2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2330-2337
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

司洁戈,俞剑,张景熙,等. 2026. 基于地震波场的水下目标测向跟踪技术研究. 地球物理学进展,41(5):2330-2337,doi:10.6038/pg2026KK0081.

SI JieGe, YU Jian, ZHANG JingXi, *et al*. 2026. Research on estimating DOA of underwater target based on seismic wavefield. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2330-2337,doi:10.6038/pg2026KK0081.

基于地震波场的水下目标测向跟踪技术研究

Research on estimating DOA of underwater target based on seismic wavefield

司洁戈[1],俞剑[2],张景熙[3],苏俊[4],刘德铸[1],冯海新[5]*

SI JieGe[1], YU Jian[2], ZHANG JingXi[3], SU Jun[4], LIU DeZhu[1], FENG HaiXin[5]*

1. 中国电子科技集团公司电子科学研究院,北京 100041
2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所,南京 210000
3. 中国电子科技集团公司第三研究所,北京 100015
4. 中国石油大学(华东),青岛 370200
5. 中国科学院声学研究所,北京 100190

1. *China Academy of Electronics and Information Technology*, *Beijing* 100041, *China*
2. *China Electronics Technology Group Corporation* 28th *Research Institute*, *Nanjing* 210000, *China*
3. *China Electronics Technology Group Corporation* 3th *Research Institute*, *Beijing* 100015, *China*
4. *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao* 370200, *China*
5. *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*

摘 要 不断发展和创新技术应用是提高经略海洋能力,加快建设海洋强国的必然要求.近年来随着国外在水下机器人(潜航器、滑翔机等)无人机动装备技术的进步及大批量使用,亟需围绕上述机动目标开展海洋复杂环境下检测、跟踪、处置等技术的研究与深化,以解决复杂条件下水下运动目标监测问题.本文在已有舰船地震波探测技术基础上,给出基于绝对方位校正的矢量波场测向跟踪算法,并通过在浅海(120 m 水深)环境条件,开展基于水下无人潜航器(UUV)目标的测向跟踪试验,验证算法对水下移动 UUV 目标连续测向跟踪的有效性.试验结果表明,利用 UUV 机动过程中自身辐射噪声的低频部分,以单矢量传感器即可实现对 UUV 的连续测向并稳定跟踪,精度达到≤10°@6 km,为下一步多节点组网定位探测奠定技术基础.

关键词 地震波场;水下目标;方位校正;测向跟踪

中图分类号 P631,P738

Abstract Continuous development and innovation in technology application are essential for enhancing ocean management capabilities and building China to a strong maritime nation. In recent years, with the advancements and widespread use of Unmanned Underwater Vehicle (UUV) technologies, such as submersibles and gliders, there is an urgent need to conduct research and deepen technologies related to detection, tracking, and disposal in complex marine environments, focusing on the aforementioned mobile targets, in order to address the issue of monitoring underwater moving targets under complex conditions. Based on existing ship seismic wave detection technology, this paper presents a vector wavefield direction-finding and tracking algorithm based on absolute azimuth correction. Furthermore, through direction-finding and tracking experiments conducted in shallow water (120 meters deep) conditions using Underwater Unmanned Submersible Vehicles (UUVs) as targets, the effectiveness of the algorithm in continuously direction-finding and stably tracking underwater moving UUV targets is verified. The experimental results show that by utilizing the low-frequency part of the UUV's own radiated noise during maneuvering, a single vector sensor can achieve continuous direction-finding and stable tracking of the UUV, Accuracy reaches ≤10°@6 km, laying a technical

收稿日期 2026-03-11; **修回日期** 2026-07-29. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

第一作者简介 司洁戈,男,1988 年生,博士研究生,高级工程师,主要从事海洋低频探测技术研究. E-mail: sijiege@126.com

*通讯作者 冯海新,男,1987 年生,博士研究生,副研究员,主要从事海洋声学信号处理技术研究. E-mail: fenghaixin@mail.ioa.ac.cn

文献标识码　A
doi:10.6038/pg2026KK0081
CSTR:32085.14.pg2026KK0081

foundation for the next step of multi-node networking positioning detection.

Keywords　Seismic wavefield; Underwater target; Azimuth correction; DOA

0　引　言

在海洋活动中,地震技术作为主流水声技术手段的有效补充,被广泛应用于海洋矿产探查、石油勘探、环境监测等领域(李风华等,2015,2019). 根据地震波的成因主要包括两大类,一类是天然地震波场,主要基于天然地震激发的地震波,通过遍布世界各地的地震台网实现地震定位、地震层析成像、震源机制分析及灾害预测等;另一类主要基于人工激发地震波场,主要用于海洋(或陆地)石油勘探开发、工程地震等. 随着海洋活动的愈加频繁,人们发现海洋水面舰船、水下机器人等海洋移动目标的辐射噪声也可以被地震传感器有效接收而被广泛研究;同时传感、信号处理等技术的进步,基于地震波场的海洋目标监测技术愈发受到重视,并逐渐被认可作为一种有效的非声监测手段加以运用.

基于地震波场的海洋监测技术已发展多年,整个发展历程分为理论分析和装备技术两个方面. 在理论分析方面,20 世纪 70 年代起,国外已经开展了相关海上地震波传播理论的研究(Dorman *et al*., 1995),美国海军实验室资助进行了一系列的甚低频地震波噪声场的试验和理论研究,指出对航行油轮产生的地震波探测距离达到 3000 ~ 5900 m;2016 年起,美大洋海底观测计划(OOI)、欧洲海底观测网(EMSO)(2011、2015、2024)等大型海洋监测系统均将地震波场记录作为主要数据源之一加以分析. 我国海上地震波传播研究起步较晚,2006 年,西北工业大学航海学院实现对舰船噪声的检测,张海刚等(2010)对水中甚低频声源激发海底地震波的传播开展了研究,并建立预报海底地震波场的抛物方程方法模型,研究了海底地震波的传播规律,颜冰和马剑飞(2019)对舰船地震波虚警率检测进行了时频研究,邓秀华(2012)、迟秀秀(2020)通过实验实现了对目标地震波信号的接收,赵晗(2018)仿真证明转换后的地震波场经远距离传播后扔有较强的能量,司洁戈等(2022)实现了对 12 km 外的百吨级船只信号的长时监测,Wang 等(2023)对声波/地震波耦合及传播转化路径进行了模拟分析,并利用敲鼓试验进行了验证. 在装备技术层面,我国中地装(重庆)地质装备有限公司成功研制出海洋地震波采集设备 OBS(Ocean Bottom Seismometer),并已在海洋地震领域广泛应用,乌克兰风暴实验室 2017 年研制了固定式声震联合矢量组合(矢量水听器和矢量地震计组合)接收设备,可实现远距离海洋水域噪声特性监测,并实现了浅海组网长时监测,余东明和田作喜(2012)采用水-地联合方式开展了相关海上试验,开发了舰船地震波测量装置,并多次获取了不同舰船的水-地辐射噪声数据. 在海洋装备技术应用过程中,不得不面对海底矢量传感器指向性未知的问题,传统采用水平分量极性校正(R-T 旋转)方法,较易收到噪声和海底介质影响,刘志斌等(2018)提出了基于多炮约束条件的校正方法,乌云巴特尔等(2022)提出了基于水平分量初至波记性的计算方法,上述改进方法主要基于强脉冲条件,主要应用于石油勘探,不适用于弱信号条件下方位校正问题. 整体而言,我国基于地震波场的海洋监测技术以理论研究和试验验证为主,装备能力及工程化技术应用能力有待进一步提升.

本文结合成熟地震波场在天然地震、人工地震勘探技术基础上,在已有舰船地震波场研究基础上,尝试将地震波场理论应用于海洋移动目标的探测跟踪,并针对海洋装备部署方位随机的特点,给出基于绝对方位校正的测向跟踪算法,并在真实海洋环境下进行实验验证,以确定方法的可行性及有效性.

1　水下移动目标测向跟踪算法

海洋移动目标振动信号是目标辐射噪声经海底耦合转换得到的. 以舰船为例产生过程可描述为:航行舰船目标会产生辐射信号,辐射信号以舰船为中心在水中向四周扩散,经水声信道传播至海底固-液界面后,经耦合转化后到达海底界面,由惠更斯原理可知,海底界面每个点均可看作新的激发源,以地震波的形式向四周传播. 与天然地震类似,舰船地震波具备的矢量特性,可通过矢量振动传感器实现测向跟踪. 本文在前人工作基础上,主要围绕方位校正和测向跟踪算法进行说明.

1.1 绝对方位校正算法

因传感器设备部署和耦合条件的差异,海上与陆地应用方式有较大差异,首先是方位和俯仰的随机性,通常而言,陆地使用矢量传感器,会根据严格方位指向进行部署,并采用水泥墩等实现刚性耦合,而海上应用一般采用水面部署方式,在布放过程中绝对位置和绝对方位是不确定的,导致数据在采集阶段"先天不足";其次,因采集频段和分辨率要求,陆地采用传感器叠加等方式等增加覆盖次数,以达到提升分辨率的目的,而海上目前仅依靠点状节点而非传感器阵列部署,导致数据仅能以单节点为基础进行处理,整体带来的增益和精度贡献有限.基于以上两点原因,方位校正应是地震矢量传感器的数据处理的重要前提,为后续数据结论的有效性奠定基础.

当前主流海洋地震仪器以 R10 * 系列为主,或基于该系列发展而来,故以 R10 * 系列进行说明,该系列内部传感器坐标系与仪器坐标系存在如下关系:

$$\begin{cases} X_{仪器} = -Y_{传感器} \\ Y_{仪器} = -X_{传感器} \\ Z_{仪器} = Z_{传感器} \end{cases}, \tag{1}$$

设备在海洋中部署工作时,因所部署点位的与采集数据对应的变量主要包括方位角、俯仰角和翻滚角三个,分别以 c_t、c_g、Az 表示,与仪器坐标系关系为:

c_t:仪器坐标系 OY 轴与水平面的夹角,取值范围:$-\pi \ll \alpha \ll \pi$;

c_g:仪器坐标系 OX 轴与水平面的夹角,取值范围:$-\pi \ll \beta \ll \pi$;

Az:仪器坐标系 OX 轴逆时针偏转到地理北极的角度,取值范围:$0 \ll \phi \ll 2\pi$.

基于以上信息,为实现绝对方位校正,需要对仪器坐标系分别进行水平(俯仰/翻滚)和方位校正.下面按照先水平后方位的校正步骤进行算法推导,最后给出绝对方位校正公式.

(1)俯仰校正

在俯仰校正过程中,需充分考虑仪器坐标系 OY 轴的正半轴位于水平界面之上(图 1 中(a))和之下(图 1b)两种情况,水平界面之上时俯仰角为正,反之为负.当俯仰角为正,即是 c_t 为正时,即 $0 \ll \alpha \ll \pi$,分别对 $0 \ll \alpha \ll \pi/2$ 和 $\pi/2 \ll \alpha \ll \pi$ 两种情况考虑.

经推导,俯仰角在两种情况下,均可得出:

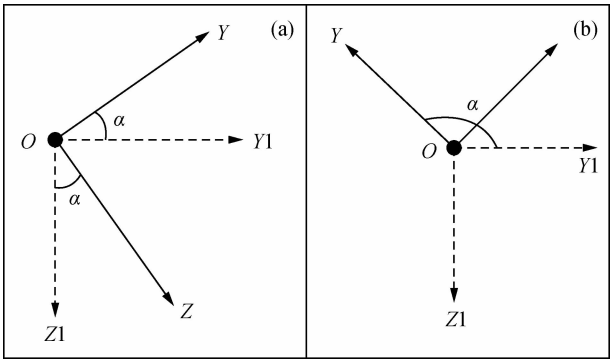


图 1 俯仰角校正示意图

YZ 为仪器坐标系,*Y*1*Z*1 为正交坐标系.

Fig. 1 Schematic diagram of pitch angle correction

YZ is the instrument coordinate system, and *Y*1*Z*1 is the orthogonal coordinate system.

$$[X_1 \quad Y_1 \quad Z_1] = [X \quad Y \quad Z] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}. \tag{2}$$

(2)滚转校正

与俯仰角校正类似,滚转角存在水平面之上和之下两种情况,当仪器坐标系 OX 轴的正半轴位于水平面之下时,滚转角为正,反之为负.当 c_g 为正时,即 $0 \ll \beta \ll \pi$,存在图 2 中 $0 \ll \beta \ll \pi/2$(图 2a)和 $\pi/2 \ll \beta \ll \pi$(图 2b)两种情况.

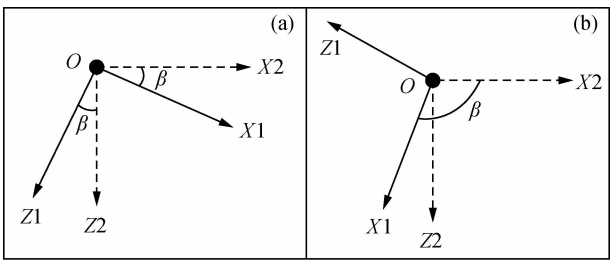


图 2 滚转角校正示意图

*X*1*Z*1 为仪器坐标系,*X*2*Z*2 为正交坐标系.

Fig. 2 Schematic diagram of roll angle correction

*X*1*Z*1 is the instrument coordinate system, *X*2*Z*2 is the orthogonal coordinate system.

经推导,滚转角在两种情况下,均可得出:

$$[X_2 \quad Y_2 \quad Z_2] = [X_1 \quad Y_1 \quad Z_1] \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}. \tag{3}$$

(3)方位校正

基于设备给出的 OX 轴与地理北极的夹角 φ,经坐标变换可将器壳体坐标 OX 轴校正到正北方向,考虑如下 4 种情况,分别是 $\varphi \leqslant 90°$,$90° < \varphi \ll 180°$,$180° < \varphi \ll 270°$,$270° < \varphi \ll 360°$,以 $\varphi \leqslant 90$ 为例进行坐标变换,如图 3 所示.

经推导出方位校正公式:

$$[X \quad Y \quad Z] = [-Y_{传感器} \quad -X_{传感器} \quad Z_{传感器}] \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\varphi & -\cos\beta\sin\varphi & \sin\beta \\ \cos\alpha\sin\varphi + \sin\alpha\sin\beta\cos\varphi & \cos\alpha\cos\varphi - \sin\alpha\sin\beta\sin\varphi & -\sin\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\sin\varphi - \cos\alpha\sin\beta\cos\varphi & \sin\alpha\cos\varphi + \cos\alpha\sin\beta\sin\varphi & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}. \tag{5}$$

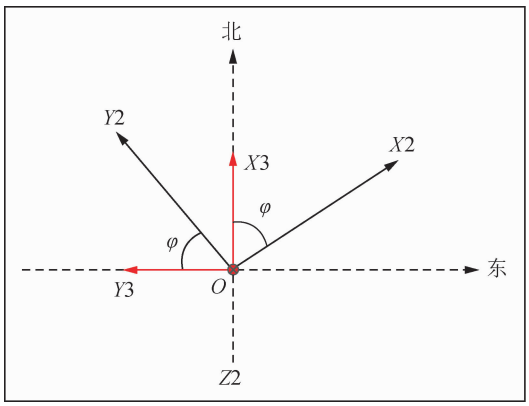


图 3　方位校正示意图

Fig. 3　Schematic diagram of azimuth correction

1.2　移动目标测向算法

根据方位估计计算公式,方位角 DOA(Direction Of Azimuth):

$$\mathrm{DOA}(°) = \arctan\left(\left|\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right|\right) * 180/\pi\ , \tag{6}$$

式中(x_1, y_1)和(x_2, y_2)分别为目标点和传感器接收点的水平位置坐标. 因移动目标与接收传感器的相对位置时刻变化,故传感器接收到是连续目标噪声数据(XYZ),其中 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$,$Y = (y_1, y_2, \cdots, y_n)$,$Z = (z_1, z_2, \cdots, z_n)$,$n$ 为信号长度. 在一定时间段 Δt 内,传感器接收到数据量为 $n \times \Delta t$,三分量数据记为:

$$\begin{cases} X = [x_0, x_1, \cdots\cdots, x_{n*\Delta(t-1)}] \\ Y = [y_0, y_1, \cdots\cdots, y_{n*\Delta(t-1)}] \\ Z = [z_0, z_1, \cdots\cdots, z_{n*\Delta(t-1)}] \end{cases}, \tag{7}$$

其中(x_i, y_i, z_i)表示接收到的第$(i-1)$个目标噪声时域信号数据.

将(7)式代入(6)式,得到移动目标的 DOA 估计为:

$$[X_3 \quad Y_3 \quad Z_3] = [X_2 \quad Y_2 \quad Z_2] \cdot \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

同理,其他三种情况均可得到公式(4).

将上述校正公式进行叠加,得到设备传感器坐标系的绝对方位校正公式为:

$$\mathrm{DOA}(°) = \arctan\left(\left|\frac{[y_0, y_0, \cdots\cdots, y_{n*\Delta(t-1)}]}{[x_0, x_0, \cdots\cdots, x_{n*\Delta(t-1)}]}\right|\right). \tag{8}$$

为体现移动目标辐射噪声的线谱及优势频段,将时域数据进行傅里叶变换,得到频域 DOA 估计公式:

$$\mathrm{DOA}(°) = \arctan\left(\left|\frac{fft[y_0, y_0, \cdots\cdots, y_{n*\Delta(t-1)}]}{fft[x_0, x_0, \cdots\cdots, x_{n*\Delta(t-1)}]}\right|\right). \tag{9}$$

频率域内,通过目标时间能量累计,选取目标噪声优势频段等常规技术手段,实现目标精确 DOA 估计.

考虑到 Z 方向为垂直方向分量,理论上对测向结果不产生影响,然而由于传感器在部署和长时监测时,考虑到装备部署精度和方位与海底底质、流速等环境密切相关,是与环境介质相关的函数,故在做测向分析时,为增加结果的鲁棒性,通常将垂直分量作为系数参与到 DOA 估计当中,得到:

$$\mathrm{DOA}(°) = \arctan\left(\left|\frac{fft(Z) \cdot fft(Y)}{fft(Z) \cdot fft(X)}\right|\right). \tag{10}$$

在实际数据处理中,海底地震仪(OBS)通过事后打捞回收,读取俯仰、翻滚等时间序列信息,对采集的多分量数据按照 1.1 章节进行绝对方位校正,通过 1.2 章节实现目标信号的连续测向跟踪.

下面通过试验验证算法可行性,验证地震波场对移动目标的连续测向跟踪能力.

2　测向跟踪试验与数据分析

2.1　采集设备升级

考虑到对水下移动目标长期监测需求,在现有海底地震仪(OBS)(郝天珧和游庆瑜,2011)基础上,结合水下环境复杂、移动目标噪声能量低、目标小等典型特征,在传感器频带宽度、灵敏度、采集和存储等模块进行针对性改进:首先在振动传感器接

收频段方面,通过调研和大量实验数据分析,移动目标优势频段在几赫兹到几百赫兹之间,故将三分量传感器进行重新设计优化,聚焦 2 Hz ~ 500 Hz 优势低频频段,对应灵敏度达到 250 V/m/s,完全满足对水下低噪声移动目标的接收要求;其次对采集和存储模块进行了优化,进一步改善了舱体内部噪声较大、干扰较多问题;第三增加原子钟、数据实传等便于阵列处理功能,为后续针对目标信号阵列叠加、目标精确定位跟踪等提供基础.

2.2 试验过程

如图 4 所示,在试验区域预先部署 N 套采集设备,编号按照顺序分别为 1-N,设备采集频段均为 2 ~ 500 Hz,等间距坐底部署(仅接收信号目的,暂不涉及阵列接收与处理),水深约 120 m,沙泥底质. 测线部署完毕后,将实验区域内(5 km 范围)所有船只驱离,确保无任何人工噪声干扰影响实验结果.

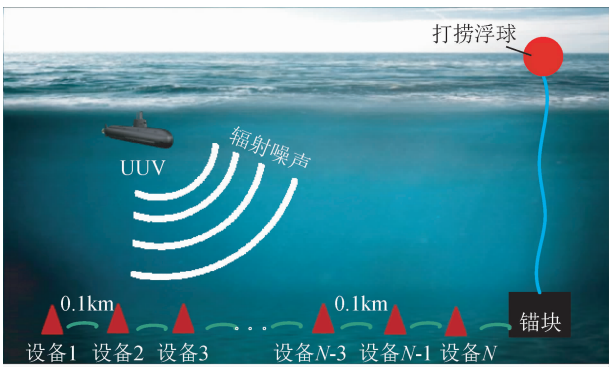


图 4 实验示意图

Fig. 4 Experimental schematic diagram

整个实验过程为:在试验区域 UUV 按照预先设定轨迹进行机动(图 5 所示 S0-S1-S2-S3-S4-S5-S6),UUV 包括两类噪声,分别是 UUV 辐射噪声和所携带模拟信号源噪声,模拟信号源频带范围为 200 Hz ~ 20 kHz,声源级为 150 dB. UUV 机动轨迹与相对于振动传感器测线空间位置图如图 5 所示.

目标对应的 UUV 工况为表 1 所示,整个过程工况(航向、深度、速度等)共改变 5 次,以模拟实际环境条件下 UUV 执行任务过程中潜深、航速、航向的随机变化的多种场景.

主要内容包括:一是拉距试验模拟,以实现设备对目标由近及远、平行、交叉等的场景模拟,以验证设备连续探测性能;二是过顶模拟,在试验过程中,UUV 先后 2 次垂向横穿测线,实现信号连续过顶场景模拟,验证设备稳定测向性能;三是多方位连续模拟测试,整个试验过程,UUV 方位变化连续,以验证设备测向稳定性.

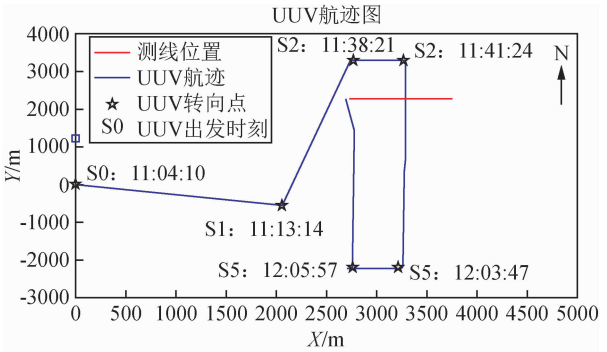


图 5 UUV 机动轨迹与测线位置(红色)空间位置图

Fig. 5 Spatial location map of UUV maneuvering trajectory and survey line position (marked in red)

表 1 试验过程中 UUV 工况改变时刻表

Table 1 Schedule of UUV operating condition changes during the test process

路线	航向/(°)	速度/节	时间/s	深度/m
S0-S1	105	8	480	30
S1-S2	10	5	1500	80
S2-S3	90	5	200	80
S3-S4	180	8	1340	80
S4-S5	270	8	120	80
S5-S6	0	5	1360	60
UUV 机动总路程:8.56(nm)			UUV 机动总时长:5000(s)	

下面围绕连续测向性能进行分析.

2.3 数据分析

本次试验,UUV 目标辐射噪声包括两部分,分别是本体噪声(宽频)和所携带模拟信号源噪声(200 Hz ~ 20 kHz),下面以单套设备作为典型进行分析. 以 4 号振动传感器为例,以时间为横轴、频率为纵轴,给出传感器三分量时频图,图 6 给出包含整个试验过程的图示(90 min),可以看出,三个分量目标低频段信号丰富,根据干涉条纹现象分析可知,UUV 两次过顶,与实际情况相符.

对时频图分析可以得到如下结论:

(1)信号在低频部分能力较强,尤其是 200 Hz 以下,充分说明低频段信号经耦合衰减后,相对于背景噪声仍具有优势.

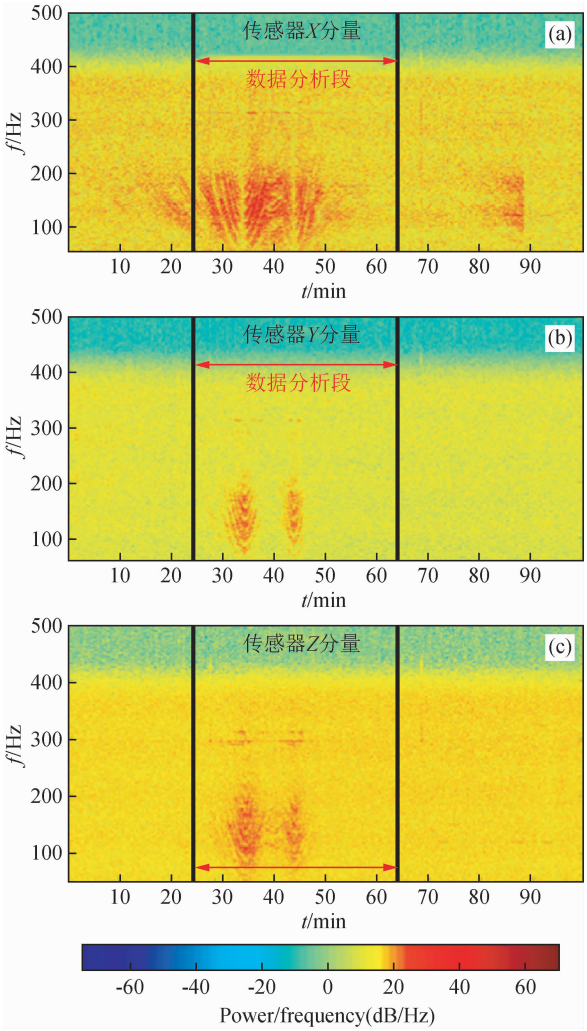


图 6　4 号设备在试验期间的传感器三分量时频结果

Fig. 6　The Three-component time-frequency result based on 4 equipment

(2)目标两次过顶,形成两个明显的低频干涉条纹带,经测算最远距离超过 1.2 km;且三个正交方向能量差异明显,特定方位优势显著.

由文献(杨坤德等,2019)可知,干涉条纹是劳埃德镜干涉原理形成的明暗相间的条纹,本实验是由目标辐射噪声的直达波与海底转换折射波经过不同路径同时到达信号采集位置,引起"干涉"现象,在时频域得到开口向上的抛物线,类似倒"V"形干涉条纹,充分说明了地震采集设备在试验中不仅接收到目标辐射噪声的水声信号,也同时接收到了目标辐射噪声经海底界面转换后的地震波信号,且二者在辐射频段方面存在高度一致性.

为验证地震波场测向跟踪的有效性,如图 6 所示选取 4 号设备中间时段 40 min 数据进行分析,如上图可知,选取 4 数据段历经两次过顶,经绝对方位校正和测向计算,得到图 7 所示 UUV 相对于 4 号设备的机动轨迹和测向历经图.

图 7 包括 3 个子图,其中图 7a 为 UUV 相对于 4 号设备(入水点位)的机动轨迹. 经计算,UUV 围绕 4 号设备机动方位变化约 335°,即近似环绕 4 号设备一周;图 7b 为根据实际相对位置变化得到的相位曲线,作为测向跟踪的"理论参考";图 7c 为经绝对方位校正后,按照测向算法得到的测向结果,可以看出,在 UUV 在两次过顶时段,能量较强且角度变化剧烈,非过顶时段(S2 点-S3 点)UUV 平行于测线移动,距离 4 号振动传感器较远,引起的角度变化相对缓慢. 在第 30 ~ 40 min 时段,测向历经图显示角度变化连续,变化趋势与 UUV 机动轨迹一致. 测向历经曲线与"理论参考"曲线基本一致,充分证明在该时段 4 号设备对 UUV 成功进行了测向跟踪,且精度较高.

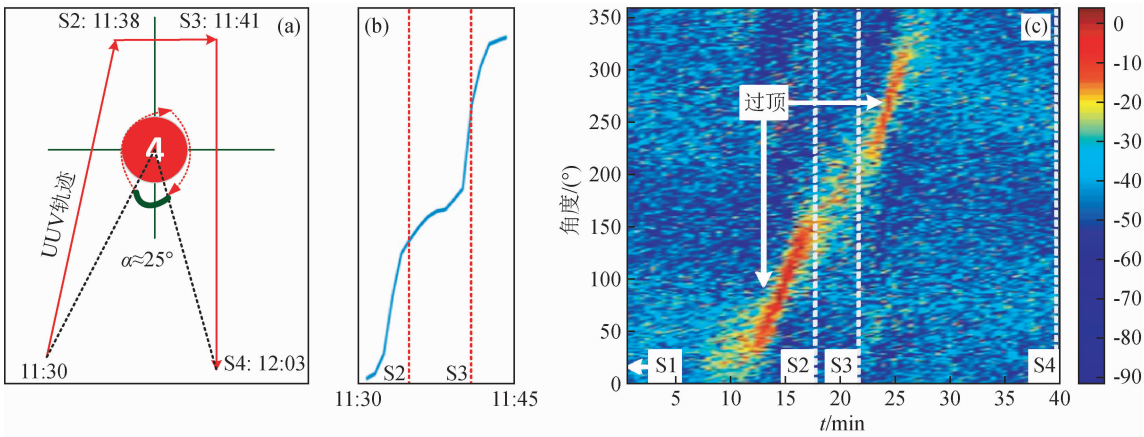


图 7　4 号设备处理得到的 UUV 测向结果

Fig. 7　The DOA result based on 4 equipment

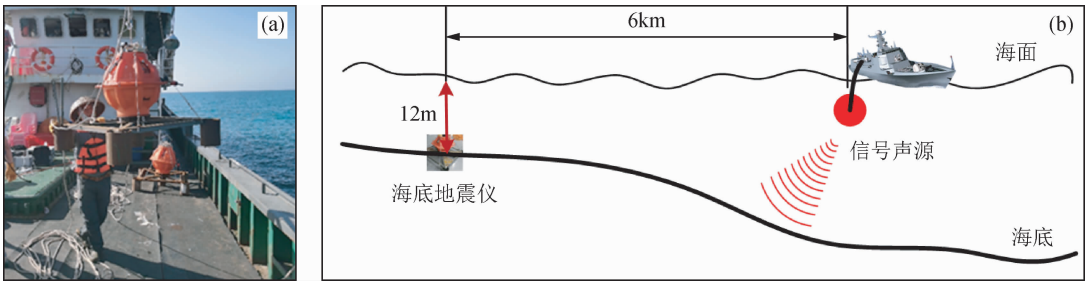


图 8 测向精度试验过程

Fig. 8 The process of DOA accuracy on the sea

3 测向精度量化分析

在上述测向试验中,因水流等外部条件影响,海底地震仪(OBS)入水位置与下沉入底位置不同,陪试设备 UUV 本身在水下机动亦有误差,且随着时间距离误差不断累计增大,二者叠加导致在测向结果的精度方面没有绝对的参照系,不能利用设备入水位置通过平均、均方根等定量给出测向精度估算. 为解决上述问题,在 2.2 节测向试验后,在浅水区围绕测向精度量化计算进行了针对性试验. 具体试验过程及测向精度计算如下:

试验过程描述:首先将海底地震仪(OBS)采用吊放方式部署于浅海近岸,水深 12 m,确保设备下沉入底点位与入水点位一致(误差≤2 m),母船携带信号声源由北向南机动,并在距离海底地震仪约 6 km 处,母船停机抛锚(母船 GPS 位置即为声源位置),发射总时长约 6 min 声信号,发射完毕后返航并打捞设备(图 8).

测向精度计算:经对试验数据绝对方位校正处理后,得到方位历程曲线如图 9 所示,经拟合计算,得出角度范围为 171.5°~177.8°.

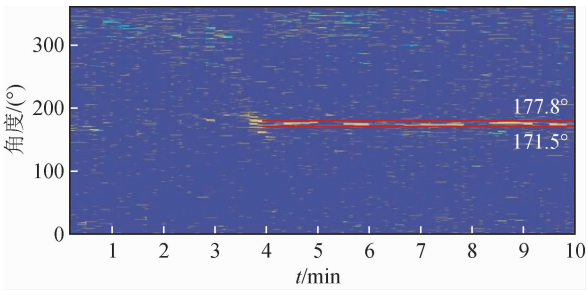


图 9 基于数据处理得到的测向范围

Fig. 9 The DOA range based on data processing

母船在 6 km 处,整个发射信号时段,共记录 6 次船(声源)位置,相对于海底地震仪方位计算给出表 2 所示,与计算角度范围进行比较,得出测向精度为≤8.4993°@6 km. 即是针对单个矢量地震仪而言,6 km 距离实现对移动目标的测向精度在 10°以内.

表 2 测向精度表

Table 2 The DOA accuracy calculation

序号	母船相对于海底地震仪方位(°)	计算角度(°)	精度(°)
1	179.9993	171.5~177.8	≤8.4993
2	179.9595		
3	179.9493		
4	179.9695		
5	179.9898		
6	179.9291		

4 结 论

对于水下移动目标探测,当前以水声技术为主的声纳探测手段,正遭遇瓶颈(如图 10). 与水声技术相比,地震波技术有几点优势,一是地震波主要瞄准低频段,当前水下装备降噪技术主要瞄准中高频段,对低频段噪声作用有限,这就为目标噪声的低频远距离传播提供条件,经过多次试也验得出低频段兼顾距离和能量优势,是未来水下探测处理中主要部分;二是海底地震波背景噪声级较低,为微弱信号提取创造了条件. 美国地质调查局(USGS)给出的地球正常噪声新模型(Peterson,1993)可知,因海洋距离工厂等人为活动较远,海底地噪声水平低于岸基 1~2 个数量级,适宜水下目标探测.

矢量地震波场具备向水下目标探测“跨界应用”的潜力,可作为可靠的非声手段用于水下移动

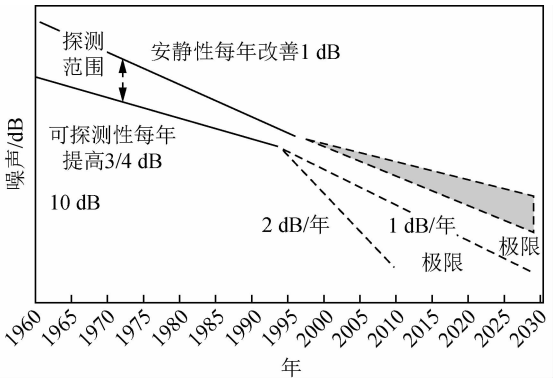


图 10　水声技术手段的探测能力逐年下降

Fig. 10　The detection capability of underwater acoustic technology has been declining year by year

目标探测,并具有较高的精度;同时,结合地震波技术在我国海洋石油勘探、地震定位等方面已有成熟应用,在装备技术、数据处理方面有深厚的技术积累,理论上在绝对位置校正、阵列处理、去噪技术等方面可提供技术支撑,以提升目标探测的距离和精度.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chi X X. 2020. Research on ship target compound detection technology in shallow sea[Master's thesis](in Chinese). Shenyang: Shenyang Ligong University.

Deng X H. 2012. Extaction difference in spectrum stability for ship target detection. Ship Electronic Engineering (in Chinese), 32(11): 124-127.

Dorman L M, Sauter A W, Bradley C, *et al*. 1995. Short-range seismoacoustic propagation on and off the beach. The Journal of the Acoustical Society of America, 98(5S): 2971-2971.

Hao T Y, You Q Y. 2011. Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 54(12): 3352-3361, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.033.

Li F H, Guo Y G, Wu L X. 2015. Technological progress and development trend of ocean bottom observatory network. Journal of Ocean Technology (in Chinese), 34(3): 33-35.

Li F H, Lu Y G, Wang H B, *et al*. 2019. Research progress and development trend of seafloor observation network. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 34(3): 321-330.

Liu Z B, Zhang J L, Wang D. 2018. A polarity correction method for seabed multi-component seismic exploration. //CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical Conference and Exhibition Electronic Proceedings (in Chinese). Beijing: CNOOC Research Institute, 1221-1224.

Peterson J. 1993. Observations and modeling of seismic background noise. Albuquerque: U.S. Geological Survey.

Si J G, Feng H X, Su J, *et al*. 2022. Research on shallow sea detection technology based on seismic wave. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(6): 2596-2603, doi: 10.6038/pg2022GG0029.

Wang X, Jiang T, Wang K K, *et al*. 2023. Estimating DOA of near sound sources in the air using a single three-component geophone. Applied Acoustics, 206: 109300, doi: 10.1016/j.apacoust.2023.109300.

Wu Y B, Yang L Y, Qi P, *et al*. 2022. Research on the R-T rotation method for the horizontal component of Ocean Bottom Seismometers (OBS). //Proceedings of the 2022 Annual Conference on Petroleum Geophysical Exploration (Volume II) (in Chinese). Haikou, 52-55.

Yan B, Ma J F. 2019. Real-time time-frequency detection of constant false alarm probability based on ship's seismic wave. Digital Ocean & Underwater Warfare (in Chinese), 2(1): 12-17, 28.

Yang K D, Duan R, Li H, *et al*. 2019. Theory and Technology of Underwater Sound Source Localization (in Chinese). Beijing: Publishing House of Electronics Industry.

Yu D M, Tian Z X. 2012. Method for acquiring seismic waves from ships. Acoustics and Electronics Engineering (in Chinese), (4): 36-38, 45.

Zhang H G, Piao S C, Yang S E. 2010. Propagation of seismic waves caused by underwater infrasound. Journal of Harbin Engineering University (in Chinese), 31(7): 879-887.

Zhao H. 2018. The research on key technology of very low frequency underwater acoustic and seismic wave joint detection [Master's thesis] (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University.

附中文参考文献

迟秀秀. 2020. 浅海中舰船目标复合探测技术研究[硕士论文]. 沈阳: 沈阳理工大学.

邓秀华. 2012. 提取频谱稳定度差异探测舰船目标. 舰船电子工程, 32(11): 124-127.

郝天珧, 游庆瑜. 2011. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用. 地球物理学报, 54(12): 3352-3361, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.033.

李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 2015. 海底观测网技术进展与发展趋势. 海洋技术学报, 34(3): 33-35.

李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 2019. 海底观测网的研究进展与发展趋势. 中国科学院院刊, 34(3): 321-330.

刘志斌, 张建利, 王迪. 2018. 一种海底多分量地震勘探极性校正方法. //CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 中海油研究总院, 1221-1224.

司洁戈, 冯海新, 苏俊, 等. 2022. 基于海底界面地震波的浅海目标探测研究. 地球物理学进展, 37(6): 2596-2603, doi: 10.6038/pg2022GG0029.

乌云巴特尔, 杨丽莹, 齐鹏, 等. 2022. 海底地震仪(OBS)水平分量R-T旋转方法研究. //2022 年中国石油物探学术年会论文集(下册). 海口, 52-55.

颜冰, 马剑飞. 2019. 基于舰船地震波的实时恒虚警概率时频检测. 数字海洋与水下攻防, 2(1): 12-17, 28.

杨坤德, 段睿, 李辉, 等. 2019. 水下声源定位理论与技术. 北京: 电子工业出版社.

余东明, 田作喜. 2012. 舰船地震波获取方法. 声学与电子工程, (4): 36-38, 45.

张海刚, 朴胜春, 杨士莪. 2010. 水中甚低频声源激发海底地震波的传播. 哈尔滨工程大学学报, 31(7): 879-887.

赵晗. 2018. 甚低频水声地波联合探测关键技术研究[硕士论文]. 杭州: 浙江大学.