

## 三轴四元非典型声强向量阵对低频声源全空间定向的理论与实验研究

陈韶华 相敬林 石杰 韩鹏  
(西北工业大学航海学院 西安 710072)

**摘要:** 该文提出了应用 3 轴 4 元非典型声强向量阵在小尺度平台上对低频声源全空间定向的方法。该方法用四只传感器测量声强向量的 3 个正交分量, 根据 3 个分量的几何关系来解出目标的方位。文中基于声信号的空间互谱分析, 给出了声强向量阵的定向原理, 并系统分析了其定向误差, 包括有限差分误差、通道失配误差和环境噪声引起的误差。半消声室实验结果表明, 在校正系统误差后, 尺度为 0.1m 的非典型声强向量阵在各向同性噪声中的定向误差在 1° 左右, 证实了该方法是可行的。

**关键词:** 声源定向; 非典型声强向量阵; 误差分析

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)05-1045-05

## Theoretical and Experimental Exploration on Two-Dimensional DOA Estimation for Low Frequency Sound Source with Non-typical Vector Acoustic Intensity Array

Chen Shao-hua Xiang Jing-lin Shi Jie Han Peng  
(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A new method of two-dimensional DOA (Direction of Arrival) estimation for low frequency sound source with the non-typical vector acoustic intensity array of small size is proposed. This array consists of 4 sensors on the 3 orthogonal axes, so as to measure the 3 components of the vector acoustic intensity. The azimuth and pitch angles of the sound source can be estimated from the 3 intensity components. The estimation errors, including the finite difference approximation error (FDAE), the instrumentation channel mismatch error (ICME), and the error caused by ambient noise, are studied systematically. Experiments conducted in semi-anechoic chamber show that, after correcting the FDAE and ICME, the precision of DOA estimation in isotropic ambient noise is about 1°. Both theoretical analysis and experimental results validate the effectiveness of this method.

**Key words:** DOA (Direction of Arrival) estimation for sound sources; Non-typical vector sound intensity array; Error analysis

### 1 引言

声强向量阵是在小尺度平台上实现对低频声源定向的重要途径, 它通过 3 对中心重合且相互正交的传感器测量声强的 3 个分量, 进而解算出声源的方位。由于它避免了线列阵对于低频声源定向时需要庞大阵列的困难而受到国内外广泛关注<sup>[1-9]</sup>。典型的 3 轴 6 元声强向量阵(也称为三维声强探头或压差式矢量传感器)对于水中目标及低空声源的定向问题已得到研究, 但它难于在平台上布设, 因为至少有一个基元要安装在平台内部, 因此带来应用上的困难。

本文提出利用非典型的 3 轴 4 元声强向量阵对低频声源定向的方法, 4 个基元均安装在小尺度平台表面上, 避免了典型阵安装上的困难。另外, 4 基元阵较 6 基元阵减少了三分之一的基元, 减少了测量通道, 且没有利用虚元, 使得处

理算法和硬件均有简化, 更有利于实际应用。

### 2 非典型声强向量阵定向原理

声场中  $\mathbf{r}$  方向上的声强在频域与该方向上间距为  $d$  的两个相邻点的声压信号  $p_1(t), p_2(t)$  的互功率谱密度函数  $S_{p_1 p_2}(f)$  之间的关系为<sup>[1, 5]</sup>

$$I_r = \text{Im}[S_{p_1 p_2}(f)] / (2\pi f \rho d) \quad (1)$$

其中  $\rho$  是介质密度。

要实现三维空间中的声源目标的定向, 需要知道观测点处的 3 个互相垂直的声强分量。3 轴 4 元非典型声强向量阵如图 1 所示, 传感器  $p_1, p_2$  和  $p_3$  分别与  $p_0$  构成空间笛卡儿坐标系的  $x, y$  和  $z$  轴, 它们之间的间距都为  $d$ 。

假设目标信号满足远场平面波假设, 则在观测空间内的信号具有相同的幅度, 只是时延不同。如图 2 所示, 若目标信号入射俯仰角  $\varphi$  方位角  $\theta$ , 可得到  $x, y$  和  $z$  轴上接收信号的互功率谱分别为

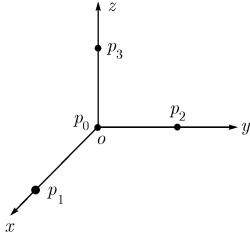


图 1 非典型声强向量阵示意图

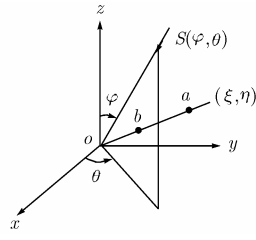


图 2 声源的空间位置图

$$S_{01}(f) = S(f) \exp\{jkd \sin \varphi \cos \theta\} \quad (2)$$

$$S_{02}(f) = S(f) \exp\{jkd \sin \varphi \sin \theta\} \quad (3)$$

$$S_{03}(f) = S(f) \exp\{jkd \cos \varphi\} \quad (4)$$

其中  $S(f)$  为接收信号的自功率谱密度函数。可以看出, 在远场条件下, 互谱的幅度是相同的, 不携带声源的方向信息。但在实验测量和实际应用中, 传感器和测量通道的增益失配会引起接收到的互谱分量的幅度差异, 进而引起定向误差。为消除此误差, 仅取互谱的相位信息, 令

$$\hat{S}_{01}(f) = S_{01}(f) / S(f) = \exp\{jkd \sin \varphi \cos \theta\} \quad (5)$$

$$\hat{S}_{02}(f) = S_{02}(f) / S(f) = \exp\{jkd \sin \varphi \sin \theta\} \quad (6)$$

$$\hat{S}_{03}(f) = S_{03}(f) / S(f) = \exp\{jkd \cos \varphi\} \quad (7)$$

将式(5)~式(7)分别代入式(1),  $kd \ll 1$  时, 对于单频线谱,  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴方向上线谱的声强分量分别近似为

$$\hat{I}_x \approx S(f) \sin \varphi \cos \theta / (\rho c) \quad (8)$$

$$\hat{I}_y \approx S(f) \sin \varphi \sin \theta / (\rho c) \quad (9)$$

$$\hat{I}_z \approx S(f) \cos \varphi / (\rho c) \quad (10)$$

用式(8)~式(10)可解算出声源的方位角  $\theta$  和俯仰角  $\varphi$ :

$$\theta = \tan^{-1}[\hat{I}_y / \hat{I}_x], \quad \varphi = \tan^{-1}[\sqrt{\hat{I}_x^2 + \hat{I}_y^2} / \hat{I}_z] \quad (11)$$

### 3 定向误差分析

互谱声强测量方法存在某些固有的误差。利用一对传感器测量空间两点的声压, 然后用互谱法来估计两点连线方向的声强, 引起了有限差分误差 (Finite Difference Approximation Error, FDAE), 传感器及相应测量通道频率响应不完全一致产生了通道失配误差 (Instrumentation Channel Mismatch Error, ICME), 这两种误差合称系统误差。声强测量的系统误差和环境噪声引起的随机误差引起了声源方位角和俯仰角的估计误差。

#### 3.1 有限差分误差

对非典型声强向量阵, 如图 3 所示, 利用  $p_0$  和  $p_1$  两点的声压通过互谱法估计  $p_0$  点在  $x$  轴方向上的声强度分量, 则估计值  $\hat{I}_x$  与该点声强的真实值  $I_x$  之间的关系为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\hat{I}_x}{I_x} = \frac{r^2 \sin[k(r - r_1)]}{rr_1 kd \cos \alpha} \quad (12)$$

其中  $k = 2\pi f / c$  是波数。由

$$r_1 = r \sqrt{1 + (d/r)^2 - 2(d/r) \cos \alpha} \quad (13)$$

并考虑到  $d \ll r$ ,  $r_1$  可近似为

$$r_1 \approx r - d \cos \alpha \quad (14)$$

故式(12)变为

$$\frac{\hat{I}_x}{I_x} = \frac{\sin(kd \cos \alpha)}{kd \cos \alpha} \quad (15)$$

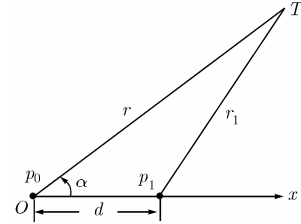


图 3 互谱法声强分量估计示意图

可见, 估计声强与真实声强的关系与声中心重合的 3 轴 6 元阵<sup>[5]</sup>是一致的。因此,  $d \ll r$  时, 3 轴 4 元阵声中心不重合不会带来原理上的除有限差分误差之外的误差。直观地说, 由于  $d \ll r$ ,  $p_0$  和  $p_1$  间隔很近, 这两点连线中点的声强与  $p_0$  点的声强的差别可忽略。

式(15)是对二维平面的结果, 对三维空间, 设目标声源的方位角和俯仰角分别为角  $\theta$  和  $\varphi$ , 则

$$\frac{\hat{I}_x}{I_x} = \frac{\sin(kd \sin \varphi \cos \theta)}{kd \sin \varphi \cos \theta}, \quad \frac{\hat{I}_y}{I_y} = \frac{\sin(kd \sin \varphi \sin \theta)}{kd \sin \varphi \sin \theta},$$

$$\frac{\hat{I}_z}{I_z} = \frac{\sin(kd \cos \varphi)}{kd \cos \varphi} \quad (16)$$

根据式(16), 可求得有限差分误差引起的方位角和俯仰角测量误差分别为

$$\Delta \theta = \frac{\partial \theta}{\partial I_x} \Delta I_x + \frac{\partial \theta}{\partial I_y} \Delta I_y$$

$$= \frac{\sin(kd \sin \varphi \sin \theta) \cos \theta - \sin(kd \sin \varphi \cos \theta) \sin \theta}{kd \sin \varphi} \quad (17)$$

$$\Delta \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial I_x} \Delta I_x + \frac{\partial \varphi}{\partial I_y} \Delta I_y + \frac{\partial \varphi}{\partial I_z} \Delta I_z$$

$$= \frac{\cos \varphi}{kd} [\cos \theta \sin(kd \sin \varphi \cos \theta) + \sin \theta \cdot \sin(kd \sin \varphi \sin \theta) - \tan \varphi \sin(kd \cos \varphi)] \quad (18)$$

#### 3.2 通道失配误差

通道失配误差包括增益失配误差和相位失配误差, 本文仅取互谱相位的方法已从原理上消除了增益失配误差。设  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  和  $p_3$  相应测量通道(包括传感器、测量和记录设备)的相位响应分别为  $\phi_0(f)$ ,  $\phi_1(f)$ ,  $\phi_2(f)$  和  $\phi_3(f)$ 。令

$$\Delta \phi_x(f) = \phi_1(f) - \phi_0(f), \quad \Delta \phi_y(f) = \phi_2(f) - \phi_0(f),$$

$$\Delta \phi_z(f) = \phi_3(f) - \phi_0(f) \quad (19)$$

当  $\Delta \phi_x$ ,  $\Delta \phi_y$  和  $\Delta \phi_z$  不为零时, 引起相位失配误差 (Instrumentation Phase Mismatch Error, IPME)。  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴的相位失配  $\Delta \phi_x$ ,  $\Delta \phi_y$  和  $\Delta \phi_z$  引起的方位角和俯仰角测量误差分别为

$$\Delta \theta_p = \frac{\partial \theta}{\partial \phi_x} \Delta \phi_x + \frac{\partial \theta}{\partial \phi_y} \Delta \phi_y$$

$$= \cos \theta \frac{\Delta \phi_y}{kd \sin \varphi} - \sin \theta \frac{\Delta \phi_x}{kd \sin \varphi} \quad (20)$$

$$\Delta \varphi_p = \frac{\partial \varphi}{\partial \phi_x} \Delta \phi_x + \frac{\partial \varphi}{\partial \phi_y} \Delta \phi_y + \frac{\partial \varphi}{\partial \phi_z} \Delta \phi_z$$

$$= \cos \varphi \cos \theta \frac{\Delta \phi_x}{kd} + \cos \varphi \sin \theta \frac{\Delta \phi_y}{kd} - \sin \varphi \frac{\Delta \phi_z}{kd} \quad (21)$$

### 3.3 环境噪声引起的定向误差

对于海洋环境噪声而言, 在远处行船噪声(1~数百Hz)与海面风成噪声(数百~5kHz)之间的过渡区域通常可视为各向同性噪声, 另外, 50kHz以上噪声场是各向同性的, 其它的频率上噪声场通常也包含一个各向同性成分<sup>[11]</sup>。因此, 研究各向同性空间均匀分布噪声场对于声强向量阵定向精度的影响是有实际意义的。

对于各向同性噪声, 如图 1 设置的  $x y z$  轴上传感器对接收噪声的互功率谱密度为<sup>[2,11]</sup>

$$N_{01}(f) = N_{02}(f) = N_{03}(f) = N(f) \sin(kd) / (kd) = N(f) \text{sinc}(kd) \quad (22)$$

其中  $N(f)$  是测量点噪声的自功率谱。分析表明, 各向同性噪声引起的方位角和俯仰角估计偏差均为 0, 估计方差为

$$\begin{aligned} \text{var}\{\hat{\theta}\} &= \left(\frac{\partial\theta}{\partial I_x}\right)^2 \text{var}\{\hat{I}_x\} + \left(\frac{\partial\theta}{\partial I_y}\right)^2 \text{var}\{\hat{I}_y\} + 2\left(\frac{\partial\theta}{\partial I_x} \frac{\partial\theta}{\partial I_y}\right) \cdot \text{cov}\{\hat{I}_x, \hat{I}_y\} \\ &= \frac{\gamma^2}{2n_d} \left[ \frac{\sin^4\theta}{\sin^2(kd \sin\varphi \sin\theta)} + \frac{\cos^4\theta}{\sin^2(kd \sin\varphi \cos\theta)} \right] \cdot [1 - \text{sinc}^2(kd)] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{var}\{\hat{\varphi}\} &= \left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_x}\right)^2 \text{var}\{\hat{I}_x\} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_y}\right)^2 \text{var}\{\hat{I}_y\} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_z}\right)^2 \text{var}\{\hat{I}_z\} + 2\left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_x} \frac{\partial\varphi}{\partial I_y}\right) \text{cov}\{\hat{I}_x, \hat{I}_y\} + 2\left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_x} \frac{\partial\varphi}{\partial I_z}\right) \cdot \text{cov}\{\hat{I}_x, \hat{I}_z\} + 2\left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_y} \frac{\partial\varphi}{\partial I_z}\right) \text{cov}\{\hat{I}_y, \hat{I}_z\} \\ &= \frac{\gamma^2 \cos^2\varphi}{2n_d} \frac{[1 - \text{sinc}^2(kd)]}{\sin^2(kd \cos\varphi)} \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $\gamma^2 = N^2(f) / S^2(f)$ ,  $S(f)$  是信号自功率谱,  $n_d \approx B_e T$ ,  $B_e$  是对应于频率分辨率的等效带宽,  $T$  是信号持续时间。

总的定向误差应是以上各项误差之和。从式(17), 式(18), 式(20), 式(21)可看出, 有限差分误差随着阵尺度的减小及测量信号频率的降低而减小, 相位失配误差随着阵尺度的减小及信号频率的降低而增大。在传声器对的间距一定时, 有限差分误差和相位失配误差分别决定了可测信号频率的上限和下限。但这两个系统误差有以上误差分析所揭示的规律, 理论上可通过补偿来完全消除。环境噪声引起的随机误差, 从式(23), 式(24)可看出, 可通过增加积累时间、提高信噪比等途径来减小。

## 4 仿真与实验分析

### 4.1 计算机仿真

线谱信号频率  $f=200\text{Hz}$ , 采样频率  $f_s=1000\text{Hz}$ , 3 个坐标轴上的阵元到原点阵元的间距即阵的 3 臂均为  $d=0.2\text{m}$ , 水中声速  $c=1500\text{m/s}$ 。为进行原理性验证, 未加入相位失配, 也未加入噪声。方位角和俯仰角的全空间定向误差如图 4 所示。可见其最大误差小于  $0.1^\circ$ , 此误差是由有限差分近似及 3 轴声中心不重合引起的。可见在信号满足远场假设且阵元间距

很小的情况下, 声中心不重合的影响是可以忽略的。

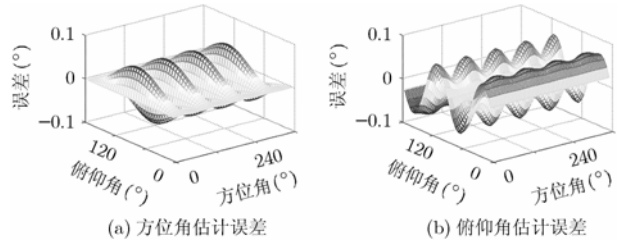


图 4

### 4.2 半消声室实验

在半消声室进行了各传声器通道的频率特性测量及声强向量阵定向实验, 在计算机上对采集的信号进行了处理。

4.2.1 频率特性的测量 通道失配误差校正的关键在于传声器及其测量通道频率特性的精确测量, 为此需要创造自由声场条件。由于半消声室的地面是不消声的, 我们为喇叭设计了一个专用发射器平台, 以形成低频自由声场条件, 消除多径干扰。平台外壳是光滑的木质棱锥体, 顶部与一个铁质圆柱体内切。当声波垂直向上发射时, 反射波将向四面八方散射, 对于平台正上方的传声器而言, 不会因未经消声的地面形成二次反射。喇叭放置于圆柱体顶部, 可避免发声时引起平台外壳振动。

实验的测量装置如图 5 所示, 其中  $M_r$  是 B&K2239 声级计, 用以提供参考信号,  $M_1$  是待测传声器。两路输出信号经 B&K公司的 NEXUS2692 适调放大器放大后, 通过屏蔽电缆输入 SONY公司的 SIR-1000W 多通道数字式磁带录音机采样记录。采集的信号可用专用接口卡传送给计算机, 在计算机上用 MATLAB 软件进行各种分析和处理。

实验中发射 200~800Hz 的单频正弦信号, 用互谱法计算传声器在相应频率上的相频响应。互谱法测量传声器频率响应的原理如下: 对于某一频率  $f$  的发射信号, 设传声器与标准传感器的接收信号序列分别为  $x(n), y(n)$ , 相应的 FFT 分别为  $X(k), Y(k)$ , 则它们的互功率谱为  $Z(k) = X^*(k)Y(k)$ 。设样本点数为  $N$ , 采样频率为  $f_s$ , 则线谱对应的数字频率为  $k_s = [Nf / f_s]$ , 其中  $[\ ]$  表示取整数。这样传声器在频率  $f$  上的相频响应为  $\phi_f = \tan^{-1} \{ \text{Im}[Z(k_s)] / \text{Re}[Z(k_s)] \}$ 。

实验中测量了构成声强向量阵所需的 4 只传声器相对于参考声级计的频率特性。图 6 显示了  $p_0p_1, p_0p_2, p_0p_3$  传声器对的相位失配  $\Delta\phi_x, \Delta\phi_y, \Delta\phi_z$ 。由于不满足相位失配为零的条件, 引起了声强向量阵的定向误差。

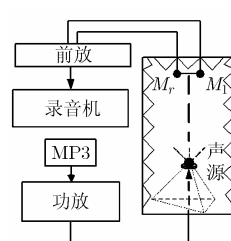


图 5 实验装置示意图

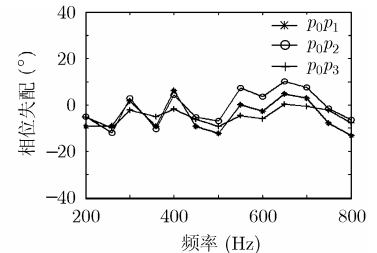


图 6 传声器对的相位配置

4.2.2 声强向量阵对声源的定向 实验中设定各传声器对的

间距为 10cm。支架固定在一个带有基座的竖直金属长杆上，喇叭放在地面，从设定的角度向声强向量阵发射声信号，测量记录设备同图 5。

先后测量了两个点源的方向，其中之一的方向为  $\varphi = 72.5^\circ$ ， $\theta = 16.0^\circ$ 。声源发射 200~800Hz 的单频正弦信号，步进 50Hz。处理时间 1s，未加噪声。声源俯仰角和方位角估计误差如图 7 所示。

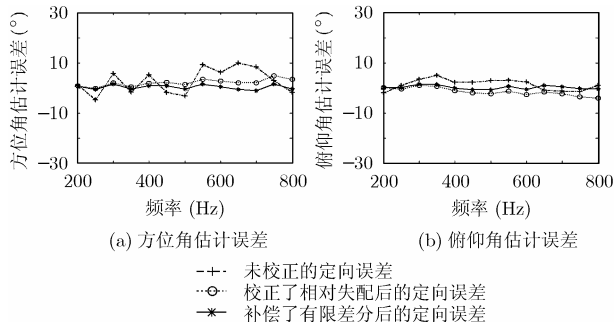


图 7

从图 7 看出，未校正的定向误差大约在  $10^\circ$  之内。应用图 6 测得的传声器的相位特性，用传递函数法校正所测得的互功率谱，重新计算俯仰角和方位角，可见误差有显著减小，表明传递函数法基本上消除了相位失配引起的定向误差。再由误差分析计算出有限差分误差并加以补偿，定向误差在高频端有明显改善，而在低频端改善较小，这是因为频率越高，有限差分误差越大的缘故。最终的定向误差基本上在  $1^\circ$  左右。另一点源的方向为  $\varphi = 72.5^\circ$ ， $\theta = 41.0^\circ$ ，有类似的实验结果。

理论上，在不加噪声的条件下，系统误差可以通过校正而完全消除。但实际上，由于地面和器材的反射不可能完全消除，传声器安装和角度测量也会存在一定的误差，使得相位失配误差不能完全消除。如果采用更先进的实验设施(比如全消声室)，使得频率特性及角度的测量更为精确，有望进一步减小此误差。

4.2.3 环境噪声对定向结果的影响 图 8 是对 280Hz 线谱信号在不同信噪比下 100 次独立的声源波达方向估计的分布图，加入数值模拟产生的各向同性噪声<sup>[12]</sup>，信噪比分别为 -15，-10，-5dB，处理时间 1s。该频率点未加噪声时的定向误差为  $(\Delta\theta, \Delta\varphi) = (-0.04^\circ, 0.09^\circ)$ 。图中横轴和纵轴分别表示方位角和俯仰角，每个图的右下角标出了这 100 次估计的平均值及偏差。从图中可以看出，随着信噪比的提高，估计值散布区域变小，估计均值亦愈接近声源方向的真实值

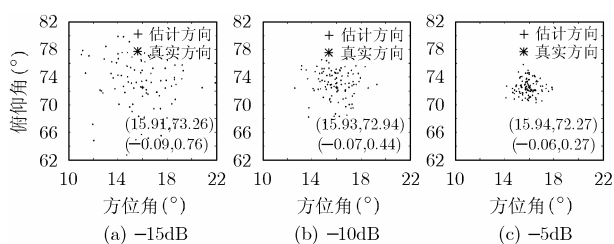


图 8 280Hz 线谱在不同信噪比下的方向估计分布图

( $16.0^\circ, 72.5^\circ$ )，说明估计的方差和偏差减小。对于同一信噪比，估计均值比大部分单个估计值更接近声源方向真实值，说明多次累积平均可以提高估计精度。

## 5 结束语

(1)非典型 3 轴 4 元声强向量阵可在 0.1m 的小尺度平台上实现对低频声源的定向，且有比较满意的精度，本文实验条件下误差约在  $1^\circ$  左右。

(2)当  $d \ll r$  且  $kd \ll 1$  时，3 轴 4 元阵的声中心不重合的影响可以忽略。

(3)有限差分误差随着阵尺度的减小及信号频率的降低而减小。如果设定一个允许的误差限，且已确定阵的尺度，则所能处理的频率上限被确定。对于较大有限差分误差，也可通过补偿来减小。

(4)相位失配误差与有限差分误差相反，它随着阵尺度的减小及信号频率的降低而增大，但可以通过传递函数法来校正。

(5)各向同性环境噪声引起的定向误差偏差为零，方差可通过多次积累平均来减小。

## 参考文献

- [1] Hickling R and Wei W. Use of pitch-azimuth plots in determining the direction of a noise source in water with a vector sound intensity probe. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, 97(2): 856-866.
- [2] Hutt D L and Hines P C, et al. Measurement of underwater sound intensity vector. Proc. OCEANS '99 MTS/IEEE, Seattle, WA, 1999, vol.2: 717-722.
- [3] Hutt D L, Hines P C, and Young V. Measurement of underwater sound intensity and determination of source bearing angle. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2001, 110(5): 2740.
- [4] Young V W and Hines P C, et al. Practical application of a tri-axial intensity array. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003, 114(4): 2427.
- [5] 刘勋. 体积目标的被动声定向方法和尺度估计研究.[博士论文]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- [6] 刘勋, 相敬林等. 基于声强度向量法的体积目标被动跟踪与尺度估计. *声学学报*, 2001, 26(1): 41-50.
- [7] 刘勋, 相敬林等. 基于声强向量法的体积目标定向和缩比实验研究. *电子与信息学报*, 2002, 24(3): 347-353.
- [8] Liu Xun and Xiang Jing-lin, et al. Study on bearing and scaledown experiment of volume target based on acoustic intensity vector. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(3): 347-353.
- [8] 刘勋, 相敬林等. 基于声强向量法和声压梯度法的水中目标定向. *兵工学报*, 2001, 22(1): 90-94.
- [8] Liu Xun and Xiang Jing-lin, et al. Determination of bearings of underwater objects based on acoustic intensity and

- acoustic pressure gradient. *Acta Armamentariä*, 2001, 22(1): 90-94.
- [9] 陈华伟, 赵浚渭. 基于矢量传感器复声强测量的低空目标二维波达方向估计. *声学学报*, 2004, 29(3): 277-282.
- [10] Thompson J K and Tree D R. Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 75(2): 229-238.
- [11] Burdic W S. *Underwater Acoustic System Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1991, chap. 10.
- [12] 鄢社峰, 马远良等. 一种海洋宽带噪声场数值模拟方法. *声学技术*, 2003, 22(1): 30-32.
- Yan She-feng and Ma Yuan-liang, *et al.*. A numerical method for simulating broadband undersea noise field for hydrophone array. *Technical Acoustics*, 2003, 22(1): 30-32.
- 陈韶华: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为水声及通信信号处理等.
- 相敬林: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理与水声通信等.
- 石 杰: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为水声及通信信号处理等.
- 韩 鹏: 男, 1972 年生, 讲师, 在职博士生, 研究方向为数字信号处理等.