

# 基于几何相移模型的双线列阵左右舷分辨技术研究

何心怡<sup>1,2</sup> 蒋兴舟<sup>1</sup> 张春华<sup>2</sup>

(1 海军工程大学 武汉 430033)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100080)

2002 年 10 月 16 日收到

**摘要** 针对双线列阵克服左右舷模糊问题, 将双线列阵认为是由两两阵元为一组的偶极子构成的单线列阵, 利用几何相移模型对目标进行左右舷分辨, 经过理论分析、仿真实验和湖试实验, 指出了几何相移模型不仅能解决单频情况下的左右舷模糊问题, 而且还能解决信号带宽不太宽情况下(究竟能到多大相对带宽, 取决于所设定的左右舷分辨增益门限)的左右舷模糊问题。该方法经湖试实验得到了很好的验证: 在信噪比为 5dB 时, 采用该方法处理时, 左右舷分辨差超过 7dB。在本文设定的高信噪比条件下, 证明了几何相移模型的双线列阵左右舷分辨技术是有效的、可行的。

**关键词** 双线阵, 几何相移模型, 单频, 宽带

## A port/starboard discrimination technology by twin-line arrays based on the model of geometric phase shifting

HE Xin-Yi<sup>1,2</sup> JIANG Xing-Zhou<sup>1</sup> ZHANG Chun-Hua<sup>2</sup>

(1 Navy Engineering University, Wuhan 430033)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** To overcome the twin-line arrays port/starboard blur problem, the twin-line array can be treated as the single-line array consisting of many dipoles, each of which is composed of two hydrophones. Using the model of geometric phase shifting to distinguish the port/starboard of the target, theoretical analysis, simulations and lake experiment indicate that the model of geometric phase shifting not only can solve the problem of port/starboard blur problem under the condition of single frequency, but also can solve the port/starboard blur problem when frequency bandwidth is limited (the value of the bandwidth depends on the gain threshold we set for the port/starboard discrimination). This method is proved by lake experiment: when the SNR is 5dB, the port/starboard discrimination difference value on using this technology is over 7dB. So the twin-line arrays port/starboard discrimination technology based on the model of geometric phase shifting is shown to be effective and practical under conditions of high SNR.

**Key words** Twin-line arrays, The model of geometric phase shifting, Single frequency, Wide band

## 1 引言

双线列阵与普通拖曳线列阵一样,存在着左右舷模糊问题,这是拖曳线列阵声纳必须要解决的一个关键问题。

本文将双线阵认为是由两两阵元为一组的偶极子构成的单根线列阵,运用几何相移的方法实现双线列阵的左右舷分辨,经过理论推导分析、仿真实验和湖试实验,指出,基于几何相移模型的双线阵左右舷分辨技术不仅能解决单频情况下的左右舷模糊问题,还能解决信号带宽不太宽情况下(究竟能到多大相对带宽,取决于所设定的左右舷分辨增益门限)的左右舷模糊问题。此外,本文的部分结论也可扩展到三元水听器组:即基于几何相移模型的三元水听器组也可在带宽不太大时完成对目标的左右舷分辨。

## 2 双线列阵的坐标系建立

由双线列阵构成的拖曳线列阵声纳的结构示意图如图 1 所示,它的基阵由线列阵 1 和线列阵 2 构成,每根线列阵都由无指向性的阵元组成,通过中性浮力拖缆,拖曳于水面舰艇的尾部。

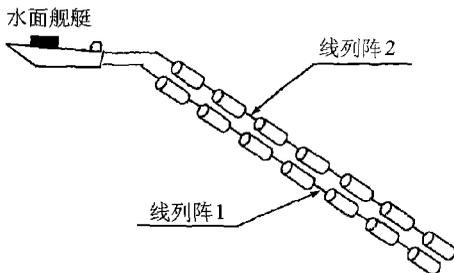


图 1 双线列阵结构示意图

假设每根线列阵均由  $M$  个阵元组成,根

据离水面舰艇的远近依次编号为  $(L_1, L_2, \dots, L_M)$  和  $(R_1, R_2, \dots, R_M)$ , 其中  $L$  标识着左舷的线列阵 1 的阵元,  $R$  标识着右舷的线列阵 2 的阵元, 这样, 可以把双线列阵看作是由  $(L_1, R_1), (L_2, R_2), \dots, (L_M, R_M)$   $M$  对偶极子构成的单根线列阵, 相邻两个偶极子的间距为  $d$ , 偶极子的两个阵元的间距为  $l$ 。建立坐标系如图 2: 坐标中心  $O$  点位于第一对偶极子  $L_1$  和  $R_1$  连线的中心;  $x$  轴指向水面舰艇,  $M$  对偶极子构成的拖线阵的轴线(也即虚拟的单根线列阵的轴线)恰位于负  $x$  轴上;  $y$  轴正向指向本舰左舷法线方向, 负向指向本舰右舷法线方向;  $z$  轴指向海面; 接收到的远场单位方向矢量  $u = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ , 方位角  $\phi$  和仰角  $\theta$  分别是  $x$  轴正向到矢量  $u$  在  $xoy$  平面上投影的夹角和  $z$  轴正向到  $u$  的夹角; 空间处理的期望信号的方向用单位方向矢量  $u_0 = (\sin \theta_0 \cos \phi_0, \sin \theta_0 \sin \phi_0, \cos \theta_0)$  表示, 相应的方位角为  $\phi_0$ 、仰角为  $\theta_0$ 。并且规定这些角度顺时针为正, 逆时针为负。

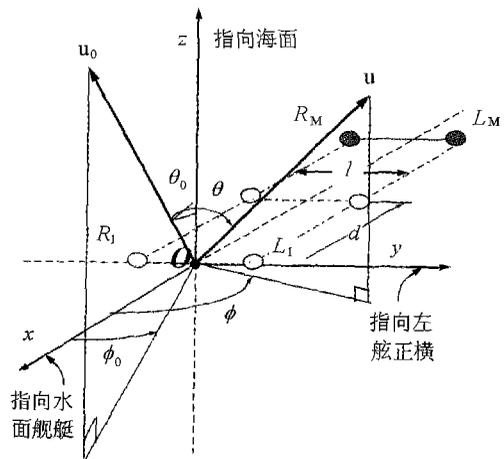


图 2 双线列阵在三维直角坐标系中的示意图

因此, 研究双线列阵左右舷分辨技术, 目的

就是经过一定的信号处理方法,使得每个偶极子具有心形指向性,那么,根据布里奇(Bridge)乘积定理,即可使虚拟单根线列阵(即双线列阵)具有垂直指向性,能够分辨目标所处的左右舷。

### 3 在双拖线阵中运用几何相移模型实现左右舷分辨

以1号偶极子为例,在三维直角坐标系中重新画出 $L_1$ 和 $R_1$ ,如图3所示。

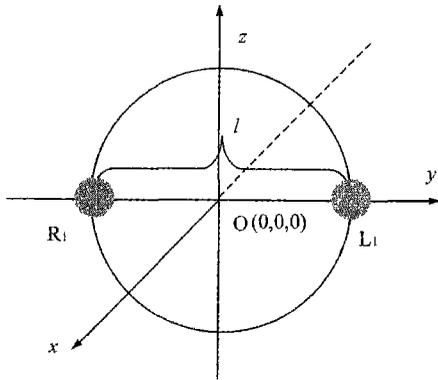


图3 偶极子示意图

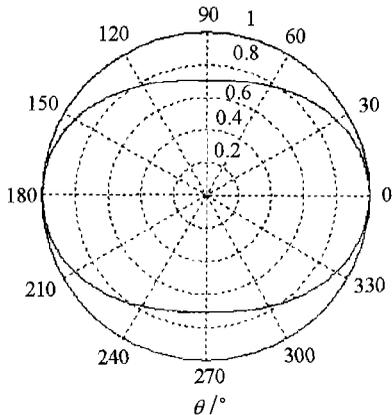


图4 偶极子的自然垂直指向性

两阵元的位置矢量可表示为 $L_1 = (0, \frac{l}{2}, 0)$ 和 $R_1 = (0, -\frac{l}{2}, 0)$ ,将偶极子看作一个小

基阵。若对偶极子进行常规波束形成处理时,其指向性函数如(1)式所示,也可参看图4,它并不具备左右舷分辨能力。

$$\begin{aligned}
 D(f, u) &= D(f, \theta, \phi) \\
 &= |\exp(jkL_1 \cdot u) + \exp(jkR_1 \cdot u)| \\
 &= \left| \exp\left(jk\left(0, \frac{l}{2}, 0\right) \cdot (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)\right) + \right. \\
 &= \left. \exp\left(jk\left(0, -\frac{l}{2}, 0\right) \cdot (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)\right) \right| \\
 &= 2 \cos\left(k \frac{l}{2} \sin \theta \sin \phi\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

当接收信号是单频时,为实现对目标的左右舷分辨,可采用类似于三元水听器组的几何相移技术(也称几何相移模型)进行如下处理<sup>[1]</sup>:对 $L_1$ 和 $R_1$ 的接收信号移相相加,分别形成左右波束:左波束对 $L_1$ 的信号移相 $-\pi l/\lambda$ ,对 $R_1$ 的信号移相 $\pi l/\lambda$ ;右波束对 $R_1$ 的信号移相 $-\pi l/\lambda$ ,对 $L_1$ 的信号移相 $\pi l/\lambda$ 。这样,当目标出现在左舷法线方向时,左波束输出最大,右波束输出最小;当目标出现在右舷法线方向时,左波束输出最小,右波束输出最大。可写出左右波束的指向性函数为:

$$\begin{aligned}
 D_L(f, u) &= D_L(f, \theta, \phi) \\
 &= |\exp(jkL_1 \cdot u) \exp(-j\pi l/\lambda) \\
 &+ \exp(jkR_1 \cdot u) \exp(j\pi l/\lambda)| \\
 &= 2 \cos\left(k \frac{l}{2} \sin \theta \sin \phi - l\pi/\lambda\right) \\
 &= 2 \cos\left[\frac{l\pi}{\lambda}(\sin \theta \sin \phi - 1)\right] \quad (2A)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_R(f, u) &= D_R(f, \theta, \phi) \\
 &= |\exp(jkL_1 \cdot u) \exp(j\pi l/\lambda) \\
 &+ \exp(jkR_1 \cdot u) \exp(-j\pi l/\lambda)| \\
 &= 2 \cos\left(k \frac{l}{2} \sin \theta \sin \phi + l\pi/\lambda\right) \\
 &= 2 \cos\left[\frac{l\pi}{\lambda}(\sin \theta \sin \phi + 1)\right] \quad (2B)
 \end{aligned}$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $c$ 为声速, $\lambda = c/f$ 为

声波波长。

类似地，若束控方向的仰角为  $\theta$ ，则相应的移相改为  $\pm(\sin \theta)\pi l/\lambda$ 。

定义左右舷分辨增益：

$$G = \frac{D_L\left(f, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)}{D_L\left(f, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)} = \frac{D_R\left(f, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)}{D_R\left(f, \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{1}{\cos(2\pi l/\lambda)} \quad (3)$$

由(3)式可计算在不同的  $l/\lambda$  之比时，左右舷分辨增益如图 5 所示，横坐标表示  $l/\lambda$  比值，纵坐标表示左右舷分辨增益 (dB) 可以看出，增益的极大值点都处在  $l = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} \cdot n, n = 0, 1, 2, \dots$ 。

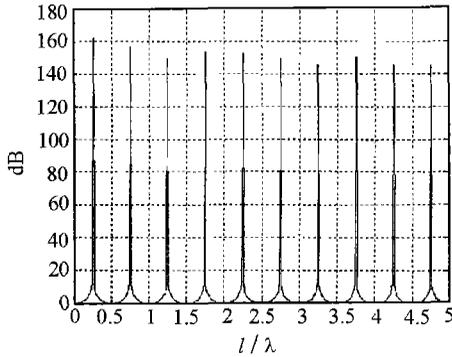


图 5 不同的  $l/\lambda$  之比时的左右舷分辨增益

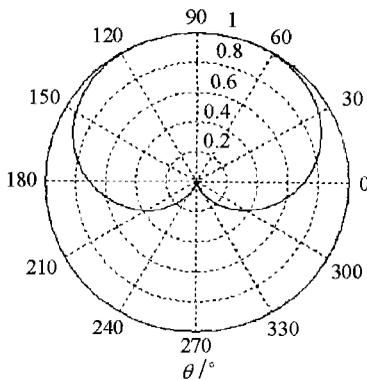


图 6  $l = 0.25\lambda$  时的右波束垂直指向性图

图 6 为  $l = 0.25\lambda$  时的右波束垂直指向性图。

注意到：当  $l > 0.5\lambda$  时，指向性函数会出

现多值性。如  $l = 0.75\lambda$  时，图 7 为其右波束垂直指向性函数，此时已不能分辨目标左右舷，而且还会出现误判。因此，在实际应用时，要保证  $l \leq 0.5\lambda$ 。

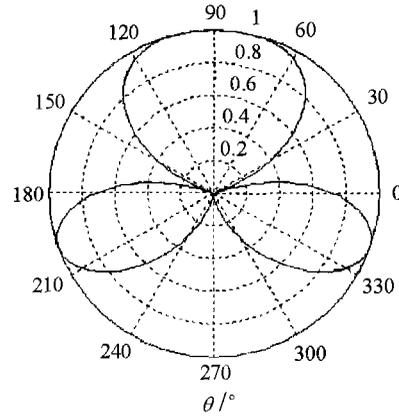


图 7  $l = 0.75\lambda$  时的右波束垂直指向性函数

此外，当频率与预先设定频率有偏差时，则左右舷分辨性能下降。假定设定频率为 1kHz， $l = 0.25\lambda = 0.375m$  时，几何相移模型的左右舷分辨增益与频率的关系如图 8 所示，横轴为频率，单位是 Hz；纵轴是左右舷分辨增益，单位是 dB。可看出，频率偏差越大，左右舷分辨增益下降越多。

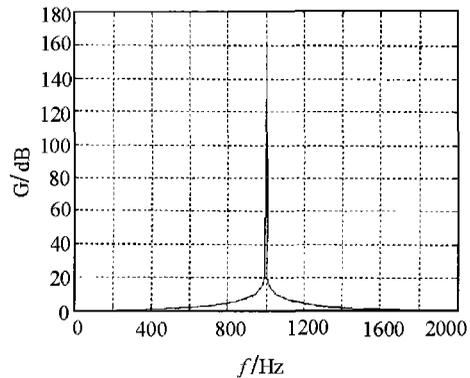


图 8 左右舷分辨增益与频率的曲线图

仍以图 8 中的设定条件，假设此时的接收信号频率为 500Hz，经计算得出此时理想情况下的（也即信噪比为无穷大）右波束垂直指向性如图 9 所示，这说明了：当频率与预先设定

频率偏差较大时，几何相移模型失效。

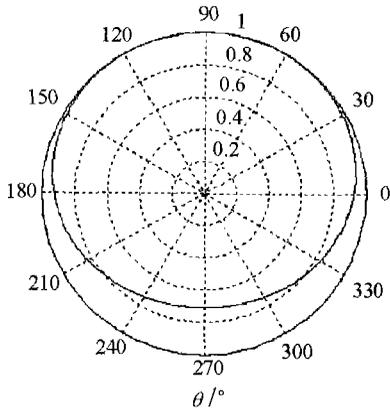


图 9 500Hz 时的右波束垂直指向性图

#### 4 几何相移模型在宽带情况下的扩展

从上节分析中可知，几何相移模型对于单频情况下的左右舷分辨是有效的，但许多应用场合往往是宽带情况；而国内外前人在三元水听器中所做的研究都没有讨论过几何相移模型在宽带下的适用性问题 [1~3]。因此，本节将进一步讨论几何相移模型在宽带情况下的应用。

为方便说明，设接收宽带信号为线性调频信号，以水平角  $\phi = \pi/2$ 、方位角  $\theta$  入射，阵元  $L_1$  接收到的信号可表示为：

$$u_L(t) = \exp \left[ j2\pi \left( f_0 t + \frac{1}{2} N^2 \right) \right] \quad (4)$$

式中： $N$  是线性调频指数，则阵元  $R_1$  接收到的信号可写为：

$$u_R(t) = \text{ifft}(\text{fft}(u_L(t)) \cdot \exp(-j2\pi f l/c)) \quad (5)$$

那么，可写出采用几何相移处理后的左右波束指向性函数为：

$$\begin{aligned} D_L(f, u) &= D_L(f, \theta, \phi) \\ &= \text{NOM}(|u_L(t) \exp(-j\pi l/\lambda) \\ &\quad + u_R(t) \exp(j\pi l/\lambda)|) \end{aligned} \quad (6A)$$

$$D_R(f, u) = D_R(f, \theta, \phi)$$

$$\begin{aligned} &= \text{NOM}(|u_L(t) \exp(j\pi l/\lambda) \\ &\quad + u_R(t) \exp(-j\pi l/\lambda)|) \end{aligned} \quad (6B)$$

仍如 (3) 式定义左右舷分辨增益，图 10 是左右舷分辨增益与信号相对带宽曲线图。从图中可知，随着信号相对带宽的增加，左右舷分辨增益总体趋势是不断下降，但只要信号相对带宽不太宽，基于几何相移模型的双线列阵左右舷分辨技术还是可以采用的，这关键在于选取的左右舷分辨增益门限。若以左右舷分辨增益 8dB 为门限，则只要信号相对带宽不超过 60% 都可以采用。

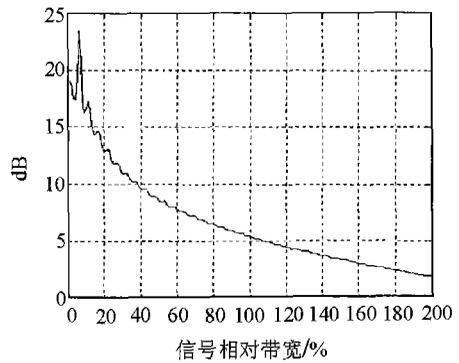


图 10 左右舷分辨增益与信号相对带宽曲线图

当偶极子的两个阵元间距为 0.375m 时，图 11 和图 12 分别是发射中心频率为 1kHz，相

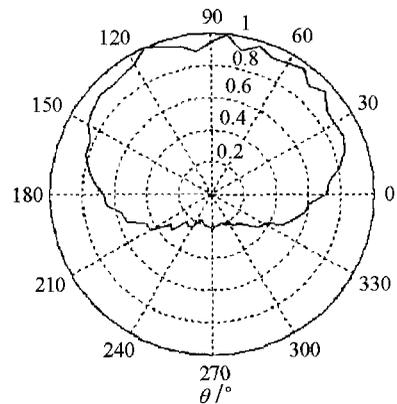


图 11 相对带宽为 50% 时的右波束垂直指向性图

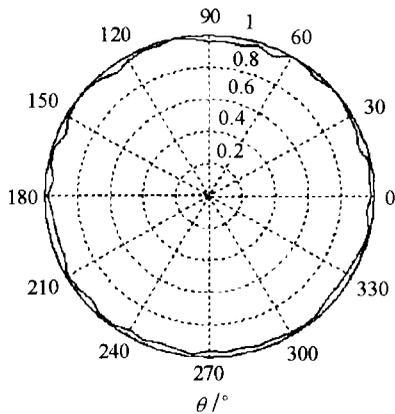


图 12 相对带宽为 150% 时的右波束垂直指向性图

对带宽分别为  $\Delta f/f_0 = 50\%$  ( $\Delta f = 500\text{Hz}$ ) 和  $\Delta f/f_0 = 150\%$  ( $\Delta f = 1500\text{Hz}$ ) 的高斯白噪声在信噪比为 3dB 时的右波束垂直指向性图。能看出相对带宽为 50% 时, 几何相移模型还能有效地分辨目标左右舷; 而相对带宽为 150% 时, 几何相移模型已无法分辨目标左右舷。

## 5 湖试实验

2002 年 7 月, 在浙江千岛湖鹿岛附近湖面进行了双线阵左右舷分辨实验。整个实验方案如图 13 所示: 双线列间距 0.5m (对应的中心频率是 750Hz), 声速梯度呈弱负梯度。将双线阵水平固定于实验船 1 的水下 8m 处, 而距该实验船左舷 0.29 海里处的实验船 2 水下 5m 处吊放一个发射换能器, 发射中心频率为 1000Hz、带宽为 200Hz、脉宽为 200ms, 周期为 4 秒的线

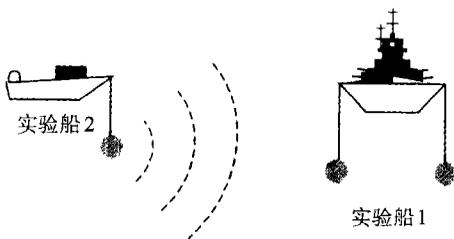


图 13 实验方案

性调频波, 信号的入射方向在双线列阵的正横方向附近。双线列阵附近的信噪比大约为 5dB, 采样频率为 12000Hz, 现场实验主要是采集数据, 然后利用计算机进行后续数据处理。

图 14 和图 15 分别是湖试数据按照常规波束形成和经过本文方法处理后的左右波束输出图, 从两图对比中可看出: 基于几何相移模型的双线列阵左右舷分辨技术的左右舷分辨差可达 7dB 以上。

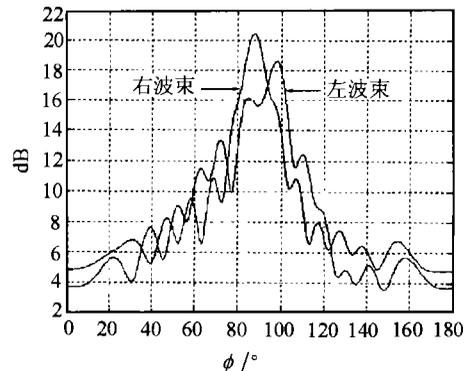


图 14 常规波束形成的左右波束输出图

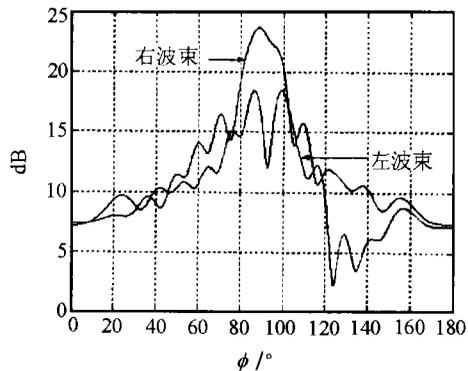


图 15 经过本文方法处理后的左右波束输出图

## 6 结论

将双线列阵看作由偶极子构成的单根线列阵, 采用几何相移模型的双线阵左右舷分辨技术, 可通过简单的几何相移, 形成左右波束对

目标进行左右舷分辨。该方法对单频和信号相对带宽不太大的宽带情况均有效, 而如果频率与预先设定频率偏差太大或信号相对带宽太大时, 则左右舷分辨性能急剧下降, 无法使用。

若要将该方法实际应用, 必须保证  $l < 0.5\lambda$ , 最佳的间距是  $l = 0.25\lambda$ , 这样既能有较大的左右舷分辨增益, 指向性函数又不会出现多值区间。为提高处理增益, 可在波束形成前, 将接收信号进行带通滤波。

此外, 本文的部分结论也可扩展到三元水听器组: 基于几何相移模型的三元水听器组也

(上接第 14 页)

振”是复合振动系统中存在的一种普遍现象。

### 参 考 文 献

- 1 范国良, 应崇福, 林仲茂等. 应用声学, 1982, 1(1):2~7.
- 2 应崇福, 范国良. 应用声学, 2002, 21(1):19~25.
- 3 马玉英, 丁大成. 物理学报, 1987, 36(2):208~215.
- 4 林书玉, 张福成. 声学学报, 1992, 17(6):251~255.

(上接第 25 页)

### 参 考 文 献

- 1 Taisuke Itoh, Kazuya, Fumitada. ICASSP, 2002, 389~392.
- 2 Morris R W, Clements M A. The 2nd Int. Workshop MAVEBA, 2001.
- 3 Higashikawa M, Nakai K et al. J. of Voice, 1996, 10:155~158.
- 4 David J M Robinson, Malcolm J Hawksford. The 107th Conference of the Audio Engineering Society, New York, September 1999.
- 5 Cosi P, Pasquin S et al. ICSLP'98 Proceedings, Page

(上接第 48 页)

### 参 考 文 献

- 1 何祚镛著. 结构振动与声辐射, 第 1 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.
- 2 郑士杰, 袁文俊, 缪荣兴等编著. 水声计量测试技

可在带宽不太大时完成对目标的左右舷分辨。

### 参 考 文 献

- 1 Jean Bertheas, Gilles Moresco, Philippe Dufourco. Linear hydrophonic antenna and electronic device to remove right/left ambiguity, associated with the antenna. United States Patent, Patent Number: 5058082, Oct.15, 1991.
- 2 Doisy Y. Port-starboard discrimination performances on actived towed array systems. UDT95, France, 125~129.
- 3 杜选民, 朱代柱, 赵荣荣等. 声学学报, 2000, 25(5):395~402.
- 4 周光平, 鲍善惠, 程存第. 应用声学, 1994, 13(6):39~42.
- 5 鲍善惠. 应用声学, 1998, 17(4):6~10.
- 6 丁大成, 马玉英. 陕西师大学报, 1985, 2(2):23~25.
- 7 Fan Guoliang, Zhang Weixian. Proc International Conference on Ultrasonic Technology, Toyohashi, 1987. 323~328.
- 8 赵继, 王立江, 孟继安. 声学学报, 1992, 17(1):22~29.
- 9 赵波, 何定东. 机械工艺师, 1998, (6):4~6.
- 10 林仲茂著. 超声变幅杆的原理和设计. 北京: 科学出版社, 1987.
- 11 李鸣华. 计算机与现代化, 2000, 67:9~13.
- 12 戴明扬, 余凯等. 应用声学, 2001, 19(2):121~126.

(NA), 1053.

- 6 Yang Xiaowei, Wang Kuansan et al. IEEE Trans. on Information Theory, March 1992, 38(2):824~839.
- 7 赵鹤鸣, 周旭东. 电子科学学刊, 1994, 16(5):513~517.
- 8 Scharf B. Bands C. in Tobias J V (cd.). New York: Academic Press, 1970. 159~202.
- 9 杨行峻, 迟惠生等. 语音信号数字处理. 北京: 电子工业出版社, 1995. 4~33.
- 10 Doh-suk Kim, Soo-Young Lee, Rhee M Kil. IEEE Trans. Speech Audio Proc., 1999, 7(1):55~69.
- 11 李鸣华. 计算机与现代化, 2000, 67:9~13.
- 12 戴明扬, 余凯等. 应用声学, 2001, 19(2):121~126.

术, 第 1 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995.

- 3 Read B E, Dean G D. 聚合物和复合材料的动态性能测试, 第 1 版. 上海: 上海科技文献出版社, 1986.
- 4 缪荣兴, 官继祥编. 水声无源材料技术概要, 第 1 版. 杭州: 浙江大学出版社, 1995.
- 5 王荣津编. 水声材料手册, 第 1 版. 北京: 科学出版社, 1983.