

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312301

基于 TDOA 的水下泄漏气泡定向方法*

王全增¹, 封 皓¹, 沙 洲¹, 赵云峰²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 国家管网集团北方管道公司
技术支持中心 廊坊 065000)

摘 要:本文提出一种利用立体五元水听器阵列对水下泄漏气泡进行三维定向的方法。首先,通过理论分析和仿真研究了四元平面阵、五元平面阵和五元立体阵定向误差与时延、声速和声源位置的关系,对比了 3 种阵列的定向误差,结果表明五元立体阵不受声速误差影响,受到时延误差和声源位置影响较小,定向效果最好。搭建阵列半径 20 cm 的水听器阵列在水箱中进行实验,使用四元平面阵和五元立体阵采集 4 个位置的气泡声信号,以声信号第一个波峰作为声音首次到达时间参考点来计算时延,对每个位置进行 10 次方向估计,实验结果显示两种阵列方位角估计精度相近,五元立体阵俯仰角估计效果优于四元平面阵,方位角和俯仰角的平均定向误差在 4° 以下,与理论分析相符。因此,五元立体水听器阵列能够估计不同位置泄漏点的方位角和俯仰角,在水下环境中可以实现基于气泡声信号漏点定向。

关键词: 气泡泄漏; 水听器阵列; 五元立体阵; 三维定向

中图分类号: TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Underwater leakage bubble orientation method based on TDOA

Wang Quanzeng¹, Feng Hao¹, Sha Zhou¹, Zhao Yunfeng²

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Technical Support Center, Pipe China North Pipeline Company, Langfang 065000, China)

Abstract: This article proposes a method of three-dimensional orientation of underwater leaking bubbles using a three-dimensional five-element hydrophone array. First, the orientation errors of the four-element planar array, five-element planar array, and the five-element stereo array are analyzed theoretically and simulated, and the relationships among the orientation errors, time delay, sound speed, and source position are compared. The results show that the five-element stereo hydrophone array is not affected by the sound speed error, has a smaller influence from the time delay error and source position, and has the best orientation effect. A hydrophone array with a radius of 20 cm is set up in a tank for experimentation. The four-element planar array and the five-element stereo array are used to collect sound signals from four positions of bubbles, and the first peak of the sound signal is used as the reference point for the first arrival time to calculate the delay. Ten direction estimates are made for each position. The experimental results show that the azimuth angle estimation accuracy of the two arrays is similar, the elevation angle estimation effect of the five-element stereo array is better than that of the four-element planar array, and the average orientation error of azimuth angle and elevation angle is less than 4°, which is consistent with the theoretical analysis. Therefore, the five-element stereo hydrophone array can estimate the azimuth angle and elevation angle of the leakage point at different positions, and can realize leakage point orientation based on bubble sound signals in the underwater environment.

Keywords: bubble leakage; hydrophone array; five-element array; three-dimensional orientation

0 引 言

海底天然气管道是能源运输、储存的重要组成部分,当管道损坏发生泄漏时,会产生经济损失和污染环境^[1]。因此,需要关注海底管道泄漏问题,对水下气体泄漏进行快速准确的定位至关重要。泄漏造成的气泡溢出会产生微弱的声音信号,声音在水下具有良好的传播特性,因此基于传感器阵列对泄漏定位具有巨大的应用前景。

许多研究人员对气泡声学信号的产生机制和传播过程展开大量研究,气泡脱离泄漏孔时的“夹断”效应是气泡产生声脉冲的主要原因^[2],杜非^[3]指出水下气泡泄漏为周期性突发信号,并研究了其声学特性。Liu 等^[4]研究不同形状泄漏孔产生气泡的时频声学特性,发现气泡中心频率都在 1 kHz 附近。

目前,基于传感器阵列的源定位方法大致可分为接收信号强度(received signal strength, RSS)^[5],到达角度(direction of arrival, DOA)和到达时间差(time difference of arrival, TDOA)等。一般来说,RSS 具有计算简单、设备复杂度低的优点,但是该方法需要事先了解信号源的强度,Mahmutoglu 等^[6]利用方程计算模拟从泄漏孔到接收器的声压信号对海底直管道泄漏孔进行一维定位,但是只考虑了视距传播模型,水下极端多变的环境使得水下声波衰减模型难以精确获得,因此 RSS 测量很少被用于水下声学定位。波束成形是一种典型的 DOA 方法,已广泛应用于声成像和声源定位^[7],Zhang 等^[8]利用波束成形方法实现了对水下气泡方位角定向,但实验只研究了泄漏孔与水听器阵列处于同一水平面的情况,并没有对俯仰角进行定向。传统的波束成形方法都是在二维声场对声源定向,为获取精确的三维位置则需要大量复杂运算^[9-10],不适用于实时系统。基于 TDOA 的声源定位方法是一种可以利用较少传感器即可实现三维定位的方法,如屈秉男等^[11]使用四元十字阵来对炮弹落点进行定向,行鸿彦、程方晓等^[12-13]用 4 个麦克风实现了空间声源的实时定位。该方法通过声波信号到达不同传感器阵元的时差,再结合阵列与声源的几何关系联立方程得到声源坐标。基于 TDOA 的声源定位方法在有一定噪声和反射的环境下具有较高的定位精度,计算量远小于波束成形方法。然而目前 TDOA 算法大多应用于空气中的声学定位,对水下声源定向的研究较少,而且多为单一阵列定向,缺乏不同阵列间的对比和对影响定向精度因素的直观分析。

本文提出了一种利用水听器阵列对水下泄漏气泡三维空间定向的方法。通过理论分析与仿真研究了不同阵列结构的误差影响因素及定向效果,结果表明立体阵

列的俯仰角定向效果优于平面阵列。设计了五元立体水听器阵列,在水箱中对定向算法验证。

1 阵列定向算法

阵列定位中比较常用的有四元平面阵、五元平面阵和五元立体阵等,如图 1 所示。阵元数量越多,算法复杂度越高,会增加系统处理数据负担^[14],上述 3 种阵列结构简单且易于搭建模型,因此对其进行对比研究。

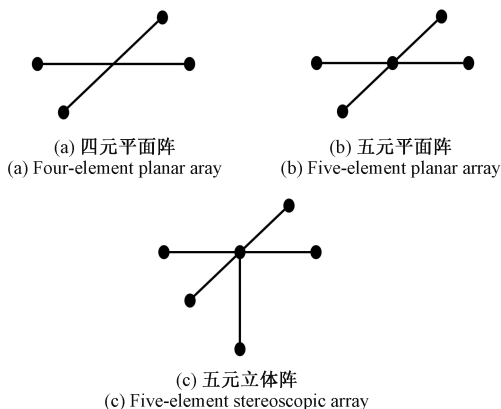


图 1 阵列示意图

Fig. 1 Array diagram

平面阵列对平面上的方位角有很好的定向效果,如果拓展到空间上,就需要对阵列增加一个维度变为立体阵。虽然单个阵列能有效地估计声源方向,但是对距离的估计精度误差较大,仍未达到可以实际应用的水平^[15],因此本节仅推导定向算法,而不对距离估计研究。

1.1 五元立体阵

建立如图 2 所示坐标系, $S_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 表示 5 个水听器。水听器 S_1, S_2, S_3, S_4 分别在 XY 轴 4 个半轴上,且由 X 正半轴开始逆时针分布构成平面阵,水听器 S_5 在 Z 轴负半轴,阵列中心位于坐标原点。5 个水听器与坐标原点距离相同,定义该距离为阵列半径 D ,因此坐标分别为 $S_1(D, 0, 0), S_2(0, D, 0), S_3(-D, 0, 0), S_4(0, -D, 0), S_5(0, 0, -D)$,用符号表示为 $S_i(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。声源 $T(x, y, z)$ 到坐标原点的距离为 r ,到第 i 号水听器的距离为 $r_i (i = 1, 2, 3, 4)$,其相对于阵列中心的方位角为 φ ,俯仰角为 θ 。

以 5 号水听器为基准,声源到两个水听器的声程差与时延差的关系为:

$$\begin{cases} d_{51} = c \times t_{51} \\ d_{52} = c \times t_{52} \\ d_{53} = c \times t_{53} \\ d_{54} = c \times t_{54} \end{cases} \quad (1)$$

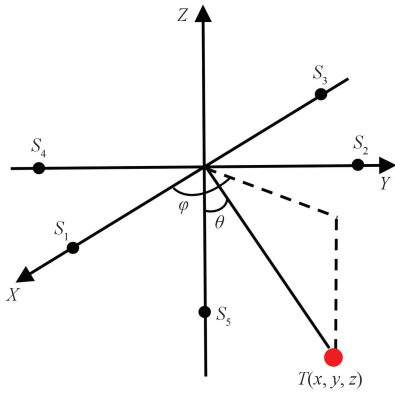


图2 五元立体阵

Fig. 2 Five-element stereoscopic array

其中, c 为水下声速, $d_{si} = r_i - r_5$ 为声源到第 i 号水听器与 5 号水听器的声程差, t_{si} 为声源到第 i 号水听器落后于到 5 号水听器的时间差。根据空间距离关系可得到方程组:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ ((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (r_5 + d_{si})^2 \end{cases} \quad (2)$$

直角坐标系与球坐标系的转换公式:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

联立上面公式, 将式 (1) 和 (3) 代入式 (2), 消去未知量, 得到只包含时延值的五元立体阵估计的目标方位角和俯仰角公式:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{t_{54} - t_{52}}{t_{53} - t_{51}}\right) \\ \theta = \arctan\left(-\frac{2\sqrt{(t_{52} - t_{54})^2 + (t_{53} - t_{51})^2}}{t_{51} + t_{52} + t_{53} + t_{54}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 平面阵

四元平面阵相当于五元立体阵去掉 5 号水听器, 五元平面阵相当于把 5 号水听器放在阵列中心, 根据上述几何推导可得, 四元平面阵目标方向估计公式为:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{t_{14} - t_{12}}{t_{13}}\right) \\ \theta = \arcsin\left(\frac{c\sqrt{(t_{12} - t_{14})^2 + t_{13}^2}}{2D}\right) \end{cases} \quad (5)$$

五元平面阵目标方向估计公式为:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{t_{54} - t_{52}}{t_{53} - t_{51}}\right) \\ \theta = \arcsin\left(\frac{c\sqrt{(t_{53} - t_{51})^2 + (t_{54} - t_{52})^2}}{2D}\right) \end{cases} \quad (6)$$

由公式可知, 平面阵阵型的缺陷导致俯仰角估算公式无法消去变量 c 和 D 。

2 误差分析

由上节可知, 阵列定向算法的性能可能受到诸多因素的影响, 不同阵列结构的效果会有差别, 而公式中的参数(声速 c 和阵列半径 D 和时延 t) 误差同样也会直接影响定向结果。在实际实验中, 阵元间距通过调节可以尽可能减小误差, 而声速误差和时延误差不可控, 因此本节将对这两种因素进行分析。

2.1 时延误差和声源位置对定向精度的影响

水平方向的定向取决于平面上的几个阵元, 计算式中的分子分母项实际上分别能转化为 t_{24} 和 t_{13} , 因此 3 种阵列的方位角定向效果接近。根据误差估计理论推导^[16-17], 可以得到时延估计误差与 3 个阵列的方位角定向误差关系为:

$$\sigma_\varphi = \frac{c}{2D \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \sigma_\tau \quad (7)$$

与俯仰角定向误差关系分别为:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta 1} = \frac{c\sqrt{1 + \sin^2 \varphi}}{2D \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \sigma_\tau \\ \sigma_{\theta 2} = \frac{c}{2D \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \sigma_\tau \\ \sigma_{\theta 3} = \frac{c\sqrt{1 + \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}}{2D} \sigma_\tau \end{cases} \quad (8)$$

其中, σ_τ 为每个时延误差的标准差, 且相互独立。 σ_φ 为 3 个阵列的方位角误差标准差, $\sigma_{\theta 1}$ 、 $\sigma_{\theta 2}$ 、 $\sigma_{\theta 3}$ 分别为四元平面阵、五元平面阵和五元立体阵俯仰角误差标准差, φ 为声源相对于阵列中心的方位角, θ 为声源与水平面的夹角。

由式 (8) 可知, 不同阵列定向误差与声速取值、阵列半径和时延误差有关, 减小时延误差或增大阵列半径都可以降低定向误差, 也受到声源位置的影响。假设水下声速 $c = 1500$ m/s, 阵列半径 $D = 20$ cm, 时延估计标准差 $5 \mu\text{s}$, 图 3(a) 为 3 种阵列对不同方位的声源方位角定向误差, 图 3(b)~(d) 为俯仰角定向误差。

仿真结果显示 3 种阵列方位角误差都与俯仰角有关, 声源与水平面夹角越大, 方位角误差越大。四元平面阵列俯仰角定向误差与声源的方位角和俯仰角都有关, 相同俯仰角情况下, 方位角越接近 90° 和 270° 时误差越大; 五元平面阵和五元立体阵俯仰角定向误差只与俯仰

角有关,同一方位角情况下,声源与水平面夹角越大,俯仰角误差越小。定向误差与声源方向有关原因在于误差分析公式是方向计算公式对误差来源求偏导所得,声源在不同位置变化时,时延误差的斜率大小不同,因此方向估计公式对不同位置的时延误差敏感性不同。仿真结果中立体阵俯仰角误差远小于平面阵俯仰角误差,这是因为立体阵在 Z 轴方向添加了一个阵元,在俯仰角计算式(4)的分母部分引入了参数 t_{s_i} ($i = 1, 2, 3, 4$),增加了俯仰角计算公式对于声源竖直方向移动的敏感性, XZ 平面和 YZ 平面上分别有 3 个阵元,在三维空间进行俯仰角定向相当于在这两个平面进行方位角定向,使得五元立体阵俯仰角误差远小于平面阵。

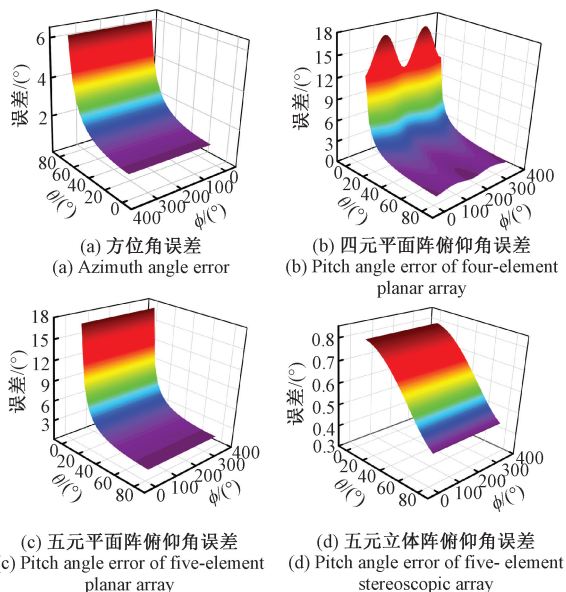


图3 声源方向对定向误差的影响

Fig. 3 The influence of sound source direction on orientation error

2.2 声速测量误差的影响

由式(4)~(6)可知,3种阵列方位角估计与声速无关,平面阵俯仰角与声速有关,声速误差与俯仰角误差关系如下:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\tan \theta}{c} \sigma_c \quad (9)$$

其中, c 为计算时声速取值, σ_c 为声速误差。图4为 $c = 1500$ m/s 时,不同俯仰角和声速误差引起的俯仰角误差。声源与水平面夹角越小、声速误差值越大,俯仰角误差越大,最大可达到 4° 。立体阵俯仰角计算公式不含 c ,避免了声速误差造成的影响。

2.3 仿真

在本节仿真研究中,将直观地对比四元平面阵、五元平面阵和五元立体阵在相同时延误差的情况下对不同方

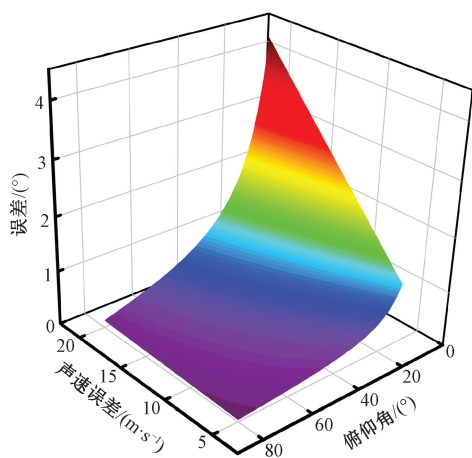


图4 声速误差对平面阵俯仰角误差的影响

Fig. 4 The influence of sound velocity error on pitch angle error

向的4个声源定向精度,验证理论分析结果。

如图5所示,模拟水听器阵列在水下对气泡泄漏定向实验。在水平面建立直角坐标系,模拟空间大小为 $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$,阵列中心距离水面 30 cm ,阵元间距为 20 cm ,5个水听器坐标分别为 $S_1(20, 0, -30)$, $S_2(0, 20, -30)$, $S_3(-20, 0, -30)$, $S_4(0, -20, -30)$, $S_5(0, 0, -50)$,单位为 cm 。

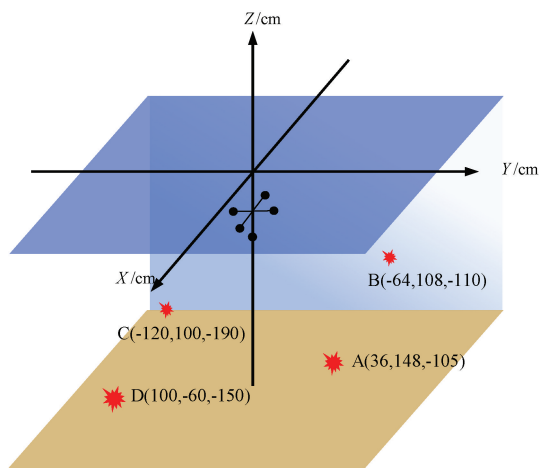


图5 水听器阵列定向模拟图

Fig. 5 Hydrophone array orientation simulation diagram

模拟泄漏孔位置 ABCD 分别在阵列平面以下 4 个象限随机分布,相对于阵列的实际位置如表1所示,俯仰角表示声源与水平面的夹角。

假设实际声速 $c = 1500$ m/s,阵列半径 $D = 20$ cm,根据泄漏孔与阵列的真实坐标计算 1~4 号水听器与 5 号水听器之间的时间延迟,在此时延上添加随机误差,误差标准差为 $5 \mu\text{s}$,呈正态分布。将带有误差的时延代入 3 种阵列算法,分别进行 1000 次蒙特卡洛计算,得到

表 1 模拟泄漏孔位置
Table 1 Simulated leak hole location

位置	坐标/cm	方位角/(°)	俯仰角/(°)
A	(36, 148, -105)	76.33	26.22
B	(-64, 108, -110)	120.65	32.51
C	(-120, -100, -190)	219.80	45.68
D	(100, -60, -150)	329.04	45.81

3 种阵列的误差箱线图对比,如图 6 所示。以声源 B 为例分析声速误差对俯仰角定向的影响,将参数 c 取 1 500 ~ 1 520 m/s 代入计算公式,得到俯仰角平均误差与声速值的关系,如图 7 所示。

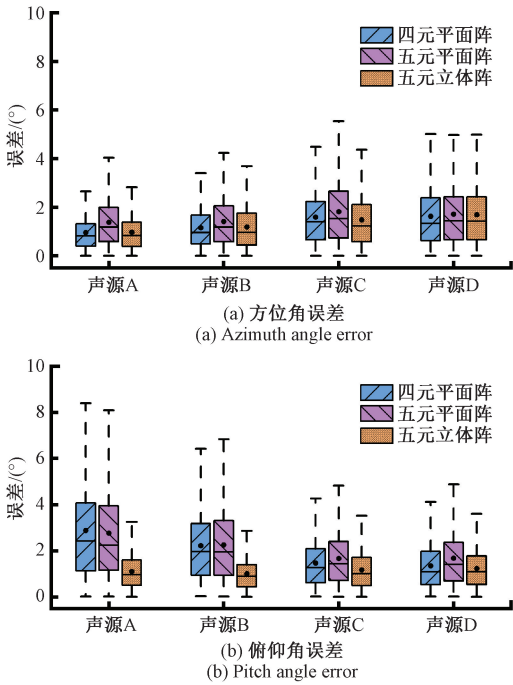


图 6 3 种阵列模拟定向结果对比图

Fig. 6 Comparison of three kinds of array simulation orientation results

仿真结果显示在 $5\text{ }\mu\text{s}$ 标准误差的时延下,3 种阵列对方位角都有较好的定向精度,平均误差在 2° 以下,且效果接近,声源 A~D 的俯仰角递增,方位角定向误差有增大的趋势。而对于俯仰角定向来说,平面阵在 4 个方向定向误差都大于立体阵,而且不同方向声源定向效果有明显差异,声源 A 与水平面夹角较小,定向误差最大,随着俯仰角增加,定向精度逐渐提升;立体五元阵误差平均值小于平面阵列,误差区间范围较小,且受到声源方向影响不明显,定向效果明显好于平面阵。随着声速误差增大,平面阵对声源 B 的俯仰角定向误差增大,20 m/s 的声速误差最大导致 0.5° 的角度计算误差,而立体阵不

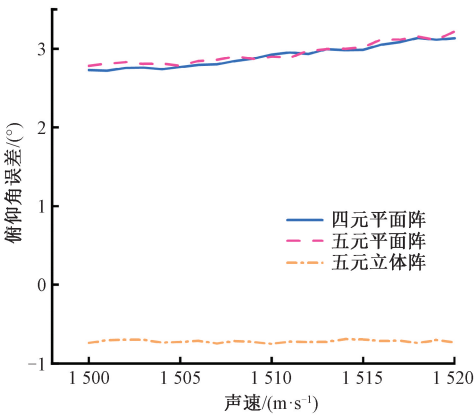


图 7 声速与声源 B 俯仰角定向误差的关系

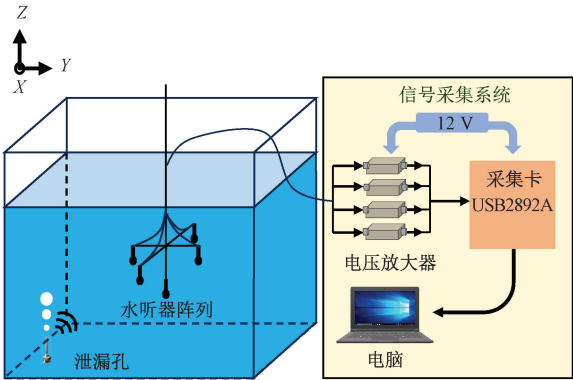
Fig. 7 Relation between sound velocity and orientation error of pitch angle of sound source B

受影响。综上考虑,为实现水下声源的三维定向,选择五元立体阵列结构。

3 实 验

3.1 实验平台

本实验在实验室大水箱中进行,场地与实验器材如图 8 所示。图 8(a) 左侧为水下采集装置示意图,泄漏孔与水听器阵列分别由 PVC 管和金属支杆固定,并安装在水箱上方滑轨上,方便调整位置。水箱为 $140\text{ cm}\times 140\text{ cm}\times$



(a) 实验场地与器材
(a) Experimental site and equipment

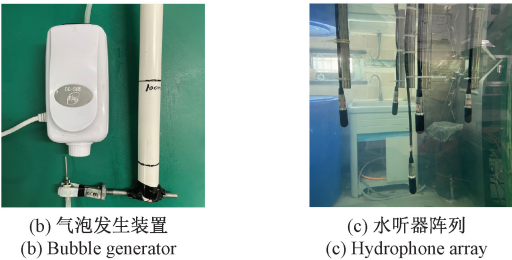


图 8 阵列定向实验平台

Fig. 8 Array orientation experiment platform

120 cm 透明钢化玻璃,水面高度为 100 cm。图 8(a) 右侧为信号采集部分。水听器采集的微弱模拟电压信号通过 40 dB 电压放大器输入同步数据采集卡,型号为阿尔泰 USB2892A,采样率为 1 MHz,采集卡将模拟信号转换为数字信号,最后将采集的数据保存在计算机中进行后续处理。图 8(b) 为气泡产生装置,由气泵与不锈钢点胶针头通过橡胶软管连接组成。经测试,针孔大小和位于水下深度与气体流量共同影响了气泡的产生速率和大小,针孔越小产生的气泡越不均匀,较大内径的针孔可以产生单一均匀气泡,因此本实验选择内径 0.72 mm,长度约为 37.5 mm 的针头。声信号由 5 个国产 LST-SH50 标量水听器(其灵敏度为 -203 ± 1.5 dB re 1 V/ μ Pa) 采集,并固定在金属支架上构成五元立体阵列结构,如图 8(c) 所示,考虑到水听器的尺寸与实验室水箱的大小,5 个阵元与阵列中心的距离都为 20 cm。

3.2 实验方案

五元立体阵去掉 5 号水听器即可看作为四元平面阵,因此可以只分析 1~4 号水听器采集的信号作为平面阵与立体阵定向效果对比。为了从多个方向测试定向方法的效果,同时减少水下壁面反射对采集信号的影响,将水听器阵列固定在水箱中央,并开展实验。具体步骤如下:

- 1) 以水面为 XY 平面,建立如图 2 所示坐标系,测量阵列中心深度为 23 cm,因此阵列中心坐标为 (0,0,-23),同时得到各阵元坐标。
- 2) 在阵列下方 4 个象限中分别选择一个位置放置气泡发生装置。
- 3) 记录 4 次气泡发生装置坐标,并根据步骤 1) 中阵列坐标计算 4 个泄漏位置相对于水听器阵列的理论方位角和俯仰角,记录结果如表 2 所示。
- 4) 设置采集卡采样率为 1 MHz,打开气泵,调整气体流量,观察水中点胶针头产生单个且平稳的气泡时采集信号。

表 2 实际泄漏孔位置

Table 2 Actual leak hole location

位置	坐标/cm	方位角/(°)	俯仰角/(°)
A	(50,40,-72)	38.66	37.43
B	(-45,35,-65)	142.13	36.38
C	(-58,-20,-80)	199.03	42.89
D	(30,-50,-90)	300.96	48.97

3.3 时延估计

使用 LabVIEW 读取采集到的信号,并在 MATLAB 处理。图 9(a) 为 1 号水听器采集的时长 1 s 的信号片段,

可以看出信号包含大量噪声,并具有周期性特点。利用 MATLAB 中 envelope 函数提取信号上包络,以检测信号突变时刻,并截取多组单个气泡信号。图 9(c) 为单个气泡信号频谱,其主要频率在 1 kHz 附近,为消除环境噪声和电磁噪声干扰,同时保留有效信息,对截取到的信号进行带通滤波处理,滤波频带设置为 500~5 000 Hz。滤波结果如图 9(b) 所示,气泡声信号可以看作一个瞬时正弦脉冲信号,持续几个周期后达到峰值,后声音消失,声音在水箱壁面不断反射并衰减被水听器接收,信号表现出正弦衰减特点。

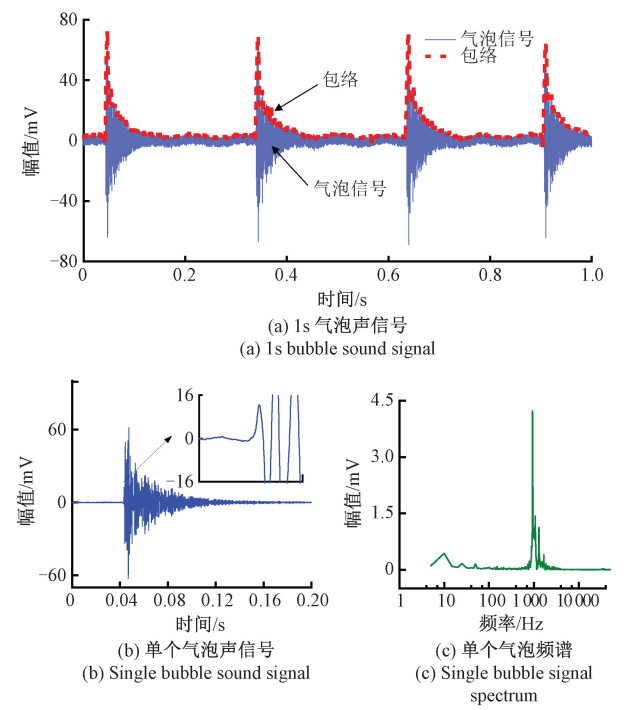


图 9 气泡声信号与频谱

Fig.9 Bubble sound signal and spectrum

基于到达时间差的声源定位算法需要估计两传感器记录的声信号到达的时间差。该值可以通过互相关函数计算,但是它依赖于波传播模型和背景噪声等先验知识,而且可能涉及到声波的反射和发散,使用此方法会导致相当大的误差。气泡声时延可以通过检测两个水听器分别接收的第 1 个脉冲信号进行计算,该信息直接反应了水听器接收到信号的时间。利用 MATLAB 中 findpeaks 函数寻找信号峰值,其原理是基于平滑的一阶导数和二阶导数的处理。它寻找信号临近的局部最大值和局部最小值,并且可以通过阈值来控制输出的峰值。

将寻找到的第 1 个声波波峰作为信号的首次到达时间。以位置 A 处采集的气泡信号为例,此时泄漏孔距离 1、2、5 号水听器较近,距离 3、4 号水听器较远,图 10 从上到下 5 条曲线分别为水听器 1~5 接收到的声信号以及

使用函数寻找到的第 1 个峰值点,水听器 1~5 分别在 0.019 619 s、0.019 623 s、0.019 774 s、0.019 743 s、0.019 608 s 时开始检测到声信号,泄漏孔附近的水听器接收到的信号到达得更早。

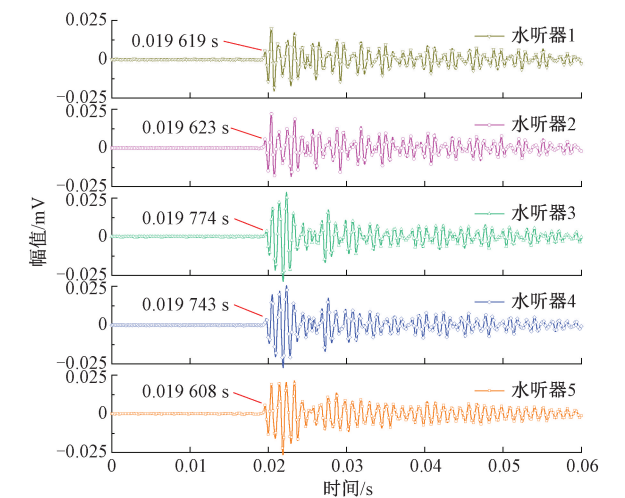


图 10 五路气泡声信号与首次到达时间
Fig. 10 Five bubble signals and first arrival time

计算两种阵列所需时延值 $t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}, t_{s4}$, 通过 $t_{li} = t_{si} - t_{s1} (i = 2, 3, 4)$ 可以计算 t_{12}, t_{13}, t_{14} , 理论时延值和实际时延值如表 3 所示。由于水听器位置误差和采集信号噪声的存在,计算时延不可避免会存在误差,此外数字采样率引起的系统误差也是造成定向误差的一个原因。使用 1 MHz 采样率时,计算时间延时的分辨率为 1 μ s,如果声速为 1 500 m/s,则会引起 0.15 cm 的距离误差。可以通过提高采样率减小该误差,但会增加实验成本与计算复杂度。对 4 个位置的声信号分别进行 10 次时延计算,得到每个时延值平均误差结果,如图 11 所示。10 次时延的平均误差都在 25 μ s 以下,能较为准确的反映水听器接收信号的时间先后关系。

表 3 声源 A 理论时延值和实际时延值
Table 3 Theoretical time delay and actual time delay of sound source A

条件	T51	T52	T53	T54
理论值	-0.000 002	0.000 017	0.000 160	0.000 146
实际值	0.000 011	0.000 015	0.000 166	0.000 135

3.4 定向结果

位置 A 的理论方位角为 38.66°, 俯仰角为 37.43°, 根据定向算法,五元立体阵估计的方位角为 37.75°, 俯仰角为 39.83°, 与真实方向误差分别为 0.91° 和 2.4°。假设声速 $c = 1\,500$ m/s, 阵列半径 $D = 20$ cm, 四元平面阵估

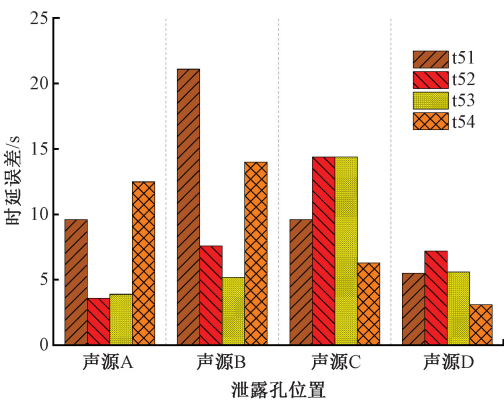


图 11 4 个位置 10 次时延平均误差
Fig. 11 Ten time delay average error of four locations

计的方位角为 37.75°, 与立体阵估计结果相同,俯仰角为 42.69°, 与理论俯仰角误差为 5.26°, 误差高于五元立体阵。

ABCD 4 个位置的 10 次定向结果误差区间如图 12 所示,图 12(a) 为方位角误差,图 12(b) 为俯仰角误差。结果显示两种阵列方位角精度相当,原因在于两种阵型利用相同的平面阵进行方位定向。两阵列俯仰角估计效果有明显差异,五元立体阵误差整体较小且更为稳定,平均误差在 4° 以下,在不同位置均能表现较好的定向效果;而四元平面阵平均误差和误差区间都比较大,且不同方向定向效果差异较大。原因有两部分,首先根据 2.1 节误差分析,声源 A 和 B 俯仰角较小,由于平面阵算法的局限性会导致较大的测向误差,其次,平面阵估计俯仰角受到声速的影响,计算时取值为 1 500 m/s,与实际声速会有一定的误差,而立体阵不受其影响。因此综合考虑方位角和俯仰角定向效果,五元立体阵优于四元平面阵。

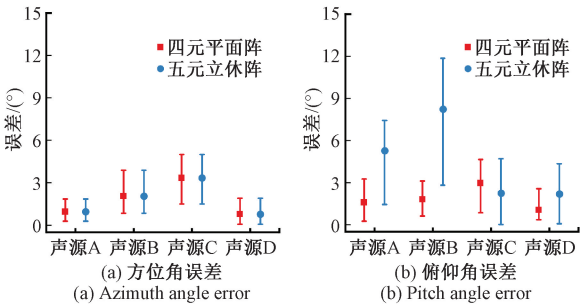


图 12 4 个位置 10 次定向误差区间
Fig. 12 Ten directional error intervals of four positions

图 13 展示了五元立体阵对 4 个位置泄漏点的 10 次定向结果,以不同符号代表不同位置声源的估计方向和实际方向,结果显示 4 个位置声源估计方向都明显聚集在实际方向附近,直观的说明了五元立体阵定向算法可以实现较为准确的泄漏源三维定向。

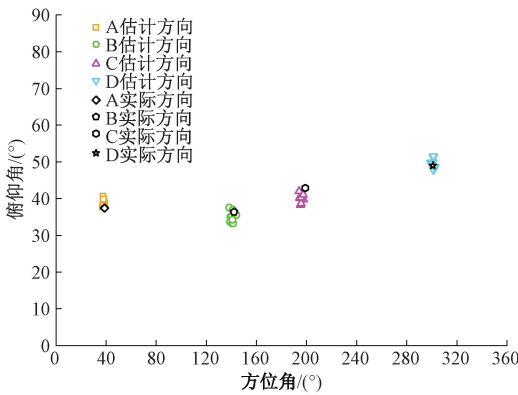


图 13 五元立体阵十次定向效果

Fig. 13 Ten directional results of five-element stereoscopic array

4 结 论

为解决水下气体泄漏三维定向问题,提出了一种利用立体五元阵被动声定向方法。通过仿真研究了声源位置、声速对不同阵列定向算法性能影响,搭建水下听器阵列结构采集气泡信号,测试该定向算法在不同位置的定向效果。理论分析与仿真结果表明 3 种阵列定向误差都与声源位置、时延误差有关,声源与水平面夹角越小,俯仰角定向误差越大,方位角定向误差越小,减小时延误差可以提高定向精度。声速仅与平面阵俯仰角定向有关,在 20 m/s 的声速误差下,最大俯仰角误差可达到 4°。3 种阵列方位角定向效果相近,但立体阵对俯仰角的定向效果优于平面阵。结合实际情况选择了阵列半径 20 cm 的阵列进行实验,结果显示五元立体水听器阵列对水下 4 个位置的泄漏孔均能实现较好的定向效果,方位角俯仰角的平均误差小于 4°,定向效果优于平面阵列。

该方法仍有许多可以改进之处。首先可以寻找更加合适的去噪方法去除噪声,还原原始声信号;利用自适应阈值算法检测不同强度和信噪比情况下气泡的到达时间;优化阵列结构,尝试使用立体四元阵等多种结构对泄漏进行定向。

参考文献

[1] 李延豪, 侯磊, 于巧燕, 等. 浅海天然气管道泄漏扩散过程模拟研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2022, 35(2): 74-80.
LI Y H, HOU L, YU Q Y, et al. Simulation study of leakage and diffusion of shallow subsea natural gas pipeline [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2022, 35(2): 74-80.
[2] VAZQUEZ A, LEIFER I, SANCHEZ R M.

Consideration of the dynamic forces during bubble growth in a capillary tube [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(13): 4046-4054.
[3] 杜非. 基于气泡声学的水下气体泄漏检测方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
DU F. Research on underwater gas leak detection method based on bubble acoustic [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
[4] LIU J T, CONG SH H, SONG Y X, et al. Experimental study on asymmetric bubbles rising in water: Morphology and acoustic signature [J]. Physics of Fluids, 2022, 34 (2): 023317.
[5] POURSHEIKHALI S, ZAMIRI-JAFARIAN H. Source localization in inhomogeneous underwater medium using sensor arrays: Received signal strength approach [J]. Signal Processing, 2021, 183: 108047.
[6] MAHMUTOGLU Y, TURK K. A passive acoustic based system to locate leak hole in underwater natural gas pipelines [J]. Digital Signal Processing, 2018, 76: 59-65.
[7] 肖栋, 向阳, 卓瑞岩, 等. 基于波束形成的多类型多声源定位研究 [J]. 应用声学, 2017, 36(3): 220-227.
XIAO D, XIANG Y, ZHUO R Y, et al. Localization of multiple sound source with multi-type based on beamforming [J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36 (3): 220-227.
[8] ZHANG Y, WANG B P, RUI X B, et al. A continuous underwater bubble localization method using passive acoustic array beamforming [J]. AIP Advances, 2022, 12(5): 0083892.
[9] PADOIS T, BERRY A. Two and three-dimensional sound source localization with beamforming and several deconvolution techniques [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2017, 103(3): 392-400.
[10] 刘学承, 朱敏, 武岩波. 适用任意平面阵列的二维宽带 DOA 快速估计算法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 102-111.
LIU X CH, ZHU M, WU Y B. A fast 2-D wideband direction-of-arrival estimation method with arbitrary planar arrays [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 102-111.
[11] 屈秉男, 蒋平, 赵鲁阳, 等. 基于短基线传感器阵列的炮弹被动测向算法 [J]. 航空学报, 2022, 43(3): 400-414.
QU B N, JIANG P, ZHAO L Y, et al. Passive direction finding algorithm of projectile based on short baseline sensor array [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 400-414.

- [12] 行鸿彦, 杨旭, 张金玉. 基于四元传声器阵列的声源全方位定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 43-50.
- XING H Y, YANG X, ZHANG J Y. Sound source omnidirectional location algorithm based on four-element microphone array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 43-50.
- [13] 程方晓, 刘璐, 姚清华, 等. 基于改进时延估计的声源定位算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(3): 681-687.
- CHENG F X, LIU L, YAO Q H, et al. Acoustic source localization algorithm based on improved time delay estimation [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2018, 56(3): 681-687.
- [14] 刘宾. 基于声源定位的靶标测量技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- LIU B. Research on target measurement technology based on sound source localization [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [15] 王学青, 时银水, 朱岩. 空间六元麦克风阵列及其定位精度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1392-1393, 1398.
- WANG X Q, SHI Y SH, ZHU Y. Six microphoned cone-shaped array and its locating accuracy analysis [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1392-1393, 1398.
- [16] 陈韶华, 赵冬艳, 陈川. 海洋声学环境下水中声源的时延估计法定位精度分析[J]. 声学学报, 2014, 39(5): 549-556.
- CHEN SH H, ZHAO D Y, CHEN CH. Precision analysis for underwater sound source localization in ocean acoustic environment with time delay estimation method [J]. Acta Acustica, 2014, 39(5): 549-556.
- [17] RANGANATH K A, SMITH C T, NOSEK B A. Distinguishing automatic and controlled components of attitudes from direct and indirect measurement methods [J]. Journal of Experimental Social Psychology, 2008, 44(2): 386-396.

作者简介



王全增, 2018 年于天津工业大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为管道泄漏定向算法。

E-mail: wangquanzeng233@163.com

Wang Quanzeng received his B. Sc. degree from Tiangong University in 2018. He is currently a master student in the School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering at Tianjin University. His main research interest is pipeline leakage orientation algorithm.



沙洲(通信作者), 2013 年于天津大学获得学士学位, 2018 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为分布式光纤传感, 相位敏感的光时域反射仪, 管道安全预警系统。

E-mail: shazhou@tju.edu.cn

Sha Zhou (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2013, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2018. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include distributed optical fiber sensor, phase-sensitive optical time domain reflectometer, and pipeline optical fiber early-warning system.



赵云峰, 2008 年毕业于清华大学, 现为国家管网集团北方管道公司技术支持中心高级工程师, 主要研究方向为智能管道技术的研究与应用, 包括智能检测、智能感知等技术推广。

E-mail: zhaoyf@pipechina.com.cn

Zhao Yunfeng graduated from Tsinghua University in 2008. He is currently a senior engineer at the Technical Support Center of Pipe China North Pipeline Company. His main research interests include the research and application of intelligent pipeline technology, including intelligent detection, intelligent perception and other technology promotion.