誘電体内部 UWB レーダイメージングのための 高速誘電率推定法

Fast Permittivity Estimation Algorithm for UWB Internal Imaging Radar

相馬 竜之介 Ryunosuke Souma 木寺 正平 Shouhei Kidera **桐本 哲郎** Tetsuo Kirimoto

電気通信大学 大学院情報理工学研究科

Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

1 はじめに

UWB(Ultra Wideband) パルスレーダは,非破壊検査 や乳癌検知等の誘電体内部イメージングに有用である.高 速内部イメージング法として,RPM(Range Points Migration)法[1]を応用した手法が提案されている[2].し かし,同手法は誘電体内の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[3]が提案されているが,多大な計算量を必要 とする.本稿では,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 を提案し,数値計算によりその有効性を評価する.

2 システムモデル

図1にシステムモデルを示す.目標及び誘電体は明瞭な 境界を有するとする.空間座標r = (x, z)を送信パルスの 中心波長で正規化する.送受信素子位置を $r_{\text{TR}} = (X, Z)$ で示す.受信素子を送受信素子に対して走査円中心に対 称の位置 r_{R} に配置する.各受信信号にWienerフィル タを適用し,同出力を $S_{tr}(X, Z, R), S_r(X, Z, R)$ とする. 但し, $R = ct/2\lambda$ であり,tは時間,cは真空中の光速度 である.

3 提案比誘電率推定法

本手法では,誘電体内部の比誘電率を推定するため に,まず $S_{tr}(X, Z, R)$ の第一到来波に対応する距離点 群を抽出し,RPM 法を適用する.同誘電体境界点群 を $r_j = (x_j, z_j), (j = 1, ..., N_{\text{RPM}})$ とし,その集合 を T_{rpm} とする.各推定点上の法線ベクトルは $e_{n,j} = (X_j - x_j, Z_j - z_j)/R_j$ で表される.比誘電率を ϵ_t とし た場合の誘電体境界における入射位置 $\hat{r}_{\text{I}}(\epsilon_t)$ ・透過位置 $\hat{r}_{\text{P}}(\epsilon_t)$ を次式により推定する.

$$\begin{array}{l} (\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{I}}(\epsilon_{t}), \hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{P}}(\epsilon_{t})) = \arg\min\left\{ |\boldsymbol{e}_{j}(\epsilon_{t}) - \boldsymbol{e}_{j,k}|^{2} + |\boldsymbol{e}_{k}(\epsilon_{t}) - \boldsymbol{e}_{j,k}|^{2} \right\} (1) \\ (\boldsymbol{r}_{j}, \boldsymbol{r}_{k}) \in \tau_{\mathrm{rpm}}^{2} \end{array}$$

但し, $e_j(\epsilon_t) = R_o(\theta_j)(-e_{n,j})$, $e_k(\epsilon_t) = -R_o(\theta_k)(-e_{n,k})$ である. $R_o(*)$ は回転行列であ リ, θ_j, θ_k はスネルの法則から求める.また, $e_{j,k} = (r_j - r_k) / |r_j - r_k|$ である. 伝搬距離を $R(\epsilon_t; q_{t,i}) = (|\hat{r}_1(\epsilon_t) - r_{TR}| + \sqrt{\epsilon_t} |\hat{r}_1(\epsilon_t) - \hat{r}_P(\epsilon_t)| + |\hat{r}_P(\epsilon_t) - r_R|)/2$ で求める.但し, $q_{t,i} = (X_{t,i}, Z_{t,i}, R_{t,i}), (i = 1, ..., N_t)$ は $S_r(X, Z, R)$ の極大値より抽出される.次式から推定比誘電率 $\hat{\epsilon}_t$ を求める.

$$\hat{\epsilon}_{t} = \frac{\sum \boldsymbol{q}_{t,i} \in Q} S_{t} \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right) \epsilon_{t} \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right)}{\sum \boldsymbol{q}_{t,i} \in Q} S_{t} \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right)}$$
(2)

但し, $\epsilon_t \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right) = \operatorname*{arg min}_{\epsilon_t} \left| R \left(\epsilon_t; \boldsymbol{q}_{t,i} \right) - R_{t,i} \right|$ であり,距離点群 $Q = \left\{ \boldsymbol{q}_{t,i} \right| \left| \epsilon_t \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right) - \tilde{\epsilon}_t \right| < \Delta \epsilon_t \right\}$ である. $\tilde{\epsilon}_t$ は $\epsilon_t \left(\boldsymbol{q}_{t,i} \right)$ の最頻値を, $\Delta \epsilon_t$ は設定閾値をそれぞれ示す.

4 数値計算による特性評価

図1の誘電体及び内部目標を仮定する.但し,誘電体内の比誘電率は5.0,内部目標の導電率は10⁷S/mとする.提案法による推定比誘電率は4.76(相対誤差6.8%)である.散乱波形変化等が誤差要因である.処理時間はXeon3.0GHzプロセッサで約4.4秒である.図2に推定比誘電率を用いた[2]の手法の推定像を示す.各推定点と目標境界との推定誤差平均は約0.15波長である.

5 むすび

誘電体内部イメージング法のための比誘電率推定法を 提案し,数値計算によりその有効性を示した.

参考文献

- S. Kidera et al., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 7, pp. 1993-2004, Apr., 2010.
- [2] K. Akune et al., IEICE Gen. Conf. C-1-32, Mar., 2011.
- [3] A. Franchois et al., *IEEE Trans. Antennas. Propagat.*, vol. 45, no. 2, pp. 203-215, Feb., 1997.





