

水声多径单阵元主动时间反转检测性能研究

杨伏洲, 王海燕, 申晓红, 陈 钊

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 利用时间反转(Time Reversal, TR)良好的环境宽容性以及能量聚焦性, 单阵元收发合置换能器通过主动时反信号对低信噪比下目标进行检测, 以经典射线理论建立海洋中声多径信道传播模型, 基于理论推导了单阵元主动 TR 信号目标检测的可行性。从理论上对单阵元收发合置换能器主动 TR 的处理增益进行详细分析, 推导出单阵元主动 TR 的处理增益的提高与多径信道数目近似成正比的关系, 为低信噪比下微弱信号的主动方式检测提供了可靠的理论依据。最后仿真以海洋声传播多径信道为背景, 通过研究单频矩阵脉冲(CW)信号主动 TR 下单阵元收发合置换能器在微弱信号下检测目标的实验, 成功验证了理论。

关键词: 多径信道; 时间反转; 单阵元; 收发合置; 主动探测

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-04-0359-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.04.013

Active time reversal detection performance of a single transducer in acoustic multipath channel

YANG Fu-zhou, WANG Hai-yan, SHEN Xiao-hong, CHEN Zhao

(College of Marine Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Due to favorable tolerance of environment and focusing of energy in time reversal, a single monostatic transducer with active time reversal signal can be used to detect targets of low signal to noise ratio. With the acoustic multipath model based on classic ray theory, the feasibility of active TR signal detection is conducted theoretically. Through the detailed analysis of the active TR processing gain of a single monostatic transducer, the approximately proportional relationship between processing gain and the number of multipath is developed, which provides a theoretic basis for weak signal detection. In the condition of acoustic multipath propagation, the theory proposed in this paper is verified by the simulation of the active TR target detection with CW signal.

Key words: ultipath; time reversal (TR); single transducer; monostatic; active detection

0 引言

海洋不均匀和多途效应使接收信号的时域、频域特性发生变化, 最终导致检测能力下降。而时间反转技术不需要介质性质及换能器阵列分布特性等先验知识, 可以自适应修正多途引起的波形畸变实现自适应聚焦^[1]。

TR(时间反转)源于光学相位共轭, 即光线在通过不均匀介质时由于多径信道造成相位差, 然后接收器将接收的不同光线通过相位共轭, 补偿不同光线的相位差, 重新发射出去, 从而实现在光源位置的再聚焦^[2]。在线性声学和环境特性保持不变的条件下, 根据声场互易性和波动方程具有的时反性^[3],

TR 可实现时间和空间上目标反向散射的声信号在声源聚焦的能力, 为目标检测和识别提供了理论基础。

主动 TR 定位技术^[4,5]是 TR 定位研究的重点, 它利用了海洋信息传播的互易性, 物理含义清楚; 无需海洋环境的先验知识, 大大简化了信号处理运算量; 主动 TR 适应恶劣环境的特点尤为突出, 在水文条件越恶劣的环境中效果越明显^[6]。

本文推导出主动 TR 单阵元收发合置换能器处理增益的提高与海洋多径信道下本征声线的数目有关, 海洋多径数目越多, 单阵元处理增益提高越大, 为低信噪比下微弱信号的检测提供了可靠的理论依据。仿真海洋多径信道下主动信号检测模型, 可实现基于 TR 操作、信噪比为-15 dB 的微弱信号明显可辨。

1 时间反转镜基本原理

基于时域的波动方程为

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-03-27

作者简介: 杨伏洲(1984-), 男, 湖北荆州人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 杨伏洲, E-mail: zhuhong0825@tom.com

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = s(t) \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) \quad (1)$$

式中： $c(\mathbf{r})$ 为声速， $p(\mathbf{r}, t)$ 是点 \mathbf{r} 的声压， \mathbf{r}_m 为声波运动轨迹； $s(t)$ 声源信号。

对式(1)进行傅里叶变换，得

$$\nabla^2 P(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} P(\mathbf{r}, \omega) = S(\omega) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) \quad (2)$$

利用格林定理对式(2)进行求解：

$$P(\mathbf{r}, \omega) = G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_m, \omega) S(\omega) \quad (3)$$

$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_m, \omega)$ 为声源到接收点之间的格林函数^[9,10]。

考虑 M 个收发合置的换能器组成基阵进行主动时反操作，那么 \mathbf{r}_n 处接收的总声压 $P_{rec}(\mathbf{r}_n, \omega)$ 为

$$P_{rec}(\mathbf{r}_n, \omega) = \sum_{i=1}^M [P(\mathbf{r}_i, \omega)]^* \cdot e^{j\omega T_c} \cdot G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_n, \omega) \quad (4)$$

式中： $P(\mathbf{r}_i, \omega)$ 为 \mathbf{r}_i 换能器接收信号； T_c 为传播时延，时延应足够大以确保声源信号能充分接收；

若 $G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_n, \omega) = G(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_i, \omega)$ ，即水声信道满足互易性，则有

$$P_{rec}(\mathbf{r}_n, \omega) = S^*(\omega) e^{j\omega T_c} \sum_{i=1}^M [G(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_i, \omega)]^* \cdot G(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_i, \omega) \quad (5)$$

$S(T_c - t)$ 的傅里叶变换为 $S^*(\omega) e^{j\omega T_c}$ ，是声源信号的时反形式。信号频域的相位共轭与时域 TR 是等价的。

当 $\mathbf{r}_n = \mathbf{r}_m$ 时，即接收点位于声源位置，式(5)求和项简化成：

$$\gamma(\omega) = \sum_{j=1}^M |G(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_m, \omega)|^2 \quad (6)$$

因此，对于一个除声源以外的任意接收点 \mathbf{r}_n ， M 个阵元发射的信号不能进行相干叠加，而当接收点位于声源时， M 个阵元发出的信号可以相干叠加，使聚焦场的振幅最大^[7]。

2 建立多径信道

一个声源信号从不同方向经过不同路径到达接收端，引起接收信号幅度随机起伏和信号时延扩散称为多径传输。据 Jensen 对海洋信道仿真建模方法的分类方案，基于仿真浅海环境、信号频率为 10 kHz、与距离有关的水声传播，多径信道模型采用经典射线理论。

在经典射线声学的范畴内，对声场的描述是由射线来传递声能量的，从声源出发的射线按一定的路程而到达接收点，接收到的声场是所有到达射线的叠加结果。射线理论中把声路径长度表示成路径两端点的函数，当两个端点分别位于声源和接收器时，这样的声线称为本征声线^[6]，如图 1 所示。

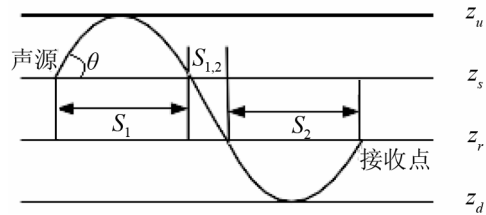


图 1 射线理论本征声线
Fig.1 Eigenray in ray theory

在图 1 中， Z_d 为上反转深度， Z_u 表示下反转深度， Z_s 、 Z_r 分别为声源和接收点位置。 S_1 表示声源深度处的子跨度， S_2 表示接收点深度处的子跨度， S_{12} 表示从声源深度到接收点深度的子跨度。则：

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \int_{z_u}^{z_s} \text{ctg} \theta(z) dz & S_{12} &= \int_{z_s}^{z_r} \text{ctg} \theta(z) dz \\ S_2 &= 2 \int_{z_r}^{z_d} \text{ctg} \theta(z) dz & S &= S_1 + S_2 + 2S_{12} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中， θ 为掠射角。

远距离传输时，声线将多次穿过接收机和声源的深度形成声线，因此，本征声线到达接收点时的形式可以表示为

$$Dis = mS + aS_1 + S_{12} + bS_2 \quad (8)$$

其中， m 为不小于 0 的一个整数，表示本征声线经过 m 个整数跨度， a 和 b 只能取 0 或 1。 $m=0$ 时本征声线形式如图 2 所示。

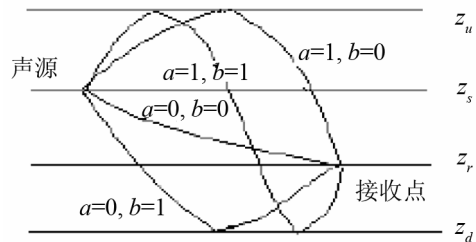


图 2 $m=0$ 时各种本征声线形式
Fig.2 Eigenrays when $m=0$

3 单阵元收发合置换能器主动 TR 信号检测

单阵元收发合置换能器信号检测主要流程如图 3 所示。

设 $y(t)$ 为单阵元第一次接收到的信号，引入高

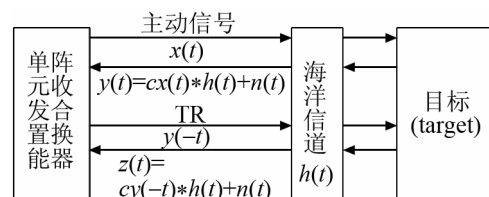


图 3 主动 TR 流程图
Fig.3 Flow diagram of active TR

斯白噪声 $n(t)$, 则:

$$y(t) = cx(t)h(t)h(t) + n(t) \quad (9)$$

式中, c 为目标散射系数, 不仅与发射频率有关, 还与目标的形状和反射系数有关。单阵元时反 $y(t)$ 再次发射, 时反频率不变, 目标散射系数仍为 c , 接收信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = cy(-t)h(t)h(t) + n(t) \quad (10)$$

对 $z(t)$ 作傅里叶变换, 得:

$$Z(\omega) = cY^*(\omega)H(\omega)H(\omega) + N(\omega) = c^2 X^*(\omega) |H(\omega)|^4 + cN^*(\omega)H^2(\omega) + N(\omega) \quad (11)$$

若不考虑散射因子 c , 在 $H(\omega) > 1$ 时 TR 信号增强, 为低信噪比下微弱信号检测提供了理论可能。

假设信号、噪声的均值和方差为:

$$E[x(t)] = 0; V[x(t)] = \delta_s^2;$$

$$E[n(t)] = 0; V[n(t)] = \delta_n^2.$$

设相干多径信道系统的近似表达式为 $h(t) =$

$\sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i)$, 其中 A_i 和 τ_i 分别是沿第 i 路径到达的本征声线的幅度响应和时延响应。假设信号与噪声相对独立, 由声场互易性及忽略介质吸收的频率特性和散射特性, 则:

$$y(t) = c \sum_{i=1}^N A_i^2 x(t - 2\tau_i) + n(t) \quad (12)$$

$$z(t) = c^2 \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right)^2 x(-t) + c \sum_{i=1}^N A_i^2 n(-t + 2\tau_i) + n(t) \quad (13)$$

设 $y(t)$ 、 $z(t)$ 表达式中信噪比分别为 SNR_{in} 、 SNR_{out} , 则有:

$$SNR_{in} = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right)^{in} = 10 \log \frac{\delta_s^2}{\delta_n^2} \cdot c^2 \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right)^2 \quad (14)$$

$$SNR_{out} = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right)^{out} = 10 \log \frac{\delta_s^2}{\delta_n^2} \cdot \frac{c^4 \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right)^4}{\left(c \sum_{i=1}^N A_i^2 + 1 \right)^2} \quad (15)$$

则单阵元主动 TR 的处理增益为

$$AG = 10 \log \frac{(S/N)^{out}}{(S/N)^{in}} = 10 \log \frac{c^2 M^2}{(cM + 1)^2} \quad (16)$$

记 $M = \sum_{i=1}^N A_i^2$, 则有: $\frac{cM}{cM + 1} < 1$, $AG < 0$ 。

TR 接收信号虽然信号分量增强, 但由于信号和噪声一起时反, 使原有噪声分量增强, 从而导致处理增益反而下降。考虑消除噪声干扰, 处理增益为:

$$AG = 10 \log c^2 M^2 = 20 \log \left(c \sum_{i=1}^N A_i^2 \right).$$

主动信号频率已知, 则目标散射系数及信道幅度相对可以确定, 单阵元主动 TR 处理增益的提高与多径下本征声线的数目近似成正比关系。海洋多

径信道 $N \gg 1$, 假设理想情况下 $c \approx A_i \approx 1$, 则 $AG \approx 20 \log N$, 处理增益明显提高, 这也正是主动 TR 的特点。

4 模型检测仿真与验证

仿真条件: 信号为 CW 脉冲, 载频为 10kHz, 脉冲宽度为 0.01 s, 幅值 ± 1 V。噪声采用高斯白噪声。海底深度为 120m, 声传播距离为 1000 m, 声速为 1450 m/s, 考虑浅海环境下信噪比 -15 dB。单阵元位置(0, 40), 探测目标位置(1000, 60)。由于声波传播距离较远, 可将目标看成点目标。声源时频信号如图 4、5 所示。

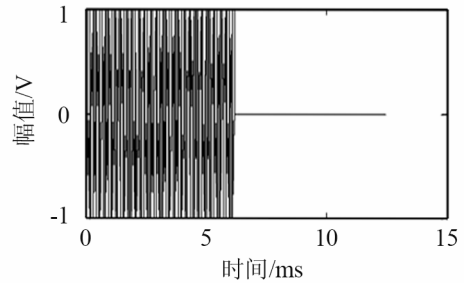


图 4 声源时域信号 $S(t)$

Fig.4 Source signal $S(t)$ in time domain

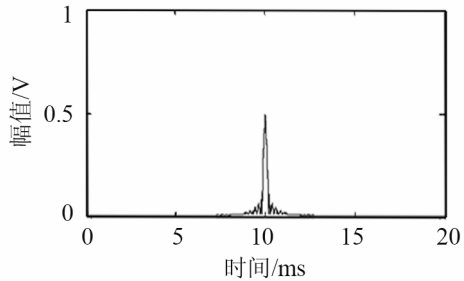


图 5 声源频域信号 $S(w)$

Fig.5 Source signal $S(w)$ in frequency domain

已知声源位置(0, 40), 目标位置(1000, 60), 由经典射线理论可得声线传播中各种本征声线的形式。若考虑海面或海底的一次反射, 即 $m=0$, 本征声线如图 6 所示。海面或海底的两次反射, 即 $m=1$,

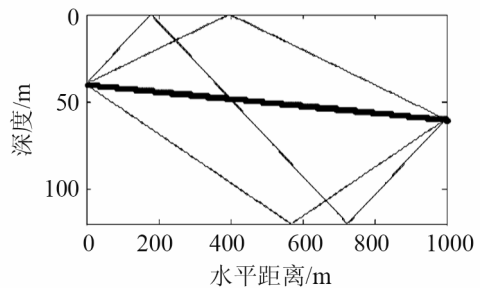


图 6 一次反射时本征声线

Fig.6 Eigenrays with primary reflection

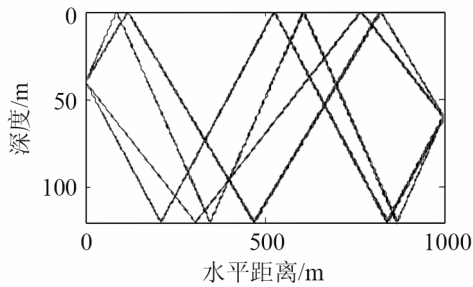


图7 二次反射时本征声线

Fig.7 Eigenrays with primary and secondary reflections

本征声线图 7 所示。

由于声线到达目标过程中经过海面及海底的多次反射，除海面、海底反射外，还伴随吸收及不同程度的散射。基于声波能量传播损失的考虑，本仿真模型仅考虑一次反射的情况，如图 6 所示。

主动探测信号由 4 条信道传播，由于每条信道的时延不同，单阵元第一次接收目标反射的波形由 4 条声线叠加，相比声源信号会发生时间拓展，时域波形如图 8 所示，图 9 为相应的频域波形。图 9 中，主动探测信号已淹没于噪声中，无法辨认。

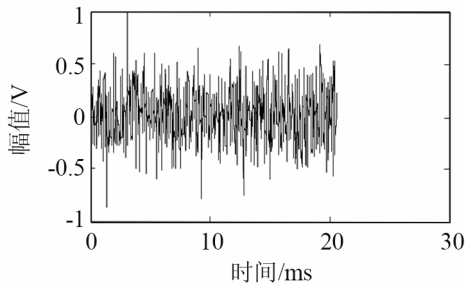


图8 接收时域波形 y(t)(包括噪声)

Fig.8 Received signal y(t) in time domain (Including noise)

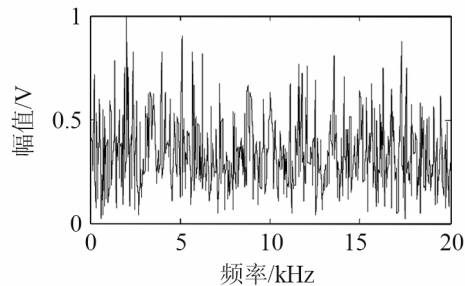


图9 接收频域波形 Y(w)(包括噪声)

Fig.9 Received signal Y(w)in frequency domain (Including noise)

由于主动发射信号频率已知，采用椭圆滤波器在时反操作之前对接收信号进行滤波处理，效果如图 10 所示。

由图 10 可见，图 10 滤波效果显著，TR 操作后接收波形如图 11 所示。

声线经由 4 个海洋信道传播，经过 TR 处理，与多径信道数目成正比的单阵元处理增益得到提

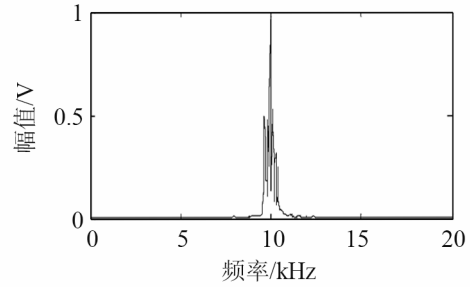


图10 椭圆滤波器滤波后波形

Fig.10 Signal after elliptic filtering in frequency domain

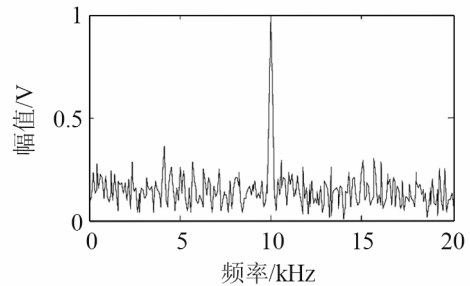


图11 时反处理频域波形

Fig.11 Signal after TR in frequency domain

高，使原本信噪比-15 dB 下很难分辨的主动信号清晰可见(图 11)，大大提高了信噪比(相比图 9 而言)。其时反后接收信号的自相关图如图 12 所示，可见信号通过相干叠加后，聚焦场(目标)的振幅最大，达到目标检测的要求(图 8~12 经过归一化处理)。

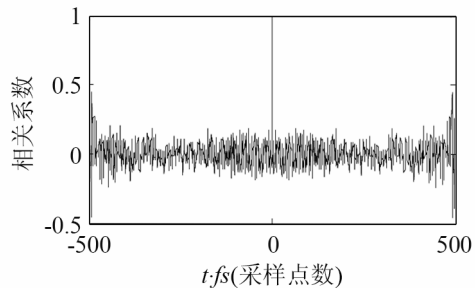


图12 接收信号自相关图

Fig.12 Autocorrelation of received signal

5 结 论

本文基于射线理论模拟海洋多径信道情况，推导单阵元主动时反信号在海洋多径传播下的目标检测模型。理论研究结果表明，主动时反的处理增益提高显著，可实现低信噪比下微弱信号的检测。

参 考 文 献

[1] Kuperman W A, Hodgkiss W S, Song H C, Akal T, Ferla C, Jackson D R. Phase conjugation in the ocean: experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror[J]. Acoust. Soc. Am, 1998, 103(1): 25-40.

- [2] Jackson D R, Dowling D R. Phase conjugation in underwater acoustic[J]. Acoustic. Soc. Am, 1991, **89**(1): 171-181.
- [3] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. MA Dayou. Theoretical Basis of Modern Acoustics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [4] 郭国强, 杨益新. 浅海波导中时间反转处理增强信混比能力的仿真分析[J]. 声学技术, 2007, **26**(5): 826-829. GUO Guoqiang, YANG Yixin, SUN Chao. Echo-to-reverberation enhancement capability of time reversal processing in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(5): 826-829.
- [5] 生雪莉, 周伟, 等. 被动迭代时间反转镜研究[J]. 声学技术, 2008, **27**(4): 588-592. SHENG Xueli, ZHOU Wei, et al. Study on passive iterative time reversal mirror[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(4): 588-592.
- [6] 孙琳. 浅水环境中时反镜聚焦性能的研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2007, 1-9. SUN Lin. Study of time-reversal mirror retrofocusing in shallow ocean. A dissertation of the degree of master in Harbin Engineering University, 2007, 1-9.
- [7] 孙琳, 李海森, 陈宝伟, 等. 时反法用于主动探测的研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, **20**(10), 2529-2530. SUN Lin, LI Haisen, CHEN Baowei. Research and emulation of active detection in time reversal[J]. System Simulation, 2008, **20**(10), 2529-2530.
- [8] 欧晓丽. 水声信道建模及其仿真平台的实现. 厦门大学硕士学位论文, 2007, 29-32. OU Xiaoli. Underwater acoustic channel modeling and simulation realization. A dissertation of the degree of master in Xiamen University, 2007, 29-32.
- [9] 赵龙龙, 邓伟, 生雪莉, 于孟洋. 基于声压时间反转镜的水下目标被动定位技术[J]. 声学技术, 2010, **29**(2): 22-4227. ZHAO Longlong, DENG Wei, SHENG Xueli, YU Mengyang. Passive underwater positioning based on pressure time reversal mirror[J]. Technical Acoustics, 2010, **29**(2): 224-227.
- [10] 赵淑坤, 马力, 郭圣明. 改进的被动时间反转阵处理水下通信[J]. 声学技术, 2010, **29**(3): 248-252. ZHAO Shukun, MA Li, GUO Shengming. Improved passive time reversal array processing in underwater communication[J]. Technical Acoustics, 2010, **29**(3): 248-252.

• 简讯 •

《声学技术》编委会换届的决定

《声学技术》第2届编委会(2004-2010年)已经到期, 为了进一步办好《声学技术》, 中国科学院声学研究所东海研究站、同济大学声学研究所、上海市声学学会、中国船舶重工集团公司第726研究所四个主办单位, 于2011年1月7日召开了会议, 商讨并征得了有关专家的同意, 对第3届编委会的组成作出了以下几项决定:

- (1) 第3届编委会任期5年(2011-2015年);
 - (2) 聘请中国科学院声学研究所东海研究站张叔英研究员任主编;
 - (3) 聘请中国船舶重工集团公司第726研究所姚蓝研究员任执行主编;
 - (4) 聘请丁玉薇、王朔中、汤渭霖、胡长青、胡兵、钱梦霖、章奎生、梁志坚(LEUNG Chi Kin Randolph)任副主编
 - (5) 继续聘请冯绍松教授和王季卿教授任名誉主编;
- 编委会委员由主编、副主编商讨聘请。

《声学技术》编辑部