反射式超声 CT 中物体参数的最大似然估计*

王晓珑　　兰从庆

(中国科学院武汉物理所武汉 430071)

1992 年 6 月 12 日收到

针对反射式超声 CT 中积分线弯曲、噪音等因素影响，本文分析了如何应用最大似然估计方法，来估计断层面内物体位置、形状参数等参量，并给出了迭代估计算法及模拟结果.

一、引　　言

1984 年，Rossi 等人研究在 X 射线 CT (XCT) 中，应用最大似然估计方法 (MLE)，从测量投影数据，对一个尺寸、偏心率、指向性等参量已知的物体进行定位[1]. 随后，他们进一步研究对一位置已知的物体估计其形状参数，并提出了对介质中存在的单个物体，估计其位置、尺寸、偏心率、指向性等参量的迭代估计算法[2]. 1990 年，Sauer 等又研究了介质中存在多个性质、大小相同的圆形物体位置的 MLE 问题[3].1991 年，美国著名教授 Devaney 等人将 MLE 方法用于超声衍射 CT 中，研究对单个已知物体进行定位的问题[4].

本文将 Rossi 等的 MLE 方法引入到单发、单收反射式超声 CT(RUCT) 模型中. 考虑到实际测量过程中积分线的弯曲、噪音等因素，研究了如何从模拟测量数据中，应用 MLE 方法，估计断层面内物体位置、形状参量，并给出了迭代估计方法. 模拟计算结果验证了这一方法的正确性.

二、单发、单收反射式超声 CT 模型

在 CT 中，通常考虑二维问题. 设 $f(\boldsymbol{x})$ 为被成象区域里 $\boldsymbol{x}=(x_1,\ x_2)$ 点的介质的声反射系数，超声换能器位于包围此区域的半径为 R_0 的圆周上(x_{10},x_{20})点，该点与坐标原点 0 的连线与 x_1 轴正方向成 φ 角(图 1). 在该区域中，介质满足弱散射条件，声速和声衰减均匀分布. 从声发射源发射一无方向性、无限短脉冲声波，在时刻 τ，此发/收换能器接收到的回波信号 g_t 可看作声反射系数沿以 $(x_{10},\ x_{20})$ 为圆心，ρ 为半径的圆弧 s 的积分[5]:

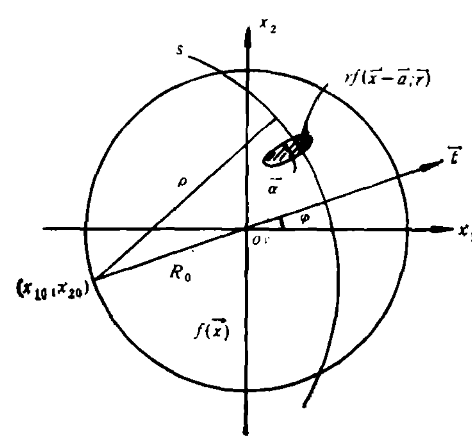

图 1　单发、单收超声反射 CT 示意图

$$g_t(\bar{t},\varphi)=\int f(\boldsymbol{x})ds \tag{1}$$

其中 $\bar{t}=\rho-R$, $\rho=\tau c/2$, c 为声速. $g_t(\bar{t},$

* 自然科学基金和声场、声信息重点实验室课题

φ)称为照射角为 φ 时的投影，改变 φ 角，可得到一系列投影 $g_s(\bar{t},\varphi_i)$，$(i=1,2,\cdots)$. 超声反射 CT 成象，就是从这些投影反演，以重建被成象区域里声反射系数 $f(\boldsymbol{x})$ 的分布。这里，$f(\boldsymbol{x})$ 可表示为在一个均匀介质背景上迭加了 N 个物体，即

$$f(\boldsymbol{x})=f_b(\boldsymbol{x})+\sum_{k=1}^{N} r_k f_k(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{d}_k;\boldsymbol{\gamma}_k) \quad (2)$$

其中，r_k 为第 k 个物体位于 $\boldsymbol{d}_k=(d_{k1},\ d_{k2})$ 处的声反射系数。这里，f_k 是径 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{d}_k$ 点的声反射系数归一化了的，因此，$f_k(\boldsymbol{0};\ \boldsymbol{\gamma}_k)=1$. $\boldsymbol{\gamma}_k=(A,\lambda,\theta)$ 表示第 k 个物体的几何形状参量，A、λ，θ 分别为此物体的尺寸、偏心率和指向性角[2]. 在 CT 成象的物体参数估计中，$f_k(\boldsymbol{x};\ \boldsymbol{\gamma}_k)$ 的分布通常假定是已知的，例如，在多数场合下，可认为是均匀分布的.

本文考虑一简单特例，即均匀背景介质的声反射系数已知(不失一般性，可设为 0)，以及仅存在单个物体($N=1$)的情形。物体的形状参量以椭圆形物体的三个特征参量来表示：大小 A，偏心率 λ，指向角 θ，这三个量的不同组合大致可表示在断层面内单个物体的形状.其中，A 是椭圆形物体长、短半轴的几何平均，λ 是长、短半轴的比，θ 是长轴与 x_1 轴正方向的夹角。这样，断层面内声反射系数分布可表示为：

$$f(\boldsymbol{x})=rf_0(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{d};\ A,\ \lambda,\ \theta) \quad (3)$$

下面，首先假定 f_0 在该椭圆区域上为常数，并且存在强噪音干扰情况下，研究由接收到的超声回波信号对该物体的 $\boldsymbol{d}$ 作最大似然估计. 然后，进一步研究，从带噪音回波信号出发，对物体的位置和形状，进行综合参数估计的方法.

三、物体位置的最大似然估计

由图 1 得到的投影为

$$y_s(\bar{t},\varphi)=g_s(\bar{t},\varphi;\boldsymbol{d})+n(\bar{t},\varphi) \quad (4)$$

其中 $n(\bar{t},\ \varphi)$ 假定为零均值高斯噪音，其 $E[n(\bar{t},\varphi)n(\bar{t}',\varphi')]=\frac{N_0}{2}\delta(\bar{t}-\bar{t}',\ \varphi-\varphi')$，$N_0/2$ 为 $n(\bar{t},\ \varphi)$ 的功率谱密度，角标 s 表示投影沿圆弧进行.

根据非线性参量的 MLE 方法，若使

$$\varepsilon(\boldsymbol{d})=\frac{1}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty|y_s(\bar{t},\varphi_i)-g_s(\bar{t},\varphi_i;\ \boldsymbol{d})|^2 d\bar{t} \quad (5)$$

达到最小，则可得到该被检测物体中心位置 $\boldsymbol{d}$ 的 MLE 值 $\hat{\boldsymbol{d}}$. 展开式(5)右边积分号中的平方项，得

$$\begin{aligned}\varepsilon(\boldsymbol{d})=&\frac{1}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty y_s^2(\bar{t},\ \varphi_i)d\bar{t}\\&-\frac{2}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty y_s(\bar{t},\ \varphi_i)\\&\cdot g_s(\bar{t},\varphi_i;\ \boldsymbol{d})d\bar{t}\\&+\frac{1}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty g_s^2(\bar{t},\varphi_i;\ \boldsymbol{d})d\bar{t}\end{aligned} \quad (6)$$

式(6)右边第一项与 $\boldsymbol{d}$ 无关，对求 $\varepsilon(\boldsymbol{d})$ 的极小值无影响，在讨论极小值时可去掉。将式(6)中后二项变号，可得到一个关于 $\boldsymbol{d}$ 的对数似然函数[6]:

$$\begin{aligned}L(\boldsymbol{d})=&\frac{2}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty y_s(\bar{t},\varphi_i)\\&\times g_s(\bar{t},\varphi_i;\ \boldsymbol{d})d\bar{t}\\&-\frac{1}{N_0}\sum_{\varphi_i}\int_0^\infty g_s^2(\bar{t},\varphi_i;\ \boldsymbol{d})d\bar{t}\end{aligned} \quad (7)$$

若 $L(\boldsymbol{d})$ 在 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 处达到最大，则 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 就是物体中心位置 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 的 MLE 值.

同 XCT 中 $L(\boldsymbol{d})$ 的计算公式[1]相比较，URCT 中 $L(\boldsymbol{d})$ 的计算有下列几点不同之处：

(1) 在 XCT 中，Rossi 等人曾证明式(7)中第二项积分与 $\boldsymbol{d}$ 无关，但在 URCT 中此项与 $\boldsymbol{d}$ 有关(易证，略)；

(2) 式 (7) 中第一项在 XCT 中可用“卷积-后投影”重建算法计算，能够大大减轻计算负担，而在 URCT 中，由于积分线弯曲的影响，此项无法采用这一算法，$L(\boldsymbol{d})$ 必须逐点进行计算，因而计算量非常大(大约大一个数量级[7])；

(3) 在 XCT 中，X 射线沿直线传播，一般观察角度范围为 0—π，而在 URCT 中，由于波阵面弯曲的影响，若仍采用 0—π 的角度范围，将对 $\boldsymbol{d}$ 的估计造成一定的误差.

综上所述，在 URCT 中采用 MLE 方法对物体位置进行估计，要对式(7)右边两项逐点进行计算。另外，为了消除波阵面弯曲造成的误差，还要求照射角变化范围尽量趋于 2π. 因此，式(7)的计算量相当大。但是，如果在式(7)中，从实际测量的沿弯曲波阵面积分得到的投影 $y_s(\bar{t},\ \varphi)$ 出发，采用迭代方法逐步消除波阵面弯曲的影响，得到沿直线积分下的回波信号 $y_l(\bar{t},\ \varphi)$ 的近似修正值 $y^{(k)}(\bar{t},\ \varphi)$（$k$ 为迭代次数），然后采用 XCT 中 MLE 计算公式来计算 $L^{(k)}(\boldsymbol{d})$，而且照射角只须为 $0-\pi$，即

$$L^{(k)}(\boldsymbol{d}) = \sum_{\varphi_i}\int_0^\infty y^{(k)}(\bar{t},\varphi_i)\times g_l(\bar{t},\ \varphi_i;\ \boldsymbol{d})d\bar{t} = \sum_{\varphi_i}\int_0^\infty y^{(k)}(\bar{t},\varphi_i)g_l(\bar{t}-\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{\phi}_i,\ \varphi_i)d\bar{t} \qquad (8)$$

其中 $\boldsymbol{\phi}_i=(\cos\varphi_i,\ \sin\varphi_i)$，$g_l$ 为对被估计物体沿直线 l 积分求得的投影。显然，式(8)为 XCT 中的卷积-后投影计算公式。

文献[8]指出，弯曲积分线下得到的回波信号 $y_s(\bar{t},\ \varphi)$ 可看作直线积分线下得到的回波信号 $y_l(\bar{t},\ \varphi)$ 加上一误差项 $e(\bar{t},\ \varphi)$，我们可用迭代算法，从测量数据 $y_s(\bar{t},\ \varphi)$ 出发，得到逐步逼近 $y_l(\bar{t},\ \varphi)$ 的修正值 $y^{(k)}(\bar{t},\ \varphi)$（$k$ 为迭代次数），从而得到弯曲波阵面下物体中心位置的 MLE 值 $\hat{\boldsymbol{d}}$. 即

(1) 令 $\quad y^{(0)}(\bar{t},\ \varphi)\simeq y_s(\bar{t},\ \varphi) \qquad (9)$

(2) 将 $y^{(0)}$ 代入式(8)，求出 $L^{(0)}(\boldsymbol{d})$，得到 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$. 由已知的物体声反射系数分布 $rf_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{\gamma})$，得到断层面内声反射系数的初始分布

$$f^{(0)}(\boldsymbol{x}) = rf_0(\boldsymbol{x}-\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)};\ \boldsymbol{\gamma}) \qquad (10)$$

(3) 修正 $y^{(0)}(\bar{t},\ \varphi)$，得

$$y^{(1)}(\bar{t},\ \varphi) = y^{(0)}(\bar{t},\ \varphi) - [P_s(\bar{t},\varphi;\ \hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}) - P_l(\bar{t},\ \varphi;\ \hat{\boldsymbol{d}}^{(0)})] \qquad (11)$$

其中

$$P_s(\bar{t},\ \varphi;\ \hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}) = \int_s f^{(0)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{\gamma})ds$$
$$P_l(\bar{t},\ \varphi;\ \hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}) = \int_l f^{(0)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{\gamma})dl \qquad (12)$$

(4) 将 $y^{(1)}$ 代入式(8)，求出 $L^{(1)}(\boldsymbol{d})$，并得到物体位置 MLE 的第一次迭代值 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(1)}$，$\hat{\boldsymbol{d}}^{(1)}$ 应该比 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$ 更接近于物体真实位置 $\boldsymbol{d}$. 断层面内声反射系数作了一次迭代修正后的分布即为

$$f^{(1)}(\boldsymbol{x}) = rf_0(\boldsymbol{x}-\hat{\boldsymbol{d}}^{(1)};\ \boldsymbol{\gamma}) \qquad (13)$$

(5) 由 $f^{(1)}(\boldsymbol{x})$，从式(12)求 P_s、P_l，代入式(11)得到 $y^{(2)}$.

如此迭代下去，直到按适当收敛条件终止迭代，得到 $y_l(\bar{t},\ \varphi)$ 的近似修正值 $y^{(k)}(\bar{t},\varphi)$，并进而得到 $\boldsymbol{d}$ 的较准确估计值 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(k)}$.

作为模拟计算的一个简单例子，假设被成象区域里介质的声反射系数分布为[9]:

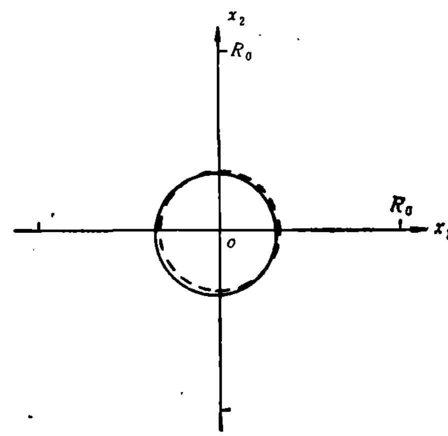

图 2 按公式(7)逐点计算的位置估计结果（换能器与坐标原点距离为 $3R_0$，物半径为 $0.3R_0$，信噪比 0 dB，$\boldsymbol{d}=(0.,0.)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0,-0.016R_0)$）.

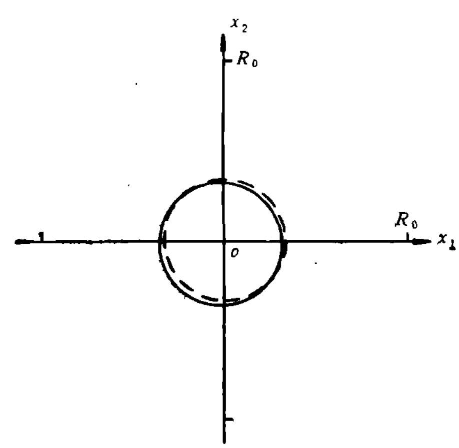

图 3 按 XCT 中算法计算的位置估计结果（距离、物半径、信噪比与图 2 相同，$\boldsymbol{d}=(0.,\ 0.)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0,\ -0.016R_0)$）.

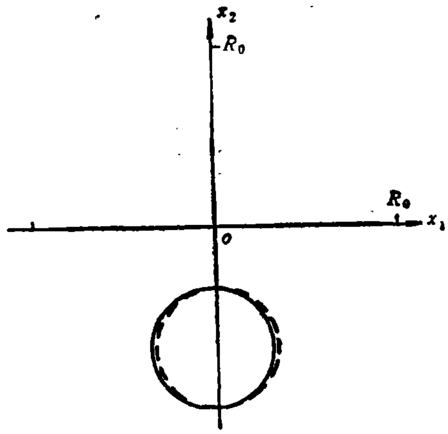

图 4　按公式(7)逐点计算的位置估计结果（换能器与坐标原点距离为 $1.03R_0$，物半径 $0.3R_0$，信噪比 0dB，$\boldsymbol{d}=(0.,\ -0.65R_0)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0,\ -0.651R_0)$）.

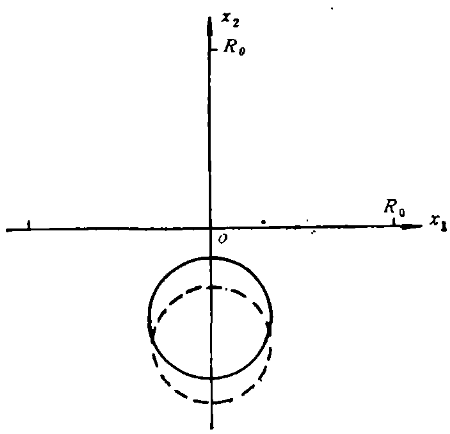

图 5　按 XCT 中算法计算的位置估计结果（距离、物半径、信噪比与图 4 相同，$\boldsymbol{d}=(0.,\ -0.65R_0)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0,\ -0.492R_0)$）.

$$f(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{d};\boldsymbol{\gamma})=\begin{cases}1 & \text{当}\|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{d}\|\leqslant 0.3R\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

若取 $\boldsymbol{d}=(0.0,\ 0.0)$，即被估计物体中心位于坐标原点，用式(7)进行逐点计算作 MLE 的结果示于图 2，而用 XCT 中 MLE 的结果示于图 3．由图 2 和图 3 可以看出，当物体远离换能器时，采用两种算法得到的 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 基本相符，都接近于物体真实位置 $\boldsymbol{d}$．当取 $\boldsymbol{d}=(0.0,-0.65R_0)$ 时，由两种算法所得结果示于图 4 和图 5，可以看出，当物体接近换能器时，用 XCT 中的算法估计出的 $\boldsymbol{d}$ 的误差较大．图 6 为用本文介绍的迭代算法，经 5 次迭代后得到的结果，可见，当采用迭代修正弯曲波阵面影响的算法后，

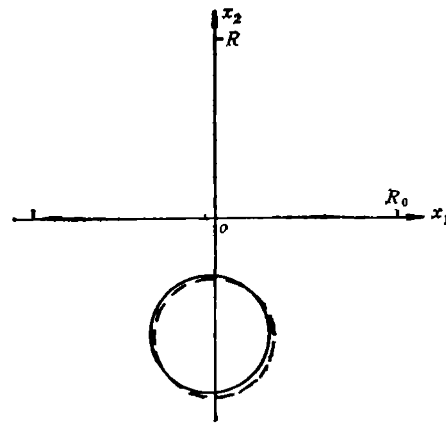

图 6　按本文迭代算法计算的位置估计结果（距离、物半径、信噪比与图 4 相同，$\boldsymbol{d}=(0.,\ -0.65R_0)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0,\ -0.619R_0)$）.

估计误差比图 5 减少许多，而接近直接算法的估计结果．（在图 2 至图 8 中，虚线为原物体，实线表示估计物体。）

四、物体位置和形状参数的综合估计

在 XCT 中，Rossi 等基于对物体各个参量分别进行单个估计所得到的结论，提出了一种综合估计物体位置和形状参量的有效迭代算法[2]．该算法的步骤如下：

（1）首先，假定物体是一圆形物体，运用先验知识选择其大小的初值 $A^{(0)}$，并估计物体位置 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$；

（2）仍然假定物体是圆形的，由 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$ 估计 $\hat{A}^{(0)}$；

（3）运用先验知识假定物体偏心率初值 $\lambda^{(0)}$，由 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$、$\hat{A}^{(0)}$ 及 $\lambda^{(0)}$ 估计物体指向性角 $\hat{\theta}^{(0)}$；

（4）由 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(0)}$、$\hat{A}^{(0)}$ 和 $\hat{\theta}^{(0)}$ 估计物体偏心率 $\hat{\lambda}^{(0)}$；

（5）以最新估计参量依次迭代更新 $\hat{\boldsymbol{d}}^{(k)}$、$\hat{A}^{(k)}$、$\hat{\theta}^{(k)}$ 和 $\hat{\lambda}^{(k)}(k=0,1,2,\cdots)$，直到依据

某种收敛条件结束迭代过程。

在超声反射 CT 中，考虑进弯曲波阵面的影响，我们对 Rossi 等的算法作了改进，即在 $\vec{d}$ 等参量迭代估计收敛后，根据式(12)等产生修正弯曲波阵面积分影响的投影数据，并由此估计出物体位置等参量的新估计值。

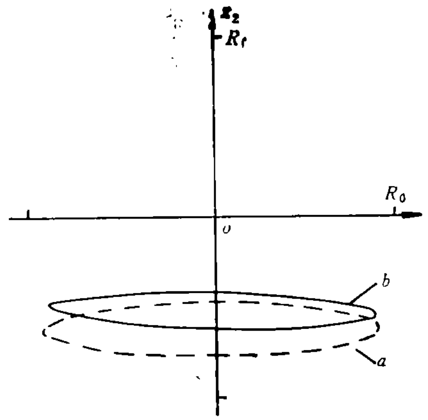

图 7 待估计物体几何(a)及按 XCT 算法估计的物体几何 (b)。(换能器与坐标原点距离 $1.5R_0$，信噪比 0dB，$\boldsymbol{d}=(0., -0.6R_0)$，$\boldsymbol{\gamma}=(0.367R_0, 6.0, 0.0°)$，$\hat{\boldsymbol{d}}=(-0.016R_0, -0.492R_0)$，$\hat{\boldsymbol{\gamma}}=(0.29R_0, 9.0, -1.51°)$。)

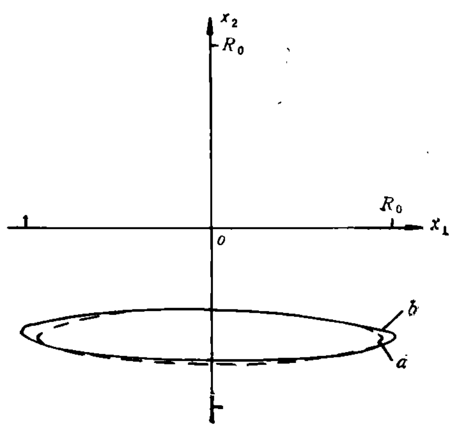

图 8 待估计物体几何(a)及按本文迭代算法估计的物体几何 (b)。(距离、信噪比、$\boldsymbol{d}$、$\boldsymbol{\gamma}$ 与图 7 相同，$\boldsymbol{d}=(-0.016R_0, -0.587R_0)$，$\hat{\boldsymbol{\gamma}}=(0.36R_0, 7.74, -0.503°)$)。

模拟计算结果如图 7、图 8 所示。图 7 中曲线 a 为待估计物体几何，物体中心位置为 $\boldsymbol{d}=(0., -0.6R_0)$，形状参数为 $\boldsymbol{\gamma}=(0.367R_0, 6.0, 0.0°)$；曲线 b 为采用 XCT 中算法估计的物体几何，其 MLE 值分别为 $\vec{d}=(-0.016R_0, -0.492R_0)$，$\boldsymbol{\gamma}=(0.29R_0, 9.0, -1.51°)$。可见，由于物体尺寸较大，其中心位置和形状参数的估计偏差较大。图 8 中曲线 b 为采用本文介绍的迭代算法、经 5 次迭代修正弯曲积分线后所估计的物体几何，其中心位置和形状参数的估值分别为 $\vec{d}=(-0.016R_0, -0.587R_0)$，$\boldsymbol{\gamma}=(0.36R_0, 7.74, -0.503°)$。可见，这个结果比图 7 中的估计值更接近于原物体所在位置及形状参数。

五、结　论

本文将 XCT 中物体参数 MLE 方法应用到超声反射 CT 中。在物体远离换能器时，波阵面弯曲的影响可以忽略，故可直接采用 XCT 中 MLE 算法。但是，在物体接近换能器时，由于波阵面弯曲的影响，若仍采用 XCT 中 MLE 算法，估计结果有较大偏差。针对这种情况，本文提出了一种迭代修正算法。采用本算法，对如式 (14) 所表示的声反射系数分布的简单情况，作了物体位置 MLE 的模拟计算，结果表明，该算法估计性能接近于采用逐点计算方法的估计性能，而计算量约为后者的十分之一。将这一算法与 Rossi 等的关于物体位置及形状参数的综合估计算法相结合，可以有效地对物体的声反射系数分布已知情况下物体位置、形状参数进行 MLE，并可得到较好结果。模拟结果同时表明，这一算法具有很强的抗噪音能力。

当然，在 CT 成象实际应用当中，测量投影数据往往存在较为严重的照射角受限问题，并且在断层面内往往也不止存在一个物体。在超声反射 CT 中的物体参数估计问题研究中，考虑进这些因素，对其实际应用具有很大价值，值得进一步研究。

参 考 文 献

[1] Rossi, D. J. and Willsky, A. S., *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Process.*, 32-4(1984), 886—906.

[2] Rossi, D. J. and Willsky, A. S., *Signal Processing* 18-

1(1989), 63—87.
[3] Sauer, K. and Liu, B., *IEEE Inter. Conf. Acoust., Speech, Signal Process.*, 4(1990), 1861—1864.
[4] Devaney, A. J. and Tsihrinzis, G. A., *IEEE Trans. on Signal Processing*, 39-3(1991), 672—682.
[5] Norton, J. and Linzer, M., *Ultrasonic Imaging* 1 (1979), 154—184.
[6] 范特里斯,检测、估计和调制理论(卷1),国防工业出版社 (1983),324—325.
[7] Shepp, L. A. and Logan, B. F., *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 21(1974), 21—43.
[8] Xu, K. K., Lan, C. Q. and Chen, Y. H., *Acoustical Imaging* 19(1991), 161—166.
[9] Norton, J., *J. Acous. Soc. Am.*, 67-4(1980), 1266—1273.

超声检测中干扰信号的识别与抑制

马 志 敏
(武汉水利电力大学 武汉 430072)

1992年9月7日收到

在利用超声脉冲回波法测量液位、料位、厚度及河道地形时，常常会遇到来自传播媒体中杂散粒子的干扰和来自电源及空间电磁耦合引入的干扰. 本文分析了杂散粒子干扰反射的特征，分析了电磁噪声干扰与正常回波信号之间不同的时间特性，不同的谱分布特征及它们之间的相关特性. 在此基础上提出了程控增益抑制、自动时间衰减抑制、功率谱密度特征识别、相关识别、数字滤波等几种识别和抑制噪声干扰的方法.

一、前言

在利用超声波检测液位、料位、厚度和探测水下地形时，常常会遇到两种干扰. 一种是来自传播媒体中悬浮粒子产生的干扰，如水流中杂质颗粒和气泡等；另一种是来自外界的电磁干扰. 后者在许多现场环境中往往是一个十分突出的问题. 这些干扰信号通常构成了仪器正常使用的主要障碍之一. 因此，正确地识别正常界面回波信号和干扰信号，然后根据两者的特征，寻求有效的抑制方法是十分必要的.

二、杂散粒子干扰信号的特征

对于来自传播媒体中悬浮粒子产生的杂散干扰反射，由于粒子具有悬浮漂移性，因此粒子的反射波与正常界面反射波的区别主要有两点：一是粒子反射波具有时间上和幅度上的不稳定性，而界面反射波在时间和幅度上都是稳定的. 二是悬浮粒子反射波幅度上的相对微弱性.

我们知道，超声波随传播距离是按指数关系衰减的[1]，设在离接收器 x 处有界面，则界面反射波为

$$p = p_0 e^{-2\alpha x} \quad (1)$$

α 为衰减系数；又设在同一地点有悬浮粒子，则粒子反射波为

$$p' = p'_0 e^{-2\alpha x} \quad (2)$$

一具体试验表明，距接收器 15cm 的塑料桶底的反射波，经一级放大后可达 10V，而同样距离时，直径约 1mm 的塑料沙粒的反射波仅为 0.6V，长江沙粒的反射波最大不足 0.2V. 这说明在同样条件下粒子的反射波远小于界面的反射波，即一般有 p'_0 远小于 p_0.

三、电磁干扰信号的识别

对于来自外界的电磁干扰信号可以从以下