

用正四棱锥形阵对声目标定位研究

孙书学¹ 顾晓辉^{1†} 孙晓霞²

(1 南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

(2 河南省产品质量监督检验所 郑州 431000)

摘要 文章结合声阵列在智能雷系统中的应用,提出了用立体五元声阵列对声目标进行定位,将智能雷中用于预警的传感器也参与定位阵列中来,这样就不增加传感器的条件下实现了立体阵列对声目标的定位。文章推导了定位公式和误差公式,并对结果进行仿真分析,与平面阵相比取得了较好的效果。不但提高了精度还降低了声阵列的盲区。

关键词 被动声定位, 声阵列, 正四棱锥阵, 误差分析

Study on localization of acoustic target with a rectangular pyramid array

SUN Shu-Xue¹ GU Xiao-Hui¹ SUN Xiao-Xia²

(1 Nanjing University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering, Nanjing 210094)

(2 Henan Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Zhengzhou 431000)

Abstract Associated with the application of acoustic array in a smart mine system this paper presents, for acoustic target localization, the use of a pyramid array consisting of five sensors. The method takes the sensor which is used for prewarning as a part of the location array, such that target location is achieved without increasing the number of sensors in the smart mine system. The paper deduces the location formulas and the fallibility formulas, and then by simulation shows that the method has a good performance compared with a plane array, not only improves location accuracy but also decreases the blind space.

Key words Passive acoustic location, Acoustic array, Rectangular pyramid array, Error analysis

2004-10-19 收稿; 2005-05-19 定稿

作者简介: 孙书学 (1979-), 男, 黑龙江省肇东市人, 博士研究生, 主要从事声探测与定位技术研究。

顾晓辉 (1964-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。孙晓霞 (1974-), 女, 工程师, 硕士。

† 通讯联系人 Email: gxiaohui@mail.njust.edu.cn

1 引言

为智能雷系统设计一个结构简单、性能优良、成本低廉的能够被动识别、定位、跟踪目标的声阵列,使其全天候可靠地工作是一项十分重要的任务。目前被动声定位的方法主要是用几个声传感器排列成一定阵形,测量出声信号到达各个传感器的时间差,再根据几何关系计算出声目标所在位置。根据这一思想设计的声阵列由最初的直线阵、圆弧阵、等边三角形阵^[1]已发展到现在的正正方形阵^[2]、双直角三角形阵^[3]和平面圆阵^[4]。直线阵、圆弧阵和三角形阵结构简单、运算快捷,但定位误差较大,且对三维空间目标定位效果较差。为了对几百米内的目标定位,有人提出了正正方形阵,此法对三维空间定向精度较高,但对稍远一点的目标定距误差很大,因此有人提出了主从声阵列,该法需要主从阵之间的距离较大,显然不适合智能雷系统,且需要传感器数量较多,在文献[3]中提出了双直角三角形阵,但此法仍然有较大的定距误差,且定位误差大的区域较多,这是平面阵的基本特点,因此,本文提出了正四棱锥阵定位,将原来用于智能雷中预警的传感器参与定位阵列中来,这样就形成了空间正四棱锥阵,通过仿真证明,该阵能有效对近距离目标定位,尤其是明显减少了误差大的区域,适用于智能雷系统。

2 正四棱锥形阵定位原理

正四棱锥形阵原理如图 1 所示, s_1, s_2, s_3, s_4 四个传声器排成正正方形,以正方形中心 O 为原点建立笛卡尔坐标系,传声器 s_0 位于 z 轴上,其坐标为 $(0, 0, h)$, s_1, s_2, s_3, s_4 距原点距离为 a 。

设目标 P 的坐标为 $P(x, y, z)$, 定义坐标原点到目标的连线 OP 在 OXY 平面的投影 OP_1 与 X 轴的夹角 α 为探测到目标方位角, OP 与 OZ 轴的夹角 β 为探测到目标的仰角。用

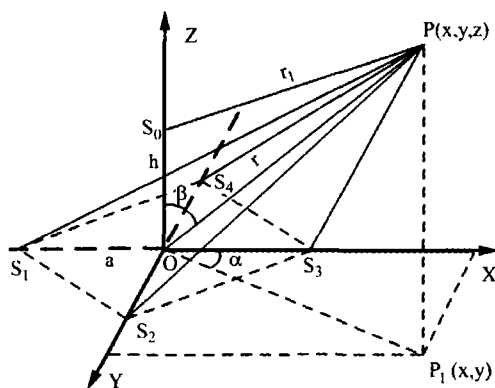


图 1 正四棱锥阵原理图

τ_{0i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 来表示目标的声信号到达传声器 i 和 s_0 的时差,用 d_{0i} 来表示目标的声信号到达传声器 i 和 s_0 的距离差,用 c 表示声速,因此有:

$$d_{0i} = PS_i - PS_0 = \tau_{0i} \cdot c, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

综合参考已有的各种平面阵及立体阵列推导原理^[1~5,8],根据模型的几何关系可得如下方程:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ x^2 + y^2 + (z - h)^2 = r_1^2 \\ (x - a)^2 + y^2 + z^2 = (r_1 + d_{01})^2 \\ x^2 + (y - a)^2 + z^2 = (r_1 + d_{02})^2 \\ (x + a)^2 + y^2 + z^2 = (r_1 + d_{03})^2 \\ x^2 + (y + a)^2 + z^2 = (r_1 + d_{04})^2 \\ \begin{cases} x = r \sin \beta \cos \alpha \\ y = r \sin \beta \sin \alpha \\ z = r \cos \beta \end{cases} \quad \begin{matrix} 0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ, \\ 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ; \end{matrix} \end{cases}$$

其中 r 为目标与原点之间的距离, r_1 为目标与 s_0 之间的距离。解方程得:

$$\begin{aligned} x &= \frac{2r_1(d_{03} - d_{01}) + d_{03}^2 - d_{01}^2}{4a} \\ y &= \frac{2r_1(d_{04} - d_{02}) + d_{04}^2 - d_{02}^2}{4a} \\ z &= \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} + h \end{aligned}$$

$$r_1 = \frac{d_{02}^2 - d_{01}^2 + d_{04}^2 - d_{03}^2}{2(d_{01} - d_{02} + d_{03} - d_{04})} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{r_1^2 + 2hz - h^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tan \alpha = \frac{y}{x} &= \frac{d_{04} - d_{02}}{d_{03} - d_{01}} \\ &\cdot \left(1 + \frac{d_{04} + d_{02} - d_{03} - d_{01}}{2r_1 + d_{03} + d_{01}}\right) \end{aligned}$$

智能雷系统所用声阵列出于隐蔽性及灵活性考虑,各传感器之间距离不能过大,一般每个传感器距智能雷中心不超过两米,本文所采用阵列在实际应用时正四棱锥边长一般为一米。实际声目标距阵列一般 100 米以外(直升机距阵列太近(几十米)还将其视为点声源将引起较大误差),所以,考虑到 $d_{0i} \ll r_1$, 因此有:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &\approx \frac{d_{04} - d_{02}}{d_{03} - d_{01}} \\ \sin \beta &= \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{r^2}} \\ &= \left\{ \left\{ 4r_1^2[(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4r_1 M + d_{03}^2 - d_{01}^2 + d_{04}^2 - d_{02}^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{1}{16a^2(r_1^2 + 2h\sqrt{r_1^2 - (x^2 + y^2)} + h^2)} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} M &= 4r_1[(d_{03} - d_{01})(d_{03}^2 - d_{01}^2) \\ &\quad + (d_{04} - d_{02})(d_{04}^2 - d_{02}^2)] \end{aligned}$$

同样考虑到 $d_{0i} \ll r_1$, 得:

$$\sin \beta = \frac{\sqrt{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2}}{2a} \quad (5)$$

由方程 (2)、(3)、(4)、(5) 可知:利用正四棱锥形阵,只要能够求出 d_{0i} 就可以实现定位,根据式 (1),可以通过测量时延来计算 d_{0i} ,所以说定位的关键在于测得精确的时延 τ_{0i} ($i = 1, 2, 3, 4$)。

另外,在模型中存在另外六个时延,对定位同样有帮助,但由于该阵列为智能雷系统设计,为了算法的简便、高效、快捷等方面,故对其余六个不作讨论。

3 定位误差分析

由上述推导可知,定位误差主要有时延引起的误差、有效声速误差,也与传感器位置精度以及阵元的布设有关。在阵元布设一定的前提下可以通过精确测量来提高位置精度,所以本文在推导过程中不考虑位置误差,定位误差主要由 a 和 d_{0i} 决定。因为不同 i 的 τ_{0i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 误差特性相同,由式 (1) 可知不同 i 的 d_{0i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 误差统计特性也相同,设为 σ_d ,又由文献 [5] 可知有效声速误差可以忽略,因此,通过下面的分析可以得出定位误差。

3.1 d_{0i} 对定向精度的影响:

由 $\tan \alpha \approx \frac{d_{04} - d_{02}}{d_{03} - d_{01}}$ 可知:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha}{\partial d_{01}} &= -\frac{\partial \alpha}{\partial d_{03}} = \frac{d_{04} - d_{02}}{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial d_{02}} &= \frac{\partial \alpha}{\partial d_{04}} = \frac{d_{01} - d_{03}}{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2} \\ \therefore \sigma_\alpha &= \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial d_{0i}} \right)^2 \sigma_d^2} \\ &= \sqrt{\frac{2}{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2} \sigma_d^2} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2a \sin \beta} \sigma_d \end{aligned} \quad (6)$$

再由 $\sin \beta = \frac{\sqrt{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2}}{2a}$ 可知:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial d_{01}} &= -\frac{\partial \beta}{\partial d_{03}} = \frac{1}{2a} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(d_{03} - d_{01})^2 - (d_{04} - d_{02})^2}{4a^2}}} \\ &\quad \cdot \frac{-(d_{03} - d_{01})}{\sqrt{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2}} \\ \frac{\partial \beta}{\partial d_{02}} &= -\frac{\partial \beta}{\partial d_{04}} \\ &= \frac{1}{2a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2}{4a^2}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \frac{-(d_{04} - d_{02})}{\sqrt{(d_{03} - d_{01})^2 + (d_{04} - d_{02})^2}} \\
 \therefore \sigma_\beta &= \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \beta}{\partial d_{0i}} \sigma_d \right)^2} \\
 &= \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{2}{1 - \sin^2 \beta}} \cdot \sigma_d \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{2a \cos \beta} \cdot \sigma_d \quad (7)
 \end{aligned}$$

公式 (6)、(7) 表达了时延误差对定向精度的影响, 时延误差主要由时延估计、声信号传播起伏及声测量系统等部分引起的。各传感器的性能不完全一致, 且在安装的过程中与理想的安装情况有一定的误差, 都会导致时延误差的增大, 由上述两式可以看出, 定向精度与 a 成反比, 与 σ_d 成正比, 并且随 β 角的变化而变化, 与目标的远近无关。

3.2 d_{0i} 对定距精度的影响:

根据公式: $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 可得:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial r}{\partial x} &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \\
 \frac{\partial r}{\partial y} &= \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \\
 \frac{\partial r}{\partial z} &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}
 \end{aligned}$$

我们知道:

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{\partial r}{\partial x} \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial y} \sigma_y \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial z} \sigma_z \right)^2,$$

根据公式: $x = r \sin \beta \cos \alpha$,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial x}{\partial r} &= \sin \beta \cos \alpha, & \frac{\partial x}{\partial \alpha} &= -r \sin \beta \sin \alpha, \\
 \frac{\partial x}{\partial \beta} &= r \cos \beta \cos \alpha
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \sigma_x^2 &= \left(\frac{\partial x}{\partial r} \sigma_r \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \beta} \sigma_\beta \right)^2 \\
 &= \sin^2 \beta \cos^2 \alpha \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2}{2a^2} \sigma_d^2
 \end{aligned}$$

再根据公式: $y = r \sin \beta \sin \alpha$,

$$\sigma_y^2 = \sin^2 \beta \sin^2 \alpha \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2}{2a^2} \sigma_d^2$$

最后根据公式: $z = r \cos \beta$

$$\begin{aligned}
 \sigma_z^2 &= \cos^2 \beta \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2}{2a^2} \text{tg}^2 \beta \cdot \sigma_d^2 \\
 \therefore \sigma_r^2 &= \frac{x^2}{r^2} \left(\sin^2 \beta \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2 \sigma_d^2}{2a^2} \right) \\
 &\quad + \frac{y^2}{r^2} \left(\sin^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2 \sigma_d^2}{2a^2} \right) \\
 &\quad + \frac{z^2}{r^2} \left(\cos^2 \beta \cdot \sigma_r^2 + \frac{r^2}{2a^2} \text{tg}^2 \beta \cdot \sigma_d^2 \right) \\
 \sigma_r^2 &= \frac{1}{2 \left(\frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \beta \right)} \left(\frac{r}{a} \right)^2 \cdot \sigma_d^2 \quad (8)
 \end{aligned}$$

通过式 (8) 可以看出定距误差与时延误差成正比, 与传感器的半径 a 成反比, 且随仰角和方位角的变化而变化, 与被测目标距离成正比, 就是说目标越远误差越大, 这是由被动声定位的特点决定的, 因为该方法本质上是这样的: 利用相关的两个传感器将目标确定在一组双曲面上, 多个传感器将会确定多组双曲面, 再根据几何关系计算出这些双曲线的交点, 理论上这个交点就是目标所在方位, 实际上, 由于受传感器摆放的半径 a 限制, 不同的方向线之间的角度偏差很小, 只要定向稍有偏差, 定距误差就会很大, 这就是目标越远误差越大的原因。正因为如此该定距误差公式在推导时直接代入定向误差表达式, 没有用到任何假设条件和近似, 所以推导思路具有一定的普遍性。

4 结果仿真

为了验证正四棱锥形阵的定位性能, 对结果进行了仿真, 通过仿真可以直观地看出各变量对定位结果的影响。在仿真的过程中, 图 2、图 3、图 5、图 6 中的曲线 1 取时延误差 $\sigma_\tau = 5\mu\text{s}$, 曲线 2 取 $\sigma_\tau = 25\mu\text{s}$, 曲线 3 取 $\sigma_\tau = 55\mu\text{s}$, 曲线 4 取 $\sigma_\tau = 65\mu\text{s}$, 取 $a = 1\text{m}$, $c = 340\text{m/s}$ 。图 2 是时延误差取不同值时方位角误差随仰角变化的曲线, 可以看出当仰角 β

大于 10° 时方位角误差较小且变化很缓慢,但在 β 小于 10° 时方位角误差会随仰角变小而陡增,在接近 0° 时方位角误差已趋近于无穷大,不过此时恰好目标在该定位系统上方,对于近距离定位没有必要再确定精确方位角。从图中还可以看出方位角误差与时延误差成正比。

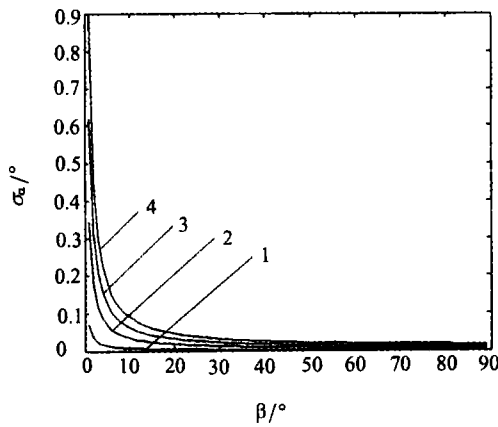


图 2 方位角误差-仰角曲线

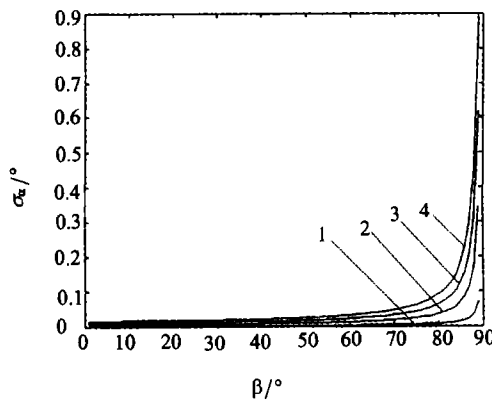


图 3 仰角误差-仰角曲线

图 3 时延误差取不同值时仰角误差随仰角变化的曲线图,当 β 不大于 80° 时仰角误差 σ_β 变化平缓,误差较小,当 β 超过 80° 后 σ_β 会随 θ 的增大而迅速增大,当 β 接近 90° 时俯仰角误差趋近于无穷大,此时目标已经位于地面上,对于智能雷系统来说目标肯定位于地面上,再测量精确的仰角已没有太大的实际意

义,况且此时非常有利于测量精确的方位角。所以说,该种声阵列非常适合确定近距离目标的方向,尤其适用于智能雷系统,与以往的平面阵^[2,5,7,8]相比定向性能有了较大提高。尤其是降低了仰角对定向精度的影响,平面阵的一个弱点就是定向精度受仰角影响较大,即:图 2、图 3 中曲线下方面积大。在小仰角时方位角误差涨幅较大,在仰角接近 90° 时仰角误差涨幅较大,定向的不精确会导致定距误差急剧增大,甚至失去定距能力,在这些区域内不能满足智能雷系统要求的就视为该阵列盲区,平面阵列盲区明显大于立体阵列,由于平面阵列理论已较为成熟,这方面论文较多,与平面阵的性能比较这里就不再赘述。

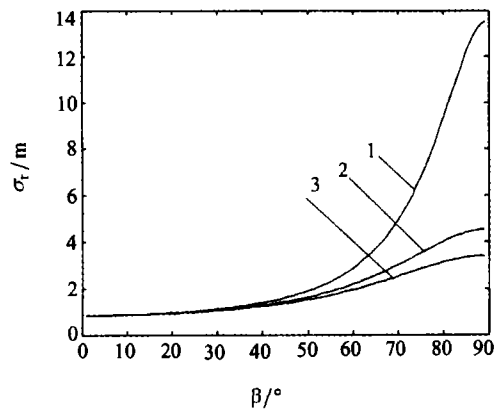


图 4 定距误差-仰角曲线

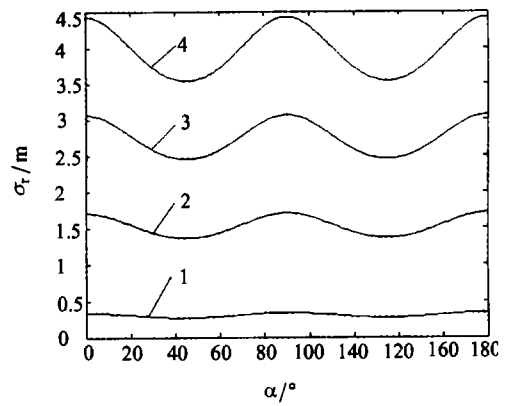


图 5 定距误差-方位角曲线

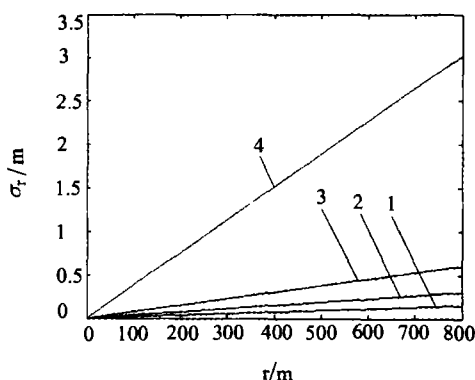


图 6 时延对定距误差的影响

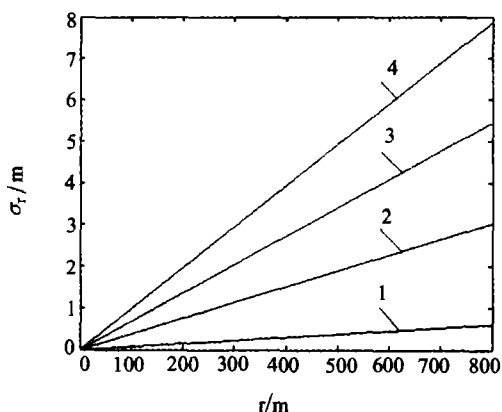


图 7 基阵距离对定距误差的影响

图 4 表明了定距误差随仰角变化的曲线关系, 曲线 1 取 $\alpha = 10^\circ$ 或 80° , 曲线 2 取 $\alpha = 30^\circ$ 或 60° , 曲线 3 取 $\alpha = 45^\circ$, 在不考虑其他误差的影响的条件下, 当 β 小于 60° 时定距误差变化缓慢, 误差较小, 大于 60° 时定距误差会随仰角的增大而显著增大; 图 5 是定距误差随方位角变化的曲线, 当方位角 α 接近 $k\pi/2$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 时定距误差就会显著增大, 此时目标位于声阵列基阵的对角线上, 此时各个传感器相对于目标处于一种对称位置, 故无法对目标进行精确定位。从以上分析可以看出该定位方法对目标的方向有一定的要求, 这是因为该种定距原理本质上是基于定向的, 所以定向误差增大将会直接造成定距误差的显著增

大, 这就决定了声被动定位很难实现远距离的定距, 但是本文所采用方法较以前同数量声传感器平面阵列在定距精度和定距范围已有较大提高。

图 6 反映的是距离增加时时延对定距误差的影响, 从中可以看出定距误差与时延成正比。图 7 是基阵半径 a 取不同值时定距误差随距离变化的关系图, 直线 1 取 $a = 20\text{m}$, 直线 2 取 $a = 10\text{m}$, 直线 3 取 $a = 5\text{m}$, 直线 4 取 $a = 1\text{m}$, 时延误差取 $25\mu\text{s}$ 。从图中可以看出, 在不考虑其它条件影响时基阵半径 a 与定距误差成反比, 目标距离与定距误差成正比。

5 结束语

本文是为智能雷系统设计的声阵列, 将原来用于预警用的声传感器参与定位用的声阵列中来, 这样在不增加智能雷系统中的声传感器数量的基础上达到了提高定位效果的目的, 该定位原理结构简单、计算方便、提高了定向精度和范围, 尤其是在一定范围内提高了定距精度, 较以前的平面阵有了不同程度的提高, 为近距离声定位可行性提供了有力支持。该定位方法可用于反武装直升机、反坦克智能雷系统中。

参 考 文 献

- 1 张卫平, 王伟策. 探测与控制学报, 2003, 9, 25(3): 54~57.
- 2 贾云得, 冷树林, 刘万春等. 兵工学报, 2001, 5, 22(2): 206~209.
- 3 顾晓辉, 王晓鸣. 声学技术, 2003, 22(1):44~47.
- 4 祝龙石, 庄志洪, 庄志泰. 声学学报, 1999, 24(2): 204~209.
- 5 陈华伟, 赵俊渭, 郭业才. 探测与控制学报, 2003, 9, 25(4):11~16.
- 6 孙建伟, 谭惠民, 胡昌振. 探测与控制学报, 1999, 3, 21(1): 48~50.
- 7 李京华, 施坤林, 揭涛等. 探测与控制学报, 1999, 3, 22(1):29~34.
- 8 李喆, 陈文聪, 李杰. 探测与控制学报, 2004, 3, 26(1): 57~60.

“扫描电声成像系统及其相关器件和材料”项目简介

扫描电声成像系统是在电子显微镜 (SEM) 的基础上, 增加一电子束斩波系统, 使入射到试样表面的电子束强度以频率 f 变化。由于电子与试样原子之间的非弹性散射, 在电子束聚焦附近就形成一时变的热弹源, 会同时激发出热波和声波。声波作为信息的载体透过试样, 而被在试样背面相耦合的压电换能器接收, 该信号经锁相放大器检测后再输入电子显微镜的成像系统。当强度调制的电子束在试样表面上扫描时, 由于试样表面的形貌、局域的力学、热学、电学特性等的差异, 形成具有不同衬度的电子声像 (SEAM)。由于 SEAM 是一近场成像技术, 它的成像分辨率不受远场夫朗和费衍射和中场的费涅尔衍射所确定的波长限制, 它的最佳分辨率可优于 $0.5\mu\text{m}$ 。而且它可以获得原位的试样表面的 SEM 像和亚表面的 SEAM 像。此外还有试样制备简单等优点。

本项目的主要创新点是:

(1) 研制成功具有自主知识产权的高分辨率实用化电声显微成像系统, 其中的变速率扫描和自适应处理器是系统实现实用化的关键技术。

(2) 研制成功多参量 (电场、温场、力场和

频率) 可控的多功能复合结构电声信号传感器及其控制装置。

(3) 研制成功横向模式多层电声信号敏感元件, 并首次用于电声成像系统。

(4) 制备了高性能、大尺寸铌镁酸铅 ($0.67\text{PMN}\sim 0.33\text{PT}$) 晶体材料, 并作为电声信号敏感元件应用于电声信号传感器。

(5) 建立了第一个完整的三维电声成像理论, 阐述了电声信号的激发机制, 电声像衬度产生的机理和显示空间高分辨率的理论依据, 以及电声成像属近场成像的物理本质。

本项目已拥有一个国际发明专利和四个国家发明专利。SEAM 系统已发展到 III 型, 并有产品销售到美国、德国、日本、荷兰、新加坡、台湾等地区, 以及国内有关高等院校、科研单位、企业等单位。有关技术目前已拓展到扫描探针显微镜 (SPM), 已获得优于 50nm 的图像分辨率。

本项目由中国科学院上海硅酸盐研究所和同济大学声学研究所合作研究, 并获 2005 年度国家技术发明二等奖。

(钱梦骥)

- 9 张元. 被动声探测技术研究-反武装直升机雷弹引信跟踪与识别技术 (博士学位论文)[D]. 南京: 南京理工大学, 1996.
- 10 Piersol A G. Time delay estimation using phase data. *IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing*, 1981, **ASSP-29**(3):836~843.

- 11 Wong K M et al. *IEEE, Trans Signal Processing*, 1992, **40**(1):2007~2028.
- 12 Fertner A, Sjolund A. *IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal Processing*, 1986, **ASSP-34**(5):1342~1348.