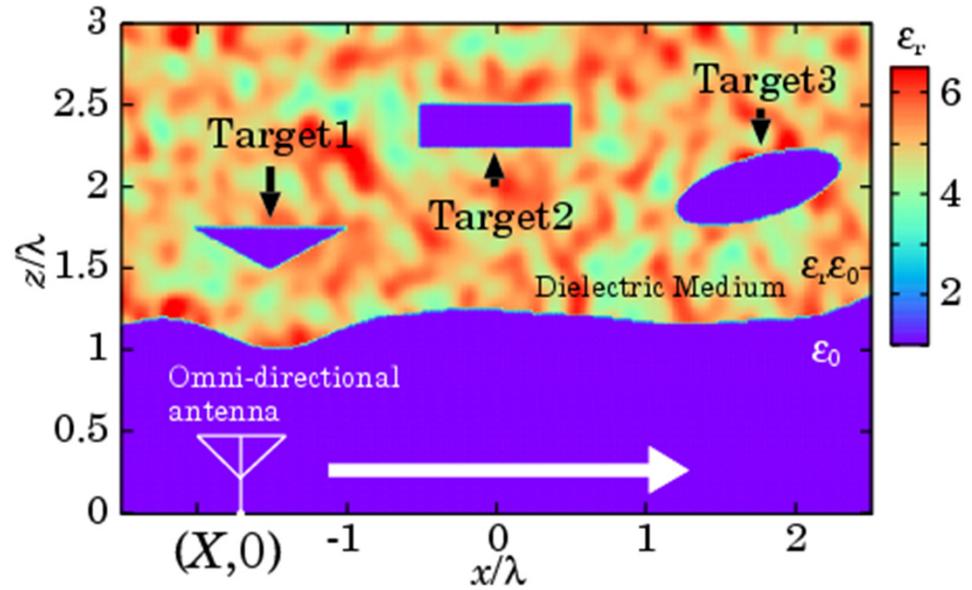
雑音電力: 整合フィルタ通過時の雑音平均電力



不均一媒質中における推定結果(S/N=20dB)

誘電体: { 比誘電率 平均 5.02
標準偏差 0.554
導電率 0.01S/m

目標物: 導電率 1×10^6 S/m



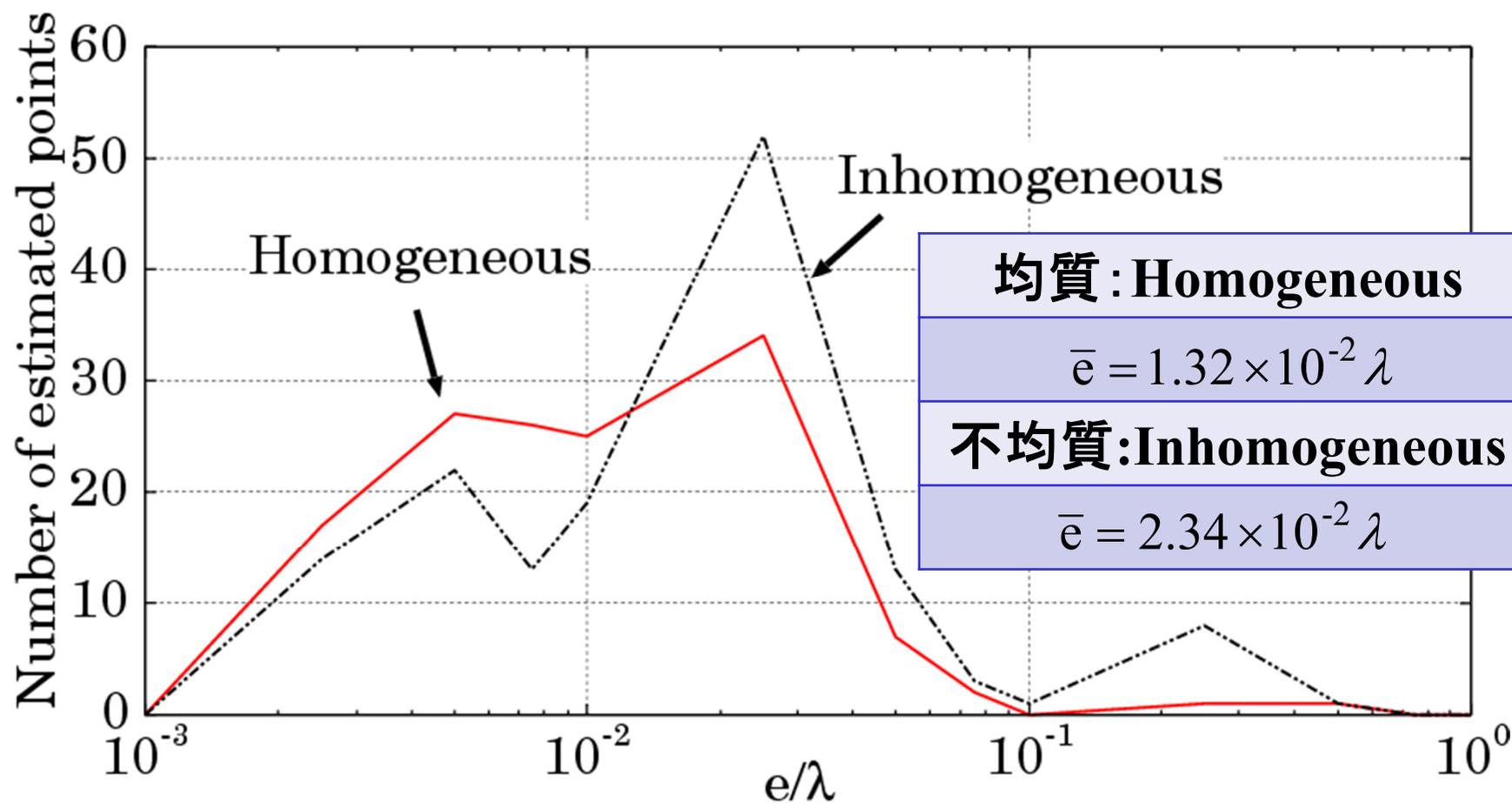
推定精度評価

各目標点と目標境界との推定誤差

$$e(\mathbf{q}_{M,i}) = \min_{\mathbf{r}_{\text{true}}} \|\hat{\mathbf{r}}_M(\mathbf{q}_{M,i}) - \mathbf{r}_{\text{true}}\|$$

$\hat{\mathbf{r}}_M(\mathbf{q}_{M,i})$: 提案法による推定点

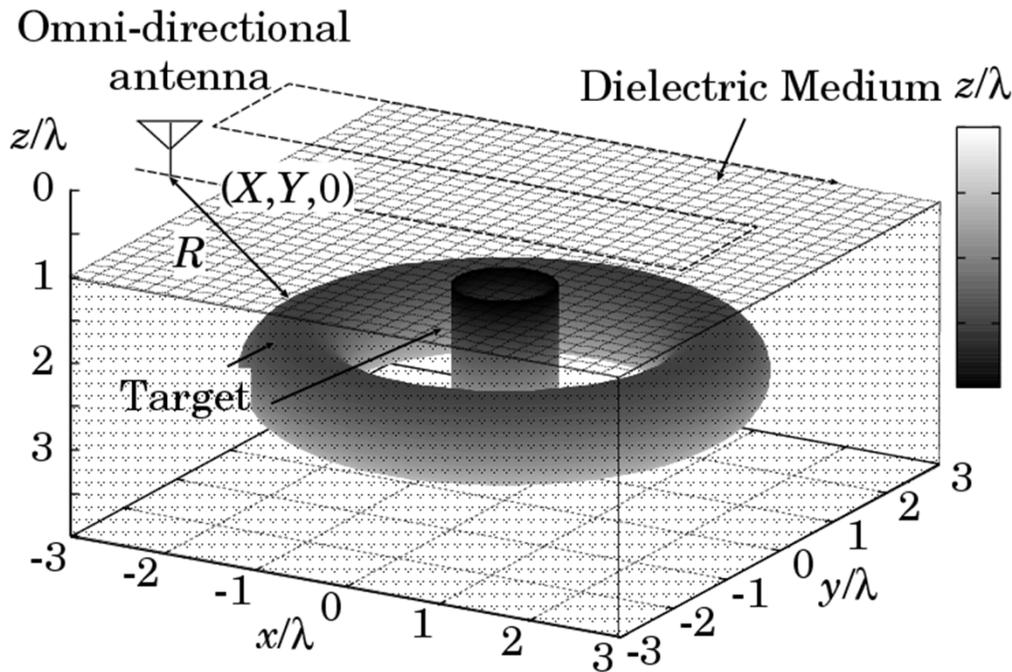
\mathbf{r}_{true} : 真の目標点



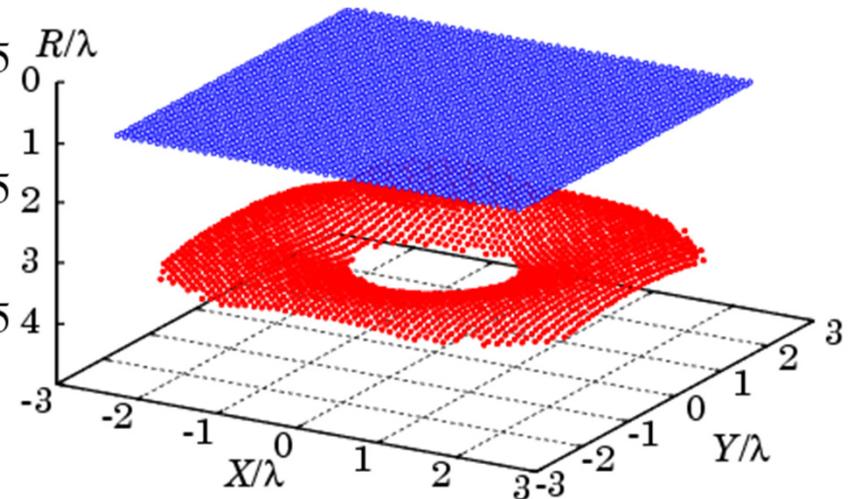
3次元システムモデル

無指向性アンテナを直線走査($z=0$ 平面上)
送信電流: モノサイクルパルス(波長: λ)
誘電体・内部目標: 任意形状(未知)

比誘電率
既知かつ一定



距離点群: $q_p (p=1, \dots, N_p)$



- 第一到来波距離点群
- 第二到来波距離点群

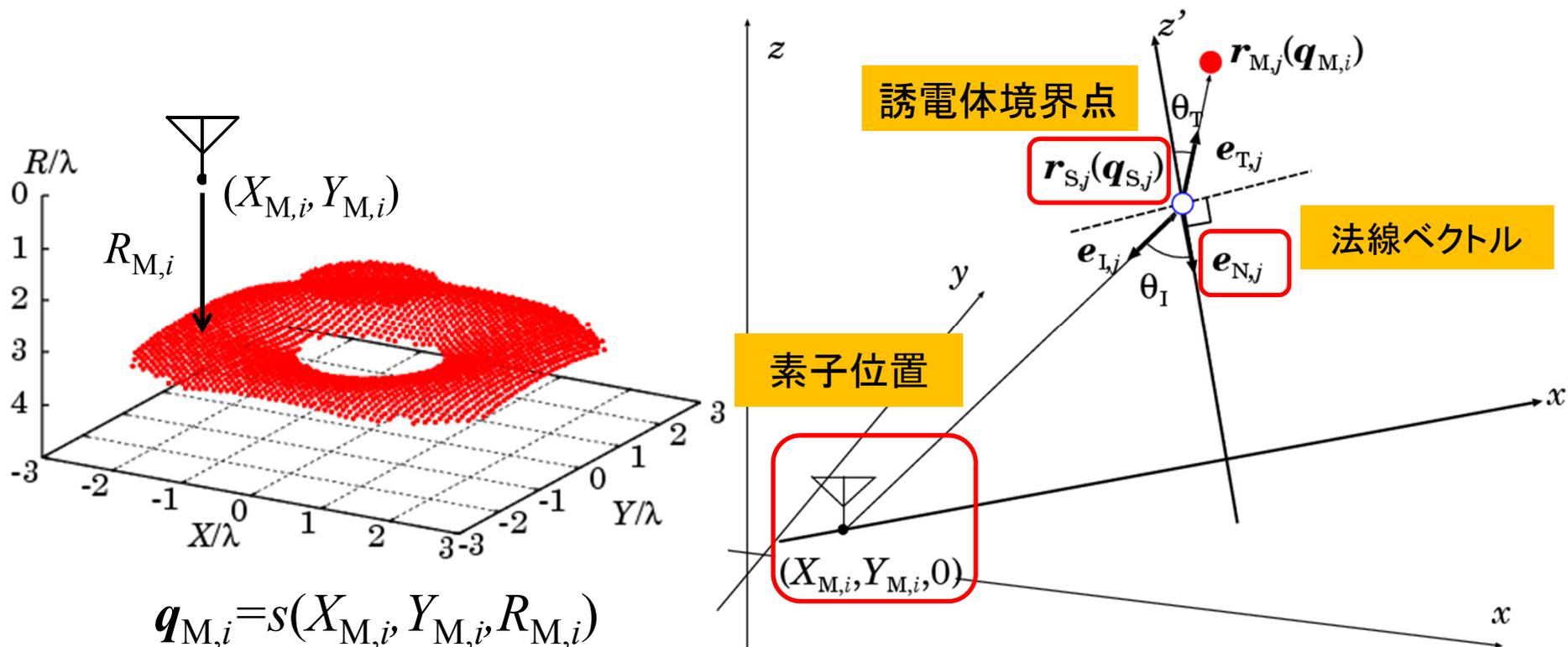
提案法(目標候補点の抽出)

目標境界点に対する候補点

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

目標境界点

素子位置, 誘電体境界点及び法線ベクトルで決定される平面上にあると仮定



提案法(真の散乱点の抽出)

評価関数 f (2次元問題)

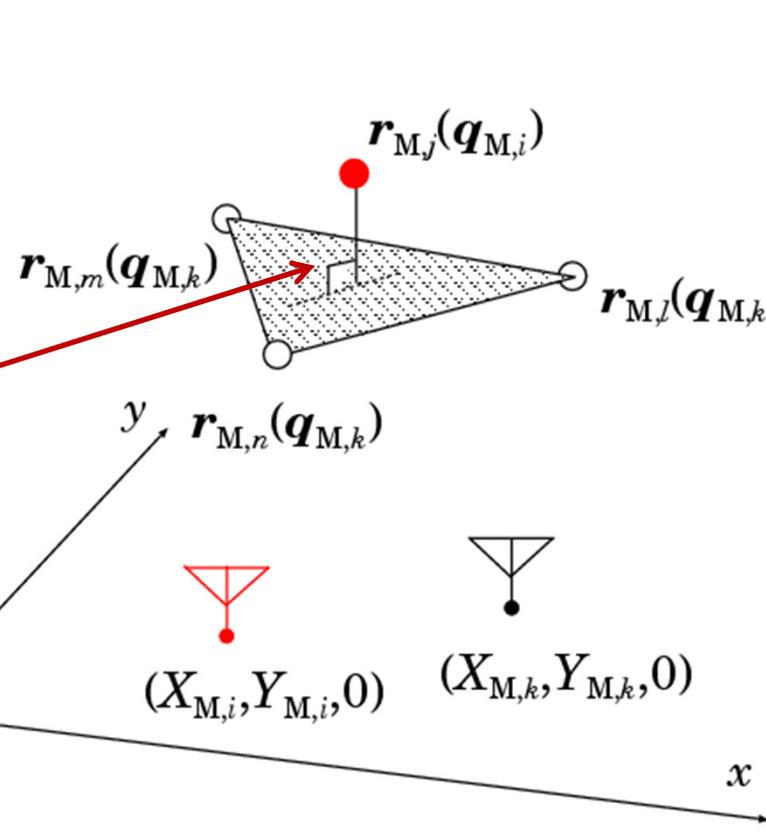
$$f = \exp \left\{ - \frac{\min_{1 \leq l \leq N_s} |r_{M,i}(q_{M,i}) - r_{M,l}(q_{M,k})|^2}{2\sigma_r^2} \right\}$$



評価関数 f (3次元問題)

$$f = \exp \left\{ - \frac{d_{\min}^2}{2\sigma_r^2} \right\}$$

推定精度を保持
処理演算量の増大を抑える



d_{\min} :

$r_{M,j}(q_{M,i})$ と同点にもっとも近接する候補点 $r_{M,l}(q_{M,k})$ の3点で生成される平面との最短距離

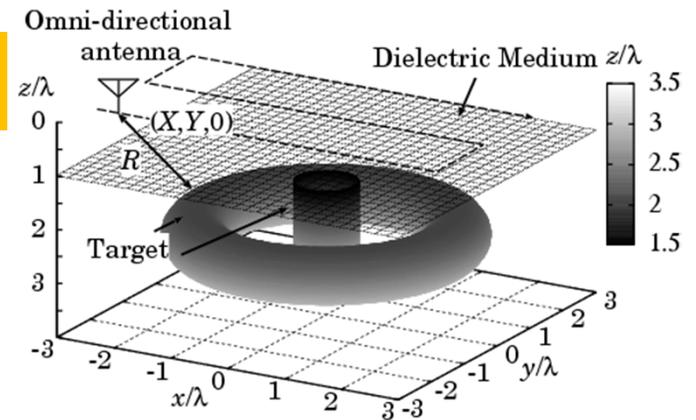
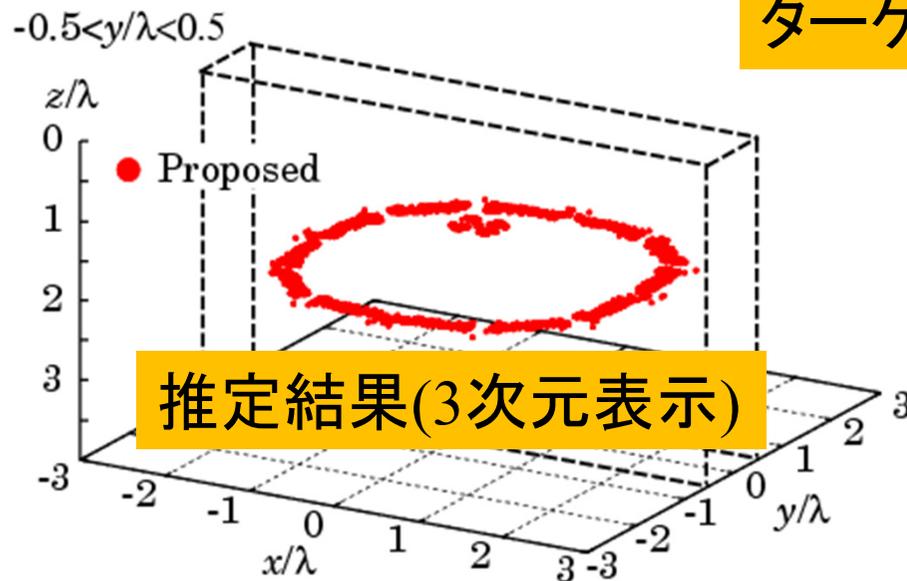
数値計算による推定結果 (S/N=30dB)

誘電体: $\begin{cases} \text{比誘電率 } 5 \\ \text{導電率 } 0.01\text{S/m} \end{cases}$

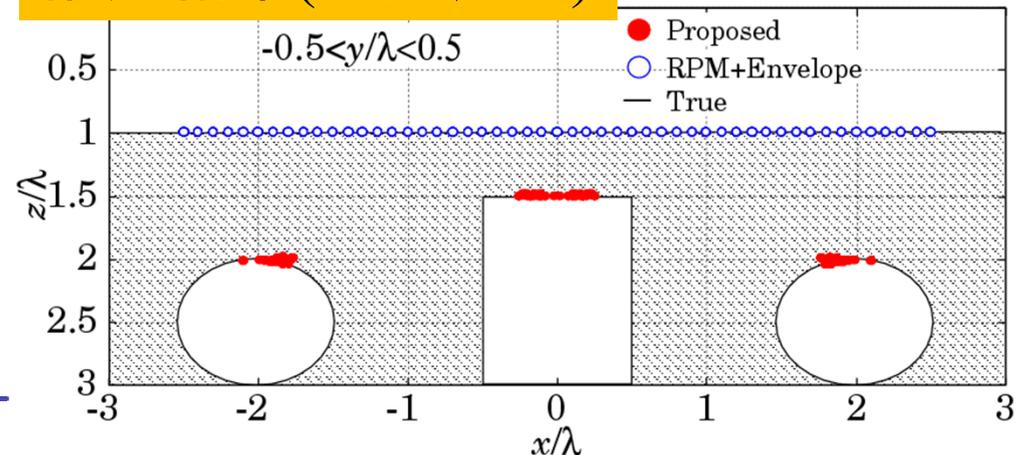
目標物: 導電率 $1 \times 10^6\text{S/m}$

素子走査範囲: $\begin{cases} -2.5\lambda \leq X \leq 2.5\lambda \\ -2.5\lambda \leq Y \leq 2.5\lambda \end{cases}$

補間点総数: $N_S' = 2601$



推定結果(断面表示)



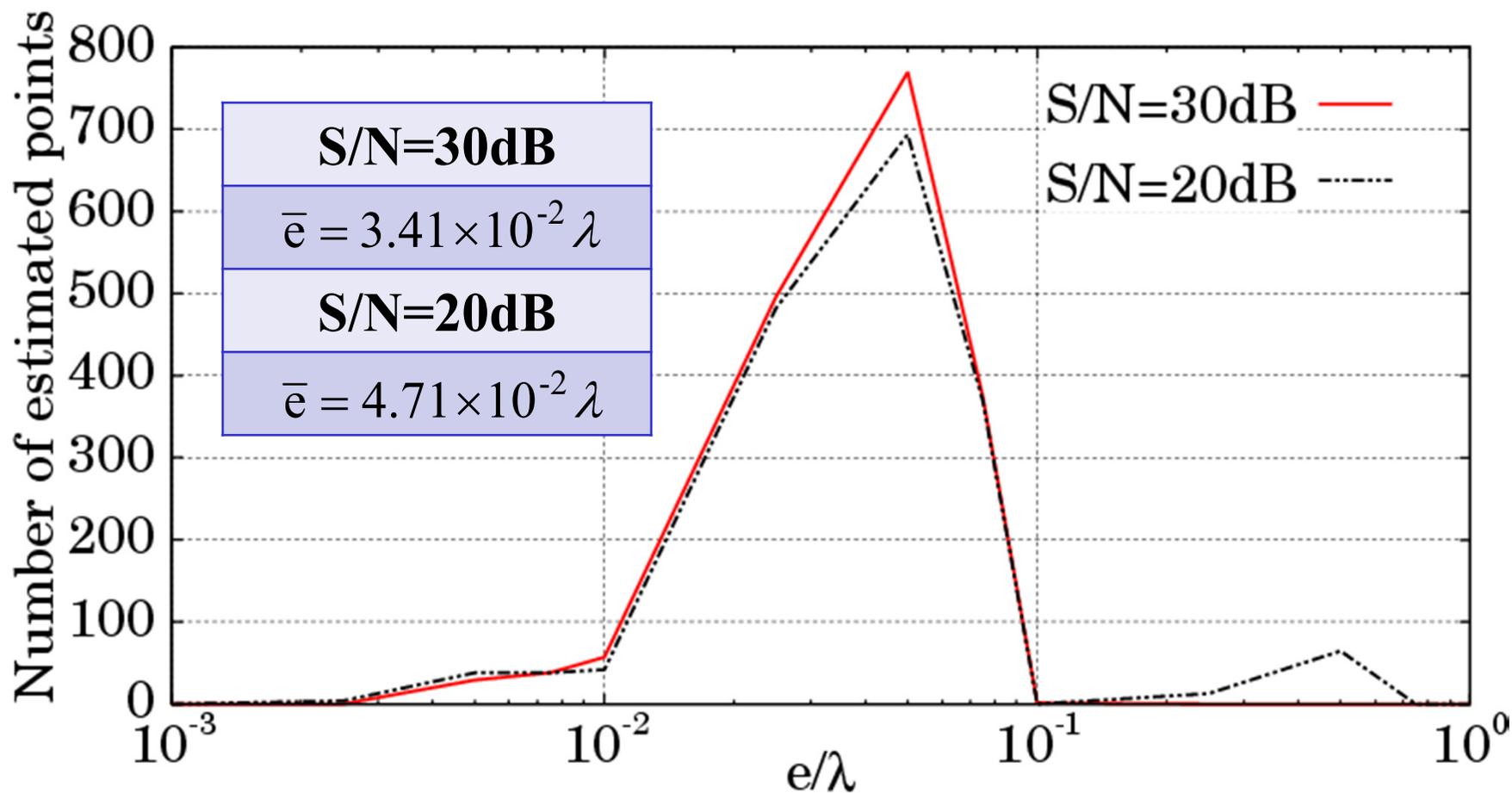
推定精度評価

各目標点と目標境界との推定誤差

$$e(\mathbf{q}_{M,i}) = \min_{\mathbf{r}_{\text{true}}} \|\hat{\mathbf{r}}_M(\mathbf{q}_{M,i}) - \mathbf{r}_{\text{true}}\|$$

$\hat{\mathbf{r}}_M(\mathbf{q}_{M,i})$: 提案法による推定点

\mathbf{r}_{true} : 真の目標点



結論

誘電体内部目標に対する高精度画像化手法の提案

特徴

- ・RPM法の誘電体境界点群と同法線ベクトルにより幾何光学近似に基づく伝搬経路を推定
- ・RPM法の原理を拡張し、候補点の集積度を評価して、内部目標境界を推定

数値計算による特性評価

	2次元問題	3次元問題
・推定平均精度	約 $1/50\lambda$	約 $1/20\lambda$
・ $\bar{e} \leq 0.1\lambda$ を保持するS/N	10dB以上	20dB以上
・処理時間 (Xeon 2.40GHz)	60秒	14 時間