

# 基于水声信道传播特性实现三元阵三维定位研究

郑恩明<sup>1,2†</sup> 陈新华<sup>1</sup> 孙长瑜<sup>1</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)  
(2 中国科学院大学 北京 100190)

**摘要** 三元阵通常被用来完成测距任务,要实现三维定位需要与其他设备合作或增加阵元数来完成。针对常规三元阵三维定位问题,本文基于水声信道传播特性,通过虚拟阵元实现三元阵的全方位被动三维定位;同时,本文通过对三元阵进行非直线布阵来解决直线三元阵对  $y$  轴方向定位的左右模糊问题,实现全方位三维定位。数值分析和仿真表明该方法能够很好的完成三元阵全方位三维定位问题,尤其对浅海近程目标。

**关键词** 三元阵, 水声信道, 被动三维定位

**中图分类号**: TB568

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1000-310X(2013)02-0122-07

## The three-dimensional positioning research of three-element array based on the underwater acoustic channel propagation characteristics

ZHENG Enming<sup>1,2</sup> CHEN Xinhua<sup>1</sup> SUN Changyu<sup>1</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)  
(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract** Three-element array is often used to complete the task of surveying the distance between the object and the reference element. To achieve three-dimensional positioning, cooperation with other devices or increasing the number of array elements are required when using three-element array. In allusion to the problem of three-dimensional positioning of three-element array, this paper shows a method to achieve passive three-dimensional positioning based on the underwater acoustic channel propagation characteristics. At the same time, the non-linear three-element array in this paper can solve the linear three-element array ambiguity around the  $y$ -axis direction. The numerical analysis and simulation show that this paper can well complete three-dimensional positioning of three-element array, especially for the shallow water target.

**Key words** Three-element array, Underwater acoustic channel, Passive three-dimensional positioning

## 1 引言

由于主动定位需要有发射信号设备和易于暴

露等特点,水下目标被动定位技术成为声纳定位技术中被研究的热点问题之一。被动定位典型方法是通过测量不同阵元接收目标辐射信号的时延差进

2012-06-14 收稿; 2012-11-22 定稿

作者简介: 郑恩明 (1985-), 男, 河南周口人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号与信息处理、水下声学定位系统研究。

陈新华 (1978-), 男, 副研究员。

孙长瑜 (1954-), 男, 研究员, 博士生导师。

<sup>†</sup> 通讯作者: 郑恩明, E-mail: zhengenming09@mailsucas.ac.cn

行求解实现,即文献[1-6]所用的双曲面交汇原理。文献[1-6]所述的三元阵被动定位基本是对平面二维定位,没有涉及到目标的三维定位,尤其是直线三元阵<sup>[6]</sup>。本文利用水声信道传播特性的多途性通过虚拟阵元实现非直线三元阵被动三维定位<sup>[7-12]</sup>。相比直线三元阵在不需要先验知识的情况下即可解决 $y$ 轴方向定位的左右模糊问题<sup>[13]</sup>,同时也降低了直线阵在安装上的困难度。高精度时延差可提高目标的三维定位精度,本文时延差是通过相关法加内插法求取所得<sup>[14-16]</sup>;虚拟阵元与实阵元间的时延差是通过专家系统判别后所得<sup>[17]</sup>。数值分析和仿真均验证了该方法能够很好的完成三元阵全方位三维定位问题,尤其对浅海近程目标。

## 2 非直线三元阵定位原理与算法

### 2.1 水声信道传播特性

由于水声信道的多途效应,目标信号经水声信道传播到达接收阵元可能会变成是由直达声、海面反射声、海底反射声、海面海底反射声、海底海面反射声等叠加而成的信号,本文正是基于水声信道的多途效应才实现非直线三元阵水下目标的三维定位。图1给出了直达声、海面反射声、海底反射声在水声信道中的声线图。

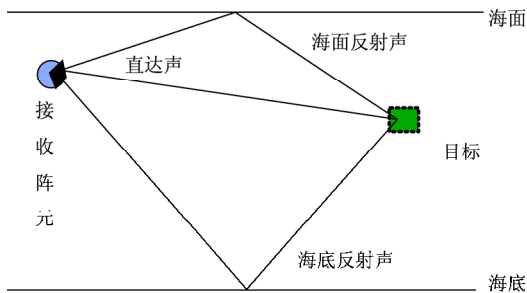


图1 水声信道中的声线

根据图1可得目标辐射信号与接收阵元接收信号的关系式如公式(1)所述。

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N A_{ij} \cdot s(t) \delta(t - t_{ij}), j=1,2,3, \quad (1)$$

其中,  $x_j(t)$  为第  $j$  接收阵元接收信号,  $A_{ij}$  为第  $i$  条声线达接收阵元  $j$  幅度值,  $t_{ij}$  为第  $i$  条声线到达接收阵元  $j$  的时延值,  $s(t)$  为目标辐射信号,  $\delta(t - t_{ij})$  为水声信道的冲击响应函数,  $N$  表示信号经水声信

道到达接收阵元声线条数(有效的声线需满足反射声幅度大于直达声幅度的 0.1)。

### 2.2 非直线三元阵定位原理

根据 2.1 节所述水声信道传播特性的多途效应,本文通过对中间阵元以海面为镜面映射出虚拟阵元,其信号为中间阵元接收的海面反射声,图2为基于水声信道传播特性实现非直线三元阵三维定位原理图。

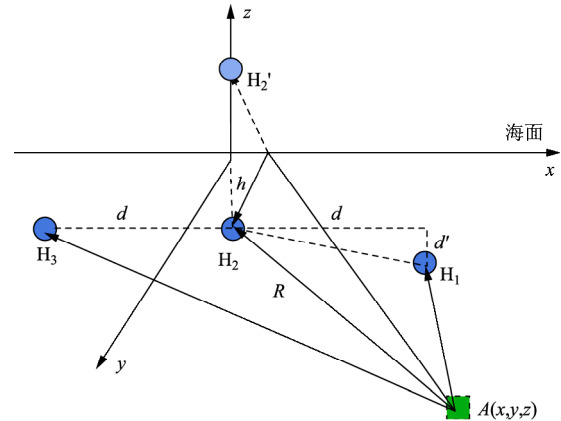


图2 非直线三元阵三维定位原理图

其中,  $A(x, y, z)$  为目标,  $H_1(d, d', h)$ 、 $H_2(0, 0, h)$ 、 $H_3(-d, 0, h)$  为按非直线排列的三个接收阵元,  $H_2'(0, 0, -h)$  为接收阵元  $H_2(0, 0, h)$  以海面为镜面虚拟出的阵元,  $d$ 、 $d'$ 、 $-h$  为阵元坐标参数值,  $R$  为目标  $A(x, y, z)$  到阵元  $H_2(0, 0, h)$  的距离。目标  $A(x, y, z)$  到阵元  $H_1(d, d', h)$ 、 $H_2'(0, 0, -h)$ 、 $H_3(-d, 0, h)$  与阵元  $H_2(0, 0, h)$  之间的时延差分别为  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{22}$ 、 $\tau_{23}$ ,  $c$  为有效声速, 则目标  $A(x, y, z)$  到阵元  $H_2(0, 0, h)$ 、 $H_1(d, d', h)$ 、 $H_2'(0, 0, -h)$ 、 $H_3(-d, 0, h)$  距离可分别按式(2)中的(2.1)~(2.4)表示。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + (z - h)^2 = R^2, & (2.1) \\ (x - d)^2 + (y - d')^2 + (z - h)^2 = (R + c \cdot \tau_{21})^2, & (2.2) \\ (x + d)^2 + y^2 + (z - h)^2 = (R + c \cdot \tau_{23})^2, & (2.3) \\ x^2 + y^2 + (z + h)^2 = (R + c \cdot \tau_{22})^2. & (2.4) \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)中的部分变量可按式(3)变换表示为

$$\begin{cases} R_{21} = c \cdot \tau_{21}, \\ R_{23} = c \cdot \tau_{23}, \\ R_{22} = c \cdot \tau_{22}. \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和(3)所示,可进一步推导得式(4)为

$$\begin{cases} x = \frac{R_{23}^2 + 2R \cdot R_{23} - d^2}{2d}, & (4.1) \\ y = \frac{2d^2 + d'^2 - R_{21}^2 - R_{23}^2 - 2R(R_{21} + R_{23})}{2d'}, & (4.2) \\ z = \frac{R_{22}^2 + 2R \cdot R_{22}}{4h}. & (4.3) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)中(4.1)、(4.2)、(4.3)式和(2)式中(2.1)式联合可解得目标到接收阵元  $H_2(0,0,h)$  的斜距  $R$  如式(5)、(6)所示。

当  $A_6 > 0$  时:

$$R = \frac{\sqrt{A_1 - A_2 \times A_3 \times A_4 + A_5}}{A_6}, \quad (5)$$

当  $A_6 < 0$  时:

$$R = \frac{-\sqrt{A_1 - A_2 \times A_3 \times A_4 + A_5}}{A_6}, \quad (6)$$

其中,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$ 、 $A_6$  如式(7)所示, 将求得的  $R$  带入式(4)中(4.1)、(4.2)、(4.3)式即可解得目标的三维坐标  $A(x,y,z)$ 。

$$\begin{cases} A_1 = \left( \frac{B_1 R_{23}}{d^2} + \frac{B_4 R_{23}}{4h^2} + \frac{B_2 B_3}{2d'^2} \right)^2, \\ A_2 = \frac{B_1^2}{d^2} + \frac{B_2^2}{d'^2} + \frac{B_4^2}{4h^2}, \\ A_3 = \frac{B_3^2}{4d'^2} + \frac{R_{23}^2}{d^2} + \frac{R_{22}^2}{4h^2} - 1, \\ A_4 = d^2 h^2 d'^2, \\ A_5 = \frac{B_2 B_3 h^2 d'^2}{2} - \frac{B_4 R_{22} d^2 d'^2}{4} - B_1 R_{23} h^2 d'^2, \\ A_6 = \frac{B_3 d^2 h^2}{2} + \frac{d^2 R_{22}^2 d'^2}{2} + 2h^2 d'^2 R_{23}^2 - 2d^2 h^2 d'^2, \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  如式(8)所示。

$$\begin{cases} B_1 = R_{23}^2 - d^2, \\ B_2 = -R_{23}^2 - R_{21}^2 + d'^2 + 2d^2, \\ B_3 = 2(R_{23} + R_{21}), \\ B_4 = R_{22}^2 - 4h^2. \end{cases} \quad (8)$$

同理, 还可分别对  $H_1$ 、 $H_3$  阵元以海面为镜面虚拟出关于海面为界的虚拟阵元  $H_1'$ 、 $H_3'$ , 根据公式(5)~(8)可求解得目标三维坐标  $A(x,y,z)$ , 或同时对三个阵元以海面为镜面虚拟出关于海面为界的虚拟阵元, 以便对冗余信息进行拟合得到更高精度的目标三维坐标  $A(x,y,z)$ 。

对式(4)中(4.1)、(4.2)、(4.3)式分求全微分可得目标在  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的定位误差如式(9)所示。

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{(2(R_{23} + R)\Delta R_{23} + 2R_{23}\Delta R)d - (R_{23}^2 + 2R \cdot R_{23})\Delta d}{2d^2} - \frac{\Delta d}{2}, \\ \Delta y = \frac{2d\Delta d - 2R_{23}\Delta R_{23} - 2R_{21}\Delta R_{21} - 2\Delta R(R_{21} + R_{23}) - 2R(\Delta R_{21} + \Delta R_{23})}{2d'}, \\ \quad + \frac{\Delta d'}{2} - \frac{(2d^2 - R_{21}^2 - R_{23}^2 - 2R(R_{21} + R_{23}))\Delta d'}{2d'^2}, \\ \Delta z = \frac{(2R_{22}\Delta R_{22} + 2\Delta R \cdot R_{22})h - (R_{22}^2 + 2R \cdot R_{22})\Delta h}{4h^2}. \end{cases} \quad (9)$$

### 3 仿真分析

为了验证该方法可以实现对目标的全方位三维定位, 令模拟目标运动的轨迹如图 3 所示。

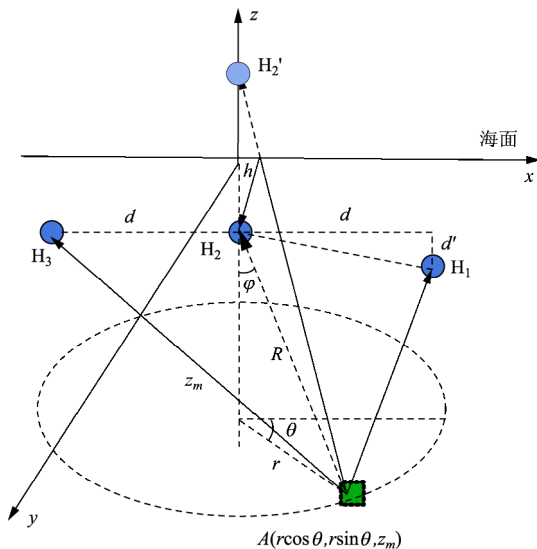


图 3 模拟目标运动轨迹图

其中,  $r = R\sin\varphi$  为模拟目标运动的水平半径,  $z_m = R\cos\varphi$  为目标深度,  $R$  为目标相对阵元  $H_2$  的距离,  $\varphi$  为相对阵元  $H_2$  所在水平面的俯仰角,  $\theta$  为目标与  $x$  轴的夹角。

#### 3.1 全方位三维定位

为了模拟实际目标的定位效果, 本文采用 5~10 kHz 的宽带噪声作为目标辐射的信号, 目标辐射信号经水声信道传播到达接收阵元后变为直达声信号和海面反射声信号的叠加而成的信号, 海面反射声与直达声的幅度是按球面波传播衰减求得; 阵元间的时延差是根据目标与各阵元声程差反向推导添加到各阵元接收到的信号中; 另外, 假设背

景噪声为高斯白噪声, 信噪比  $SNR = -6$  dB 添加到目标辐射信号中作为实际仿真的模拟信号; 仿真中添加各阵元时延差是按声速  $c = 1500$  m/s, 采样率  $f_s = 250$  kHz 采样添加到模拟信号中, 阵元最终接收信号是经 10 倍降采样实现, 即此时采样率  $f_s = 25$  kHz。所以, 最先模拟目标信号产生的时延误差  $\Delta\tau = 2$   $\mu$ s, 经过 10 倍降采样后, 阵元最终接收信号经直接相关产生的时延误差为  $\Delta\tau = 20$   $\mu$ s; 最后求取的时延差是按 10 倍的频域内插法后经 100 次独立平均得到, 即阵元间时延误差  $\Delta\tau = 2$   $\mu$ s, 所用方法即为式(10)所示<sup>[14-16]</sup>。

$$\begin{cases} Cx_i x_j = E[x_i(t) \cdot x_j(t)], \\ FCx_i x_j = \text{fft}(Cx_i x_j), \\ \overline{Cx_i x_j} = \text{ifft}(FCx_i x_j, 10f_s), \end{cases} \quad i=2; j=1,2,3 \quad (10)$$

其中,  $Cx_i x_j$  为接收阵元  $i$  的信号  $x_i(t)$  和接收阵元  $j$  的信号  $x_j(t)$  的互相关结果,  $E[\cdot]$  为数学期望函数,  $\text{fft}()$  为傅里叶变换函数,  $\text{ifft}()$  为傅里叶逆变换函数。理论上,  $\overline{Cx_i x_j}$  相比  $Cx_i x_j$  精度提高了 10 倍。

通过文献[17]所述专家系统可分别求得阵元  $H_1$  与  $H_2$  直达声时延差  $\tau_{21}$ 、阵元  $H_2$  与  $H_3$  直达声时延差  $\tau_{23}$ 、以及阵元  $H_2$  的直达声与一次海面反射声时延差  $\tau_{22}$ , 将求得  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{23}$ 、 $\tau_{22}$  结合 2.2 节所得到定位公式(4), 可求得目标三维坐标。为了能够观察到目标定位的细节, 图 4(a)-(c)分别给出了  $r = 500$  m 时的全方位三维定位结果和  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴定位误差以及定位误差百分比图。

图 4(b)-(c)中每个角度上的定位误差是由 100 次独立统计数据的标准差所得, 即由式(11)所得; 定位误差百分比是由 100 次独立统计数据的标准差除以真值得, 即由式(12)所得。

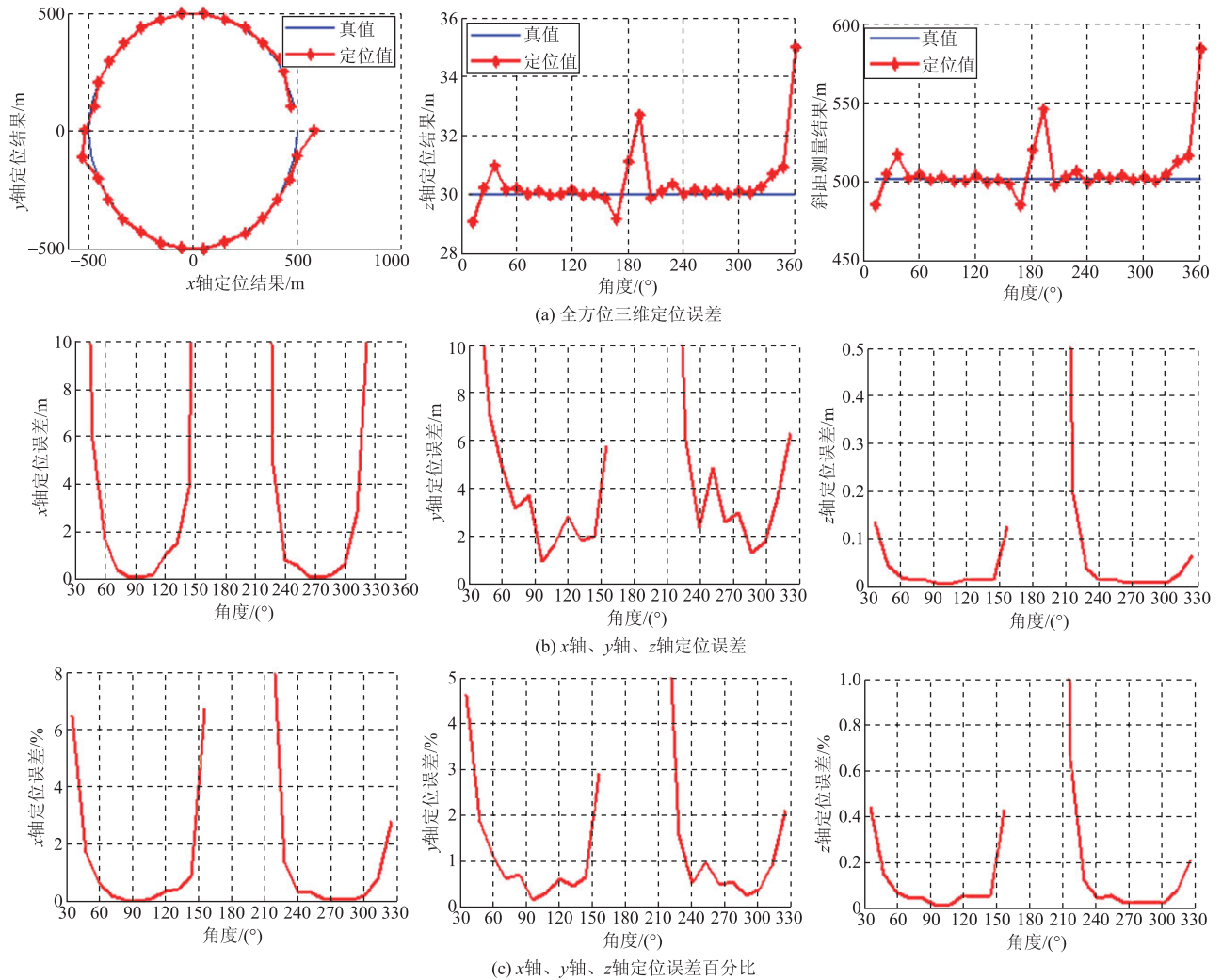


图4  $d=15$ 、 $h=10$ 、 $d'=2$ ， $r=500$  m， $\theta=30^\circ\sim 150^\circ$ 、 $210^\circ\sim 330^\circ$ 时，定位结果和定位误差

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} (x_i - x)^2 / 100}, \\ \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} (y_i - y)^2 / 100}, \\ \sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} (z_i - z)^2 / 100}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\sigma_x}{x} \times 100\%, \\ \Delta y = \frac{\sigma_y}{y} \times 100\%, \\ \Delta z = \frac{\sigma_z}{z} \times 100\%, \end{cases} \quad (12)$$

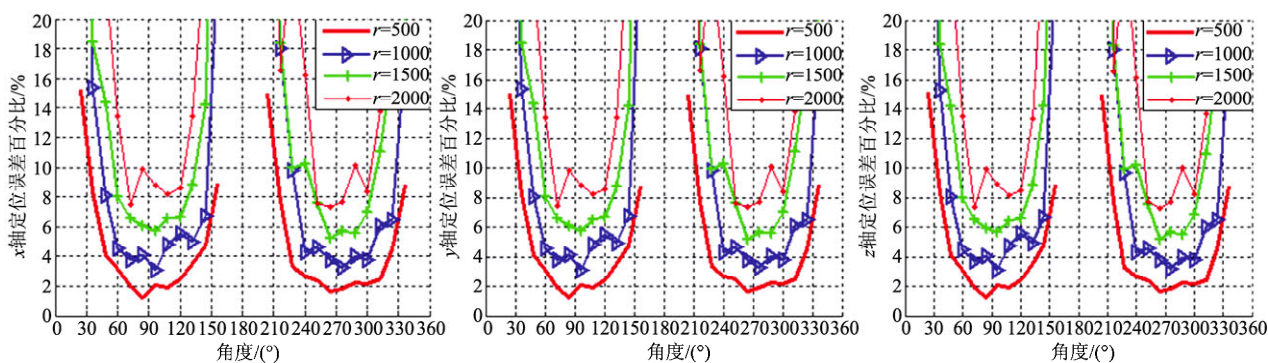
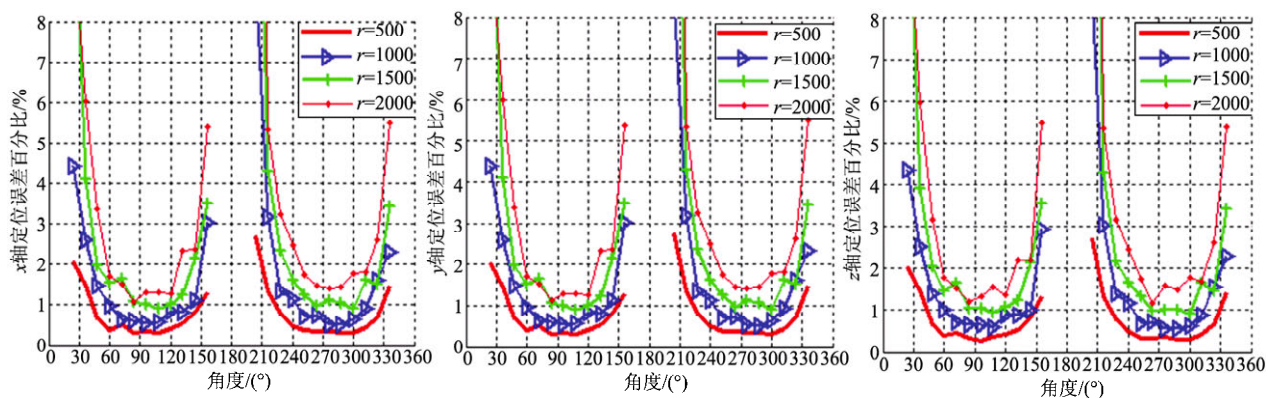
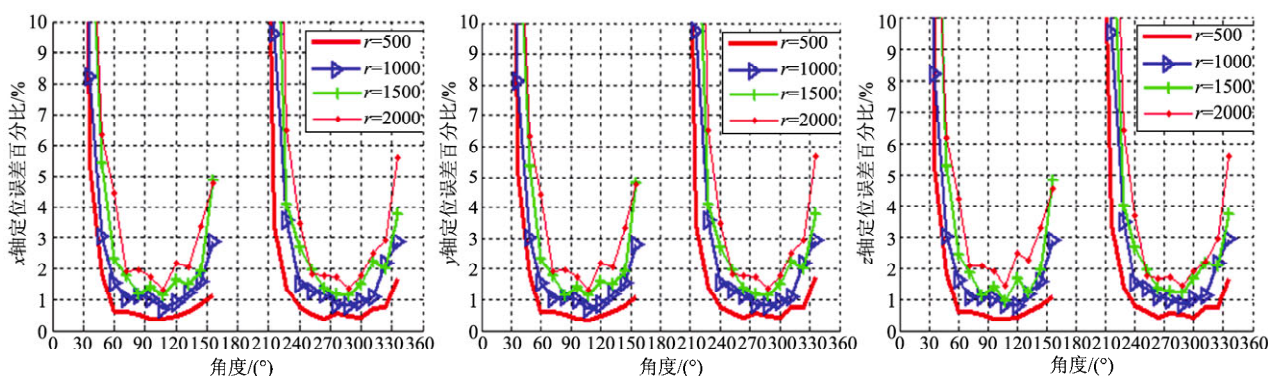
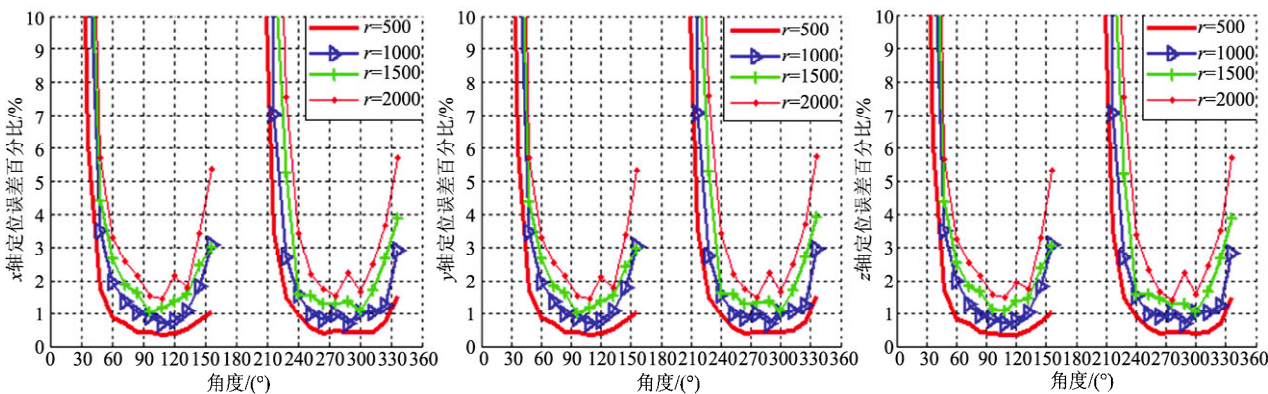
其中， $x_i$ 、 $x$ 、 $y_i$ 、 $y$ 、 $z_i$ 、 $z$ 分别代表第 $i$ 定位所得目标在 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴的定位结果和目标在 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴的真值。

从图4(a)可以得到该方法可实现对目标的三维定位，只是由于三元阵在 $y$ 轴方向的投影孔径比较小，导致端射方向定位精度不高，可采用十字阵来

解决端射方向定位精度差的问题。由于仿真中阵元 $H_1$ 位于第4象限，所以在端射方向上2、4象限的定位精度相比1、3象限的定位精度略高些。阵元在其他位置以及目标运行半径为其他值的定位结果和 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴定位误差和图4(a)、4(b)类似，本文不再给出详细的图形说明。

为了比较阵元位置对沿水平半径 $r=500:500:2000$  m， $z_m=30$  m轨迹运动目标三维定位的影响，本文将从以下四个方面进行比较。

- (1) 假设各阵元坐标中 $d=10$ 、 $h=10$ 、 $d'=2$ 时，定位结果如图5所示。
- (2) 假设各阵元坐标中 $d=15$ 、 $h=10$ 、 $d'=2$ 时，定位结果如图6所示。
- (3) 假设各阵元坐标中 $d=15$ 、 $h=10$ 、 $d'=10$ 时，定位结果如图7所示。
- (4) 假设各阵元坐标中 $d=15$ 、 $h=20$ 、 $d'=10$ 时，定位结果如图8所示。

图5  $d=10$ 、 $h=10$ 、 $d'=2$ ， $r=500:500:2000$  m 时， $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴定位误差百分比图6  $d=15$ 、 $h=10$ 、 $d'=2$ ， $r=500:500:2000$  m 时， $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴定位误差百分比图7  $d=15$ 、 $h=10$ 、 $d'=10$ ， $r=500:500:2000$  m 时， $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴定位误差百分比图8  $d=15$ 、 $h=20$ 、 $d'=10$ ， $r=500:500:2000$  m 时， $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴定位误差百分比

根据图5到图8显示的仿真结果,我们可以得到以下结论:

(1) 在阵元位置固定不变时,随着目标离中心阵元  $H_2(0,0,h)$  距离变大,目标的定位精度有所下降;尤其在阵元的水平间距  $d$  较小时,目标定位精度随距离变大下降的更快(对比图5与图6可知);

(2) 在目标离中心阵元  $H_2(0,0,h)$  距离固定不变以及各阵元中  $d$ 、 $h$  不变时,比较图6与图7可得随着  $d'$  的变大,由于仿真中阵元  $H_1$  位于第4象限,所以在端射方向上2、4象限的定位精度有所提高,而1、3象限的定位精度有所下降;而在  $y$  轴方向附近的定位精度基本不变;

(3) 在目标离中心阵元  $H_2(0,0,h)$  的距离固定不变以及各阵元中  $d$ 、 $d'$  不变时,比较图7与图8可得随着  $h$  的变大,近程目标在端射方向附近的定位精度有所提高,但提高不多;

(4) 在目标离中心阵元  $H_2(0,0,h)$  的距离固定不变以及各阵元中  $h$ 、 $d'$  不变时,比较图5与图6可得随着  $d$  的变大,水平方向和垂直方向的定位精度有很大的提高,尤其是对近程端射方向附近目标的定位精度提高较多和对中远程目标的定位精度提高较多;

所得结论与第2.2节定位公式理论推导一致,表明本文所提方法实现可以对水下目标在  $30^\circ \sim 150^\circ$  与  $210^\circ \sim 330^\circ$  方向高精度三维定位,尤其是对浅海近程基本可以实现全方位三维定位;同时再次验证阵元间的水平间距  $d$  对定位精度影响比较的,尤其是对中远程目标定位方面;所以要得到高的定位精度要尽量加大阵元在  $x$  轴方向的水平间距  $d$ ,但考虑到水声信道传播的起伏性和信号之间的相关性,阵元在  $x$  轴方向水平间距  $d$  不易过大。

## 4 结论

本文利用水声信道传播的多途效应,通过对中心阵元虚拟出以海面为镜像的阵元,实现了非直线三元阵的三维定位公式推导,且解决了文献[13]中所需通过先验知识来解决目标在  $y$  轴方向的左右模糊问题;通过数值仿真验证了该方法可有效实

现水下目标的全方位三维定位,尤其对浅海近程目标;同时可通过对  $H_1$ 、 $H_3$  两个阵元以海面为镜像虚拟出另外的  $H_1'$  和  $H_3'$  两个阵元,这样可形成六元阵;通过对冗余数据的拟合可达到更好的定位效果;针对端射方向目标定位效果不好的实际中对安装阵元平台转向后对目标再次进行定位,或增加  $y$  轴方向的阵元来解决,在不增加阵元的基础上实现端射方向准确定位还需要进一步探索。

## 参考文献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2003: 350-359.
- [2] 周伟, 门丽杰, 梅继丹, 等. 浅海三元阵近程被动定位实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(5): 547-551.
- [3] 周伟, 惠俊英, 梅继丹, 等. 三元阵被动测距浅海试验及后置处理[J]. 声学学报, 2009, 34(3): 217-222.
- [4] 周伟. 三元阵浅海近程被动定位研究与分析[D]. 哈尔滨工程大学硕士论文, 2008, 12: 10-13.
- [5] 梁晶, 于莹, 闫晓英. 三元阵被动定位方法原理及试验验证[J]. 船舶科学技术, 2009, 29(5): 144-145.
- [6] 魏丽萍, 陈岩, 陈庚, 等. 不等间距非直线三元阵在水声平面声源被动定位中的应用[J]. 应用声学, 2009, 28(6): 447-453.
- [7] KILFOYLE D B, BAGGEROER A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Eng, 2000, 25(1): 4-27.
- [8] NEWELL O B, AHMAD T A, PHIL W S. Detectability of Low-Level Broad-Band Signals Using Adaptive Matched Field Processing with Vertical Aperture Arrays[J]. IEEE Journal of oceanic Engineering, 2000, 25(3): 296-313.
- [9] 水魏莉, 许芳, 孙海信. 声信道的研究与仿真[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 25-29.
- [10] 兰英, 章新华, 熊鑫. 浅海水声多途信道建模与仿真[J]. 船舶科学技术, 2010, 28(9): 120-122.
- [11] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [12] YANG Juan, XU Feng. A New Method for the Underwater Acoustic Positioning: Virtual Short Baseline positioning[C] //The 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, XiAn, China 25-27, 5, 2009, 3910-3912.
- [13] 魏玉华, 陈新华, 余华兵, 等. 一种水下三维被动定位技术[J]. 应用声学, 2008, 27(4): 268-272.
- [14] 陈励军. 自相关法多途时延估计及其实验结果[J]. 东南大学学报, 1998, 28(1): 18-23.
- [15] 吴国清, 何怡. 简捷内插方法实现实时处理[J]. 声学学报, 1991, 16(4): 313-316.
- [16] 黄清. 相关域双谱时延估计方法[J]. 声学学报, 2003, 28(1): 57-60.
- [17] 杨娟. 水下动目标被动跟踪关键技术研究[D]. 哈尔滨工程大学博士论文, 2007, 9: 83-91.