

# 基于改进四元基阵的超短基线定位系统研究

何旭涛<sup>1,2</sup>, 谢龙<sup>1,2</sup>, 徐海宁<sup>1</sup>, 李渊<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1,2</sup>, 王剑波<sup>3</sup>

(1.国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021;  
2.浙江舟山海洋输电研究院有限公司, 浙江 舟山 316021; 3.陕西海砥装备科技有限公司, 陕西 西安 710086)

**摘要:**超短基线设备由于尺寸小、使用灵活,在水下定位时得到了广泛应用。为了消除超短基线系统长距离测距的相位模糊问题,提出了一种改进传统的四元基阵,有效地解决了相位模糊问题,并提高了定位精度。同时,为了提高测量的基元间相位差的精度,通过扩展卡尔曼滤波对声波信号进行了降噪。仿真验证的结果表明,相对于传统基阵,改进的四元基阵将定位精度提升了将近一个数量级,且相对于改进的八元基阵有效减小了基元数。

**关键词:**超短基线系统;水下定位;四元正交基阵;扩展卡尔曼滤波

**中图分类号:**P715.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2025)03-0592-08

在水下环境进行作业时,常需要对目标进行精确定位。然而,由于海洋等介质的性质,电磁波信号会严重衰减,难以通过声波对水下物体进行定位,相对于在空气中,信号衰减较小。水声定位技术可以分为长基线(long base line, LBL)系统、短基线(short base line, SBL)系统和超短基线(ultra-short base line, USBL)系统<sup>[1]</sup>。相对于其他水声定位系统,超短基线系统有着体积小、灵活性高、操作方便的优点,应用较为广泛。

然而,超短基线系统在实际应用时,往往会由于水下存在的各种噪声,对水下物体的定位精度产生较大影响。为了提高水声系统的定位精度,可以通过改进基阵,提高采集的声波信号质量。文献[2]提出了一种新的八元基阵用于超短基线系统,有效地解决了长程超短基线的相位模糊问题。文献[3]提出了一种基于平滑算法的交互多模型(IMM)算法,并利用自适应鲁棒平方根容积卡尔曼滤波器提高了超短基线系统的深海定位精度。文献[4]针对海底噪声中的粗差,采用抗差卡尔曼滤波有效地提高了超短基线系统的定位精度。本文主要对超短基线系统的基阵进行了改进,为了减小基点之间相位

差测量的误差,提高了通过应答器所收声波信号的质量。文献[5-6]提高了相邻基元接收信号时延估计的精度。文献[7]将解模糊问题转化为对模糊数的分类识别,对分类器的结果进行融合,得到了无模糊观测条件。

水声定位系统的准确性不仅取决于基阵影响的定位精度,还来自于安装基阵时对传感器自身和传感器之间的误差标定和修正。文献[8-11]分别对水声定位技术中的水下声速和声线弯曲进行了修正,都较为有效地改善了定位系统的定位精度。文献[12]提出了一种小角度近似的超短基线安装误差标定算法,并通过最小二乘法计算得到了安装误差,较好地减小了定位系统误差。文献[13]通过一种改进的自适应卡尔曼滤波器,将误差包含在校正模型中,减小了系统误差对定位精度的影响。

本文提出了一种改进四元阵列的新型基阵,有效地解决了超短基线系统进行长距离测量时产生的相位模糊问题,同时有效提升了测量精度。为了保证相邻基元之间接收声波信号相位差的精度,通过扩展卡尔曼滤波对声波信号进行了滤波。

## 1 超短基线水下定位技术

### 1.1 超短基线系统组成

水声定位系统是通过测定声波信号的传播时间

或者不同声波信号的相位差来确定水下物体的位置。而超短基线具有结构简单、灵活性强、操作方便的优点。

超短基线系统由一个换能器、声学基阵以及水下应答器组成。其中换能器是将电信号转换成声信号对外发射声波信号,应答器收到声波信号之后发射应答信号,而声学基阵则是负责接收返回的声波信号<sup>[14]</sup>。

而在本文中,因为要通过超短基线系统确定水下电缆的精确位置,所以将应答器安装在水下电缆上,而由换能器和声学基阵集成的声头则安装在带有 GPS 和姿态测量系统的船上。通过 GPS 和 SINS 组合定位确定船的精确位置<sup>[15]</sup>,由于它的定位精度较高,本文不考虑定位误差。本文使用的超短基线水下定位技术示意图如图 1 所示。

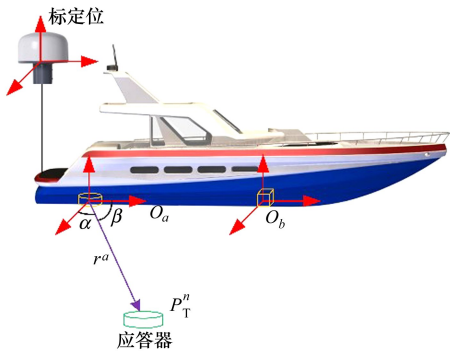


图 1 超短基线水下定位系统的结构

1.2 超短基线定位原理

超短基线确定水下物体坐标的大致过程和长、短基线系统类似,通过水下应答器和声头的斜距长度及其与以声头为原点的坐标系  $x, y, z$  轴夹角来计算水下应答器的坐标。其具体原理示意图如图 2 所示。

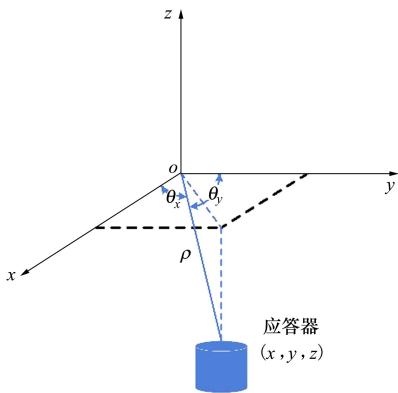


图 2 超短基线定位原理示意图

在图 2 中,  $o$  为声头的中心,同时其一般也是声学基阵的几何中心。在一般的工程中,斜距  $\rho$  通过水下的声速和信号发出到收到之间的时延计算得到,设时延为  $\Delta t$ ,水下的声速为  $c$ ,则斜距  $\rho$  的计算公式为

$$\rho = \frac{c\Delta t}{2} \tag{1}$$

而  $\theta_x$  和  $\theta_y$  是斜距与  $x$  轴、 $y$  轴之间的夹角,由于在水下中不方便测量,通常通过测量信号到基阵中不同基元的相位差计算得到。水下物体的位置坐标可以表示为  $(x, y, z)$ ,其计算公式为

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta_x \\ y = \rho \cos \theta_y \\ z = \rho \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} \end{cases} \tag{2}$$

由于高度的测量是通过水平测量的值计算得来的,往往误差较大,一般可以通过深度计来辅助测量<sup>[16]</sup>。因为超短基线基阵的尺寸很小,所以可以近似其收到的声波信号为平行的。不同基元接收到声波信号的相位差如图 3 所示。

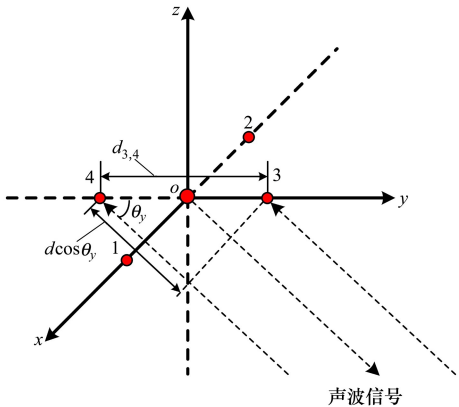


图 3 超短基线相位差示意图

由图 3 可知,基元 3、4 之间的距离为  $d_{3,4} = d$ ,设这一段水下声速为  $c$ ,声波到达同一坐标轴 2 个相邻基元的时间差为  $t$ ,则

$$d \cos \theta = ct \tag{3}$$

设声波频率为  $f$ ,波长  $\lambda$ ,则声速可以表示为

$$c = \lambda f \tag{4}$$

设  $\phi$  为声波到达不同基元时的相位差,根据振动方程  $\phi$  和频率  $f$  之间的关系,时间差可以表示为

$$t = \frac{\phi}{2\pi f} \tag{5}$$

将  $c, t$  代入公式(3) 中可得声波信号和坐标轴的夹角可以表示为

$$\cos\theta = \frac{\lambda\phi}{2\pi d} \quad (6)$$

以基元 1,2 为例分析传统超短基线系统的定位精度。基元 1,2 接收信号的相位差  $\phi_{1,2}$  为

$$\phi_{1,2} = \frac{2\pi d \cos\theta}{\lambda} = \frac{2\pi dx}{\rho\lambda} \quad (7)$$

根据公式(7)可以得到目标  $x$  坐标的测量误差  $\Delta x$  为各个可能产生误差的部分求偏导之和

$$\Delta x = \frac{\lambda\rho}{2\pi d} \Delta\phi_{1,2} + \frac{\phi_{1,2}\rho}{2\pi d} \Delta\lambda + \frac{\lambda\phi_{1,2}}{2\pi d} \Delta\rho - \frac{\lambda\phi_{1,2}\rho}{2\pi d^2} \Delta d \quad (8)$$

在只有  $\phi_{1,2}$  存在误差的情况下,  $x$  轴定位误差为

$$\frac{\Delta x}{\rho} = \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\phi_{1,2} \quad (9)$$

定位精度受到基元 1,2 间距的限制, 最高为

$$\frac{\Delta x}{\rho} = \frac{\Delta\phi_{1,2}}{\pi} \quad (10)$$

因此, 在未考虑其他误差的情况下, 当相位测量误差的单位为度时, 传统超短基线定位精度最高可达斜距的 0.556%。这是传统超短基线阵面临的技术困难, 即由相位测量模糊导致系统的定位精度受到限制。

## 2 改进四元基阵超短基线定位系统

### 2.1 非等距四元基阵结构

针对传统超短基线定位精度低的问题, 采用阵形如图 4 所示的八元超短基线阵解决传统超短基线定位精度低的问题。图 4 所示八元阵是由 2 个十字正交的直线阵构成, 同轴上相邻最近的 2 个阵元间距  $d = 0.4\lambda$ , 最大间距  $L = 8d$ 。通过采用同轴上最远的 2 个 1,4 阵元和 5,8 阵元对目标分别进行  $x$  轴及  $y$  轴方向的定位, 提高了定位精度。

本文在此新型阵型的前提下进行改进, 减小了基元数量, 使得相邻基元不等距, 如图 5 所示。

和八元基阵类似, 基元 1,2 和基元 1,4 之间的距离是基元 1,3 之间的 8 倍, 即  $L = 8l$ 。由于基元 1,3 之间的距离较短, 一般不会产生相位多值问题。假设基元 1,2 或基元 1,4 之间距离对应的相位差可以表示为  $2k\pi + \Delta\phi_0$ , 其中  $k$  可以通过基元 1,3 之间相位差确定, 具体的方法在下文中详细阐述。

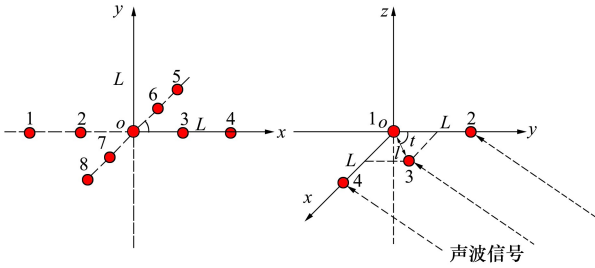


图 4 改进的八元基阵示意图

### 2.2 改进四元阵列的位置解算

由公式(7)可以得到斜距  $\rho$  在  $x$  轴和在基元 1,3 方向上的投影为:

$$P_L = \frac{\lambda\phi_{1,4}\rho}{2\pi L} \quad (11)$$

$$P_l = \frac{\lambda\phi_{1,3}\rho}{2\pi l} \quad (12)$$

由于基元 1,3 之间的距离较短, 导致  $\phi_{1,3}$  不存在相位多值模糊。为了计算简便, 将声波信号投影到  $xoy$  平面上, 在这个平面上计算相位差和投影之间的关系。投影结果如图 6 所示。

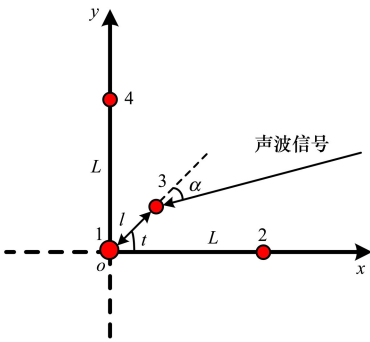


图 6 改进的四元基阵二维示意图

设基元 1,3 和声波信号之间的夹角为  $\alpha_{1,3}$ , 则其在  $x, y$  轴上的投影相对于基元 1,4 和基元 1,2 的方位角分别为

$$\begin{cases} \alpha_{1,3_x} = \pi/4 + \alpha_{1,3} \\ \alpha_{1,3_y} = \pi/4 - \alpha_{1,3} \end{cases} \quad (13)$$

$x$  方向: 有效间距  $d = l - \cos\pi/4$ ,  $y$  方向: 有效间距  $d = l - \sin\pi/4$ , 由公式(7) 可得声波信号通过基元 1,3 在  $x, y$  轴的相位差为

$$\begin{cases} \phi_{1,3_x} = \frac{2\pi l \cos\alpha_{1,3_x} \cos(\pi/4)}{\lambda} \\ \phi_{1,3_y} = \frac{2\pi l \cos\alpha_{1,3_y} \sin(\pi/4)}{\lambda} \end{cases} \quad (14)$$

根据基元间的距离关系  $L = 8l$ ,通过直接测量和间接计算得到  $\alpha_{1,2} \approx \alpha_{1,3_x}, \alpha_{1,4} \approx \alpha_{1,3_y}$  则声波信号分别通过基元 1,2 和基元 1,4 的相位差为

$$\begin{cases} \phi_{1,2} = \frac{2\pi \cdot 8l \cos \alpha_{1,2}}{\lambda} = 8\sqrt{2} \phi_{1,3_x} \\ \phi_{1,4} = \frac{2\pi \cdot 8l \cos \alpha_{1,4}}{\lambda} = 8\sqrt{2} \phi_{1,3_y} \end{cases} \quad (15)$$

因为相位的测量区间为  $[-\pi, \pi]$ , 所以当  $|\phi_{1,3_x}| > \frac{\pi}{8\sqrt{2}}$  时,  $\phi_{1,2}$  即位于多值区间。此时  $\phi_{1,2}$  真实的测量值应该为

$$\phi_{1,2} = \phi_{1,2_0} + 2k\pi, k = 0, 1, 2, 3 \cdots \quad (16)$$

当  $\phi_{1,2}$  和  $8\sqrt{2}\phi_{1,3_x}$  的差值在  $[-\pi, \pi]$  之间时, 得到的  $\phi_{1,2}$  即为真实的测量值。这样, 便通过间接计算方式消除了相位多值模糊。

实际操作时可用(17)式对  $\phi_{1,2}$  和  $\phi_{1,4}$  进行相位补偿

$$\begin{cases} \phi_{1,2_c} = 2\pi \cdot \text{round}\left(\frac{8\sqrt{2}\phi_{1,3_x}}{2\pi}\right) + \phi_{1,2} \\ \phi_{1,3_c} = 2\pi \cdot \text{round}\left(\frac{8\sqrt{2}\phi_{1,3_y}}{2\pi}\right) + \phi_{3,4} \end{cases} \quad (17)$$

公式(17)中,  $\text{round}()$  为四舍五入取整运算, 此时  $\phi_{1,2_c}, \phi_{1,3_c}$  通过相位补偿后已无相位模糊问题。

因此, 在只有  $\phi_{1,2}$  存在误差的情况下, 根据新阵型的几何参数, 最高的定位精度为

$$\frac{\Delta\phi_{1,2}}{8\pi} \leq \frac{\Delta\phi_{1,2}\lambda}{2\pi \cdot 8d} \leq \frac{\Delta x}{\rho} \quad (18)$$

同样, 对上述数值例子来说, 当相位测量误差的单位为度时, 在未考虑其他误差时, 新基阵定位精度最高能够达到斜距的 0.069 5%, 定位精度改善程度与已有八元阵相同。

### 2.3 方位角度测量对相位误差影响分析

上述分析都是基于测量所得  $\alpha_{1,2} \approx \alpha_{1,3_x}, \alpha_{1,4} \approx \alpha_{1,3_y}$  无误差时的相位补偿, 对于角度  $\alpha$  存在误差的情况分析如下。

当角度  $\alpha$  存在  $\Delta\alpha$  误差时, 由公式(15) 可得

$$\tilde{\phi}_{1,3_x} = \frac{2\pi d \cos(\pi/4) \cos(\alpha_{1,3_x} + \Delta\alpha)}{\lambda} \quad (19)$$

由三角关系变换, (19) 式可变为

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{1,3_x} &= \frac{2\pi d \cos(\pi/4) (\cos\alpha_{1,3_x} \cos\Delta\alpha - \sin\alpha_{1,3_x} \sin\Delta\alpha)}{\lambda} = \\ &\phi_{1,3_x} \cos\Delta\alpha - \frac{\sqrt{2}\pi d \sin\alpha_{1,3_x} \sin\Delta\alpha}{\lambda} = \\ &\phi_{1,3_x} - \frac{\sqrt{2}\pi d \sin\alpha_{1,3_x} \Delta\alpha}{\lambda} \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $\alpha$  比较小, 所以  $\sin\alpha$  可以用  $\alpha$  代替。

由公式(16) 和公式(20) 可得, 角度误差对基元 3,2 间相位差影响为

$$\tilde{\phi}_{1,2} = 8\sqrt{2}\phi_{1,3_x} \approx 8\sqrt{2}\phi_{1,3_x} - \frac{16\pi d \sin\alpha_{1,3_x} \Delta\alpha}{\lambda} \quad (21)$$

由公式(22) 可得  $\bar{\phi}_{1,2}$  额外相位差为

$$\Delta\bar{\phi}_{1,2} = \left| -\frac{16\pi d \sin\alpha_{1,3_x} \Delta\alpha}{\lambda} \right| \leq 8\pi\Delta\alpha \quad (22)$$

当  $\Delta\alpha = 1^\circ$  时, 可得

$$\Delta\bar{\phi}_{1,2} \leq 0.438 \ 65 \leq 2\pi \quad (23)$$

由此可见, 在角度  $\alpha$  存在误差  $\Delta\alpha$  不大时, 通过公式(16) 对基元 1,2 进行相位补偿不会出现额外  $2\pi$  相位差模糊; 同理, 对基元 3,4 也是一样的。

## 3 仿真实验

### 3.1 采样频率对定位精度的影响分析

采样频率相同时, 不同的信噪比(SNR) 会导致降噪效果不同; 通常 SNR 越高, 效果越好。但在系统噪声背景基本稳定的前提下, 提升 SNR 需要相应增加发射功率。本文研究不同 SNR 下, 系统的定位精度和信号处理所需时间。由此, 可在维持特定噪声环境的条件下, 为满足应用需求精度与时效配置最优发射功率提供依据。

本文将采样频率设置为 2 kHz, 将信噪比(SNR) 从 16 dB 调制至 22 dB, 分别通过信号处理中常用的低通滤波器、自适应残差滤波和卡尔曼滤波在 7 个不同的采样频率下对信号进行降噪。本文在图 9 中显示了 3 种方法在不同信噪比下的相位误差。

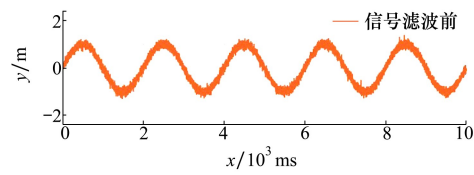


图 7 滤波前的声波信号

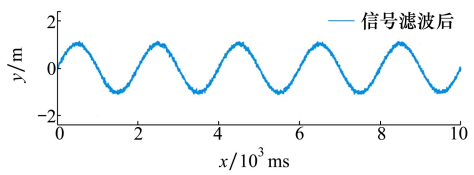


图 8 滤波后的声波信号

通过扩展卡尔曼滤波对声波信号进行降噪之后,得到的声波信号如图 8 所示。

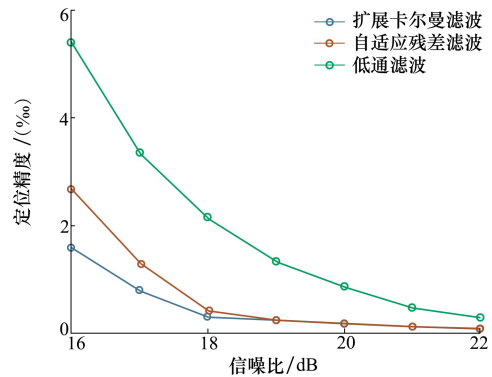


图 9 不同信噪比下不同方法相位误差

表 1 不同滤波器在不同信噪比 (SNR) 的相位误差 %

| 方法      | $R_{SN}$ |         |         |         |         |         |         |
|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | 16       | 17      | 18      | 19      | 20      | 21      | 22      |
| 低通滤波    | 5.393 7  | 3.350 5 | 2.154 3 | 1.346 4 | 0.887 5 | 0.486 9 | 0.302 5 |
| 自适应残差滤波 | 2.684 5  | 1.332 3 | 0.442 3 | 0.263 4 | 0.200 8 | 0.145 3 | 0.092 2 |
| 扩展卡尔曼滤波 | 1.590 5  | 0.808 5 | 0.319 7 | 0.256 8 | 0.191 5 | 0.133 4 | 0.084 5 |

从图 9 和表 1 中可以看出,基于扩展卡尔曼滤波的定位系统在 3 种方法中具有最高的精度。相对于低通滤波和自适应残差滤波,该方法可使定位精度提高。特别是当信噪比低于 20 时,改善非常明显。所以在下面的仿真中,以处理最小均方误差的规则作为最佳的估计标准,并采用扩展卡尔曼滤波器,以尽量减少声波中噪声的影响。

3.2 改进四元基阵定位仿真

为了验证相对于传统基阵,改进基阵测量所得基元间相位差的精度提升,设计了如下的仿真实验。为了尽量实现测量船在多个角度的测量,测量船以半径为  $r$  圆形的轨迹绕待测应答器运动,实现了在  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  每隔角度  $\Delta\gamma$  测量应答器坐标。具体测量的示意图如图 10 所示。

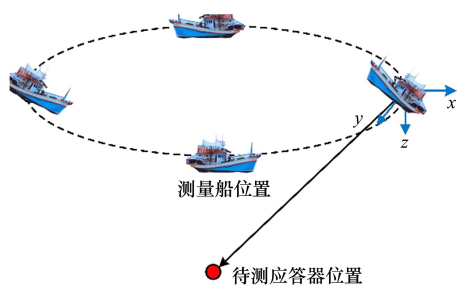


图 10 测量船的测量轨迹示意图

换能器发出的声波信号的频率为  $f_0$ , 长度为  $T_w$ 。另外,假设背景噪声为带宽  $f$  的高斯白噪声。假设在海洋中的声波速度不变,为  $c$ , 采样率为  $f_s$ 。声波信号通过扩展卡尔曼滤波降噪。与改进四元基阵对比的传统基阵基元之间的距离为  $d$ 。仿真的相关参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设计表

| 参数                        | 值     | 参数                                 | 值     |
|---------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| $d/\text{cm}$             | 4     | $l/\text{cm}$                      | 4     |
| $r/\text{m}$              | 8 000 | $z_m/\text{m}$                     | 600   |
| $\Delta\gamma/(^{\circ})$ | 18    | $c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 1 500 |
| $f_s/\text{kHz}$          | 2     | $f_0/\text{kHz}$                   | 2     |
| $T_w/\text{ms}$           | 5     | $f/\text{kHz}$                     | 2     |

设置信号的信噪比为 15~30 dB,对于每个信噪比,分别采用改进四元基阵和传统基阵对应答器进行 100 次定位。为了实现 2 种基阵定位效果的对比,通过控制变量法,只考虑相位测量上的误差。测量船绕应答器 1 圈的测量位置 and 对应答器的定位结果如图 11 所示。

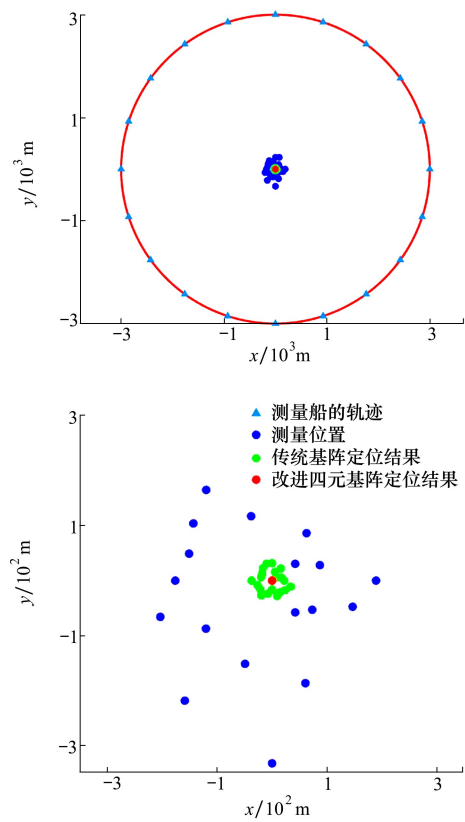


图 11 2 种阵型定位结果

表 3 信噪比分别为 15~30 dB 时 2 种阵型定位误差 %

| 信噪比/dB | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ |
|--------|------------|------------|------------|
| 15     | 59.35      | 8.397      | 8.396      |
| 20     | 58.98      | 8.202      | 8.200      |
| 25     | 57.25      | 8.187      | 8.186      |
| 30     | 55.23      | 7.235      | 7.321      |

由 2 种基阵对应答器的定位结果可知,改进四元基阵的定位误差低于传统基阵的定位误差,且在不同的信噪比下,定位精度均提升了近 8 倍。

加入改进八元基阵的定位结果,在不同信噪比下的定位精度如表 3 和图 12~15 所示。可以得到改进四元基阵和改进八元基阵的定位精度大致相同。而通过不同信噪比的定位精度对比,可以得出,在超短基线定位系统基元阵型一样时,提高声波信号的信噪比可以减小水下的定位误差,如果在噪声不变的情况下,可以通过提高声波信号的功率来实现。

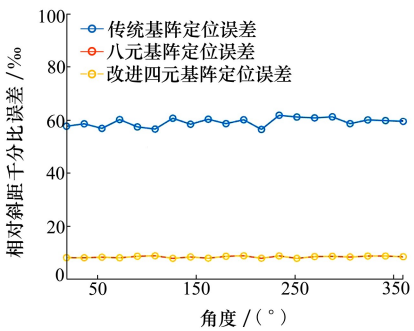


图 12 信噪比为 15 dB 时的 3 种基阵定位误差

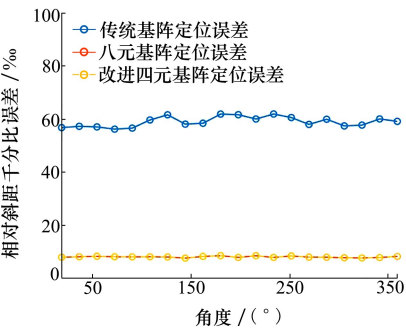


图 13 信噪比为 20 dB 时的 3 种基阵定位误差

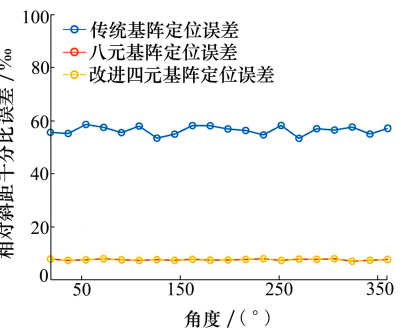


图 14 信噪比为 25 dB 时的 3 种基阵定位误差

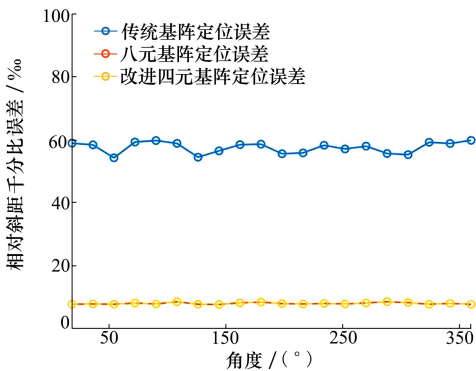


图 15 信噪比为 30 dB 时的 3 种基阵定位误差

4 结 论

针对超短基线系统在进行较远距离的定位时的相位模糊问题,提出了一种改进新型四元基阵。该方法通过改变四元基阵中一个基元的位置,有效地提高了基阵定位的精度,减小了相位模糊问题。而针对接收到的声波信号由于噪声导致的相位差测量误差,通过扩展卡尔曼滤波对信号进行了滤波,有效地提升了相位差测量的精度。在仿真中,利用最小

二乘法解算出了应答器的准确位置,作为对照,将改进四元基阵与传统基阵和改进八元基阵的定位结果进行了对比,得到的定位结果精度提升了将近一个数量级。

## 参考文献:

- [1] XU B, WANG X, ZHANG J, et al. Maximum current ropy delay Kalman filter for SINS/USBL integrated navigation[J]. ISA Transactions, 2021, 117: 274-287
- [2] 赵安邦, 何文翔, 董海防, 等. 声速分布深海超短基线定位算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4763-4767  
ZHAO Anbang, HE Wenxiang, DONG Haifang, et al. Deep sea ultra short baseline positioning algorithm with sound velocity distribution[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4763-4767 (in Chinese)
- [3] LIU H, WANG Z, SHAN R, et al. Research into the integrated navigation of a deep-sea towed vehicle with USBL/DVL and pressure gauge[J]. Applied Acoustics, 2020, 159: 107052
- [4] 罗才智, 杨鲲, 辛明真, 等. 抗差卡尔曼滤波及其在超短基线水下定位中的应用[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(5): 46-52  
LUO Caizhi, YANG Kun, XIN Mingzhen, et al. Robust Kalman filtering and its application in ultra short baseline underwater positioning[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(5): 46-52 (in Chinese)
- [5] DAJUN S, JIA G, JUCHENG Z, et al. Design of high accuracy ultra short baseline underwater acoustic position system[C]//2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2017: 1-4
- [6] LEE H, KIM K, CHUNG T, et al. Deep learning-based ultra short baseline underwater positioning[C]//2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, 2023: 856-859
- [7] 王燕, 李晴, 付进, 等. 超短基线定位系统融合分类解模糊技术研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1348-1354  
WANG Yan, LI Qing, FU Jin, et al. Research on fusion classification and deblurring technology for ultra short baseline positioning systems[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2017, 39(6): 1348-1354 (in Chinese)
- [8] 李海鹏, 韩云峰, 郑翠娥. 声速修正技术在高精度水下定位系统中的应用[J]. 导航定位学报, 2020, 8(3): 47-52  
LI Haipeng, HAN Yunfeng, ZHENG Cui'e. Application of sound velocity correction technology in high-precision underwater positioning systems[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(3): 47-52 (in Chinese)
- [9] 张居成, 郑翠娥, 孙大军. 用于声线跟踪定位的自适应分层方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(12): 1497-1501  
ZHANG Jucheng, ZHENG Cui'e, SUN Dajun. Adaptive layered method for acoustic line tracking and localization[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(12): 1497-1501 (in Chinese)
- [10] 黄健, 严胜刚. 基于区域划分自适应粒子群优化的超短基线定位算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 2023-2030  
HUANG Jian, YAN Shenggang. Ultrashort baseline localization algorithm based on region partition adaptive particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 2023-2030 (in Chinese)
- [11] 黄敏燕, 尹飞星, 刘斌. 超短基线定位系统声线弯曲误差修正方法研究[C]//2016年全国声学学术会议论文集, 2016: 4  
HUANG Minyan, YIN Feixing, LIU Bin. Research on the correction method of sound line bending error in ultra short baseline positioning system[C]//Proceedings of the 2016 National Acoustics Academic, 2016: 4 (in Chinese)
- [12] 张涛, 翁铨铨, 李默涵, 等. 一种 SINS/超短基线组合定位系统安装误差标定算法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(3): 349-356  
ZHANG Tao, WENG Chengcheng, LI Mohan, et al. A calibration algorithm for installation error of SINS/ultra short baseline integrated positioning system[J]. Journal of Inertial Technology of China, 2019, 27(3): 349-356 (in Chinese)
- [13] XIA M, ZHANG T, WANG J, et al. The fine calibration of the ultra-short baseline system with inaccurate measurement noise covariance matrix[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 1-8
- [14] 罗宇, 王晶静, 施剑. 超短基线水声定位系统误差校准方法综述[J]. 产业创新研究, 2022(10): 114-117  
LUO Yu, WANG Jingjing, SHI Jian. Overview of error calibration methods for ultra short baseline underwater acoustic positioning systems[J]. Industrial Innovation Research, 2022(10): 114-117 (in Chinese)
- [15] 余白石, 王占勇. 基于最小二乘法的超短基线水声定位系统校准方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(5): 408-415  
YU Baishi, WANG Zhanyong. Calibration method for ultra short baseline underwater acoustic positioning system based on least

squares method[J]. Digital Ocean and Underwater Attack and Defense, 2020,3(5): 408-415 (in Chinese)

[16] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 超短基线定位技术及在海洋工程中的应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 8-20

JIN Bonan, XU Xiaosu, ZHANG Tao, et al. Ultra short baseline positioning technology and its application in ocean engineering [J]. Navigation, Positioning and Timing, 2018, 5(4): 8-20 (in Chinese)

# Study on ultra short baseline positioning system based on improved quad array and extended Kalman filter

HE Xutao<sup>1,2</sup>, XIE Long<sup>1,2</sup>, XU Haining<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, WANG Jianbo<sup>3</sup>

1.State Grid Zhoushan Power Supply Company, Zhoushan 316021, China;

2.Zhejiang Zhoushan Marine Power Research Institute Co., Ltd., Zhoushan 316021, China;

3.Shaanxi Hard Equipment Technology Co., Ltd., Xi'an 710086, China

**Abstract:** Ultra-short baseline equipment has been widely used in underwater positioning because of its small size and flexible use. In order to eliminate the phase ambiguity in the long distance measurement of ultra-short baseline system, an improved four-element array is proposed, which solves the above-mentioned problem effectively and improves the positioning accuracy. At the same time, in order to improve the precision of the phase difference between the measured elements, the acoustic signal is denoised by using the extended Kalman filter. The simulation results show that comparing with the traditional matrix, the improved four-element matrix improves the positioning accuracy by nearly one order of magnitude, and effectively reduces the number of primitives comparing with the improved eight-element matrix.

**Keywords:** ultra short baseline system; underwater positioning; quaternion orthogonal array; extended Kalman filtering

**引用格式:**何旭涛, 谢龙, 徐海宁, 等. 基于改进四元基阵的超短基线定位系统研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(3): 592-599

HE Xutao, XIE Long, XU Haining, et al. Study on ultra short baseline positioning system based on improved quad array and extended Kalman filter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(3): 592-599 (in Chinese)