

大规模分布式光纤水听拖曳阵列及其湖试性能测试

龙俊求¹, 江浪¹, 肖春¹, 郭汝乾¹, 严国锋^{1*}, 王德麟², 冉曾令³, 龚元³, 饶云江^{1,3**}

¹之江实验室光纤传感研究中心, 浙江 杭州 310027;

²浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021;

³电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731

摘要 报道了一种高性能大孔径分布式光纤水听拖曳阵列,其总长度为 150 m,声学传感段长度为 100 m,具有 192 个传感单元,采用单根光纤离散增敏制备而成,无需其他分离器件。传感基元通过驻波桶标定,在 20~1000 Hz,平均声压灵敏度达到 -127.44 dB (re rad/ μ Pa)。阵列同时装配了自研的姿态感知模块,可实现拖曳过程的实时姿态获取。针对所研制的大规模分布式光纤水听拖曳阵列,开展了湖试综合测试,6 kn 拖速下阵列声学段的倾角仅为 7.8°,将 192 个传感单元数据波束合成后得到了 16.87 dB 的空间增益,传感器表现出了优异的综合性能。该高性能大规模分布式光纤水听拖曳阵列为光纤水听器发展提供了一条全新的技术路线,有力推动了基于 DAS 的“第三代声呐技术”的发展。

关键词 光纤光学; 光纤水听器; 光纤水听拖曳阵列; 分布式光纤声波传感; 声压灵敏度; 姿态感知; 目标轨迹跟踪

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231684

1 引言

海洋声学监测对国家海洋军事防御、海洋矿物资源勘探和海洋灾害监测具有重要意义^[1-2]。水听器是海洋声学监测最重要的手段,得到了广泛的研究和应用。光纤水听器(FOH)与传统的电子水听器相比,具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、灵敏度高优点,具备构造轻量化、高灵敏度、无源水听器拖缆的潜力,已成为新一代水听器的研究热点^[3-5]。迄今为止,使用最多的 FOH 是点式传感器,例如光纤干涉仪^[6-7]、光纤布拉格光栅^[8-9]、光纤激光器^[10-11]。实际应用中通常需要对点式传感单元采用时分复用(TDM)、波分复用(WDM)或空分复用技术组成准分布式光纤水听器拖缆,此类 FOH 系统的结构复杂、成本高、可靠性较差,且拖缆中能容纳的阵元数量有限^[12]。

光纤分布式声波传感(DAS)技术是一种可以实现声波/振动信号连续分布式探测的新型传感技术,具有连续在线监测、灵敏度高、传感距离远、抗电磁干扰、可耐受极端环境等优点^[13]。不同于传统的点式传感器,DAS 系统是利用光纤本征的瑞利反向散射(RBS)来检测和定位沿光纤的振动^[14-15],通过解调仪不断地向连接的光纤发射激光脉冲,由于光纤内部存在不均匀的散射体,部分入射的脉冲光会发生散射,其中

RBS 光是 DAS 测量的基础。当光纤的某个位置受到外界的扰动而产生应变时,该位置处的光纤折射率会发生改变,导致 RBS 光的相位也会发生改变。解调仪通过分析光纤各个位置相干瑞利散射光的相位信息^[16],得到应变或应变率信息,推测出外部扰动的物理量^[17]。DAS 系统的整条光纤均能够作为传感元件,其能够在很大的传感覆盖区域内采集微振信号,获取光纤沿线各位置的振动和声场信息,具有实现高空间分辨率和大传感范围内探测的独特优势和发展潜力^[18],近年来得到了多个领域研究人员和产业界的广泛关注。

1993 年,基于相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR)的高灵敏分布式光纤扰动传感首次被提出^[19],推动 DAS 进入了定性测量阶段。由于 Φ -OTDR 利用光纤中的瑞利散射效应,其散射强度非常微弱,并且随着传感距离的延伸,传感信号呈指数衰减,如何延伸传感长度成为 Φ -OTDR 研究方向的难题。2014 年,电子科技大学研究人员提出了分区型分布式光纤放大方法,实现了 175 km 的 Φ -OTDR 系统,将 Φ -OTDR 无中继传感距离大幅拓展^[20],通过利用基于 IQ 解调方法的 Φ -OTDR 实现了光纤拉伸信号的定量测量^[21],从此 DAS 进入了动态应变定量测量阶段,DAS 技术的空间分辨率、检测距离、频率响应、信噪比

收稿日期: 2023-10-21; 修回日期: 2023-11-28; 录用日期: 2023-11-30; 网络首发日期: 2023-12-23

基金项目: 之江实验室重大科研项目(K2002 ME0AC01)、国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U21A20453)

通信作者: *yanguofeng@zhejianglab.com; **yjr@zhejianglab.com

(SNR)和灵敏度等性能指标都得到显著的提升^[18,22]。

分布式光纤水听领域是 DAS 技术最近发展的一个应用分支^[23-25]。2017 年, DAS 因其独特的优点被引入到水声探测领域并成功实现了水声信号的检测, 其 FOH 的声压灵敏度约为 -148 dB (re rad/ μ Pa)^[26]。2019 年, 美国海军研究实验室也公开表示了他们正在进行基于瑞利散射的水听器研究^[27]。2020 年, 本课题组通过对 DAS 解调仪器和 FOH 结构的改进, 实现了 $1\sim 1024$ Hz 范围内高达 -131.0 dB (re rad/ μ Pa) 的平均声压灵敏度, 并研制出新一代分布式光纤水听阵列演示系统^[28]。这种新型分布式 FOH 将弯曲不敏感光纤螺旋缠绕在弹性体, 构成声敏光缆, 不需要添加额外的分离器件, 大大降低了系统的复杂度和制造工艺, 完成了基于 DAS 原理的大容量分布式光纤水听阵列的可行性研究。2021 年, Lu 等^[29]制备了 104 m 长的声敏光缆并进行了湖试验证, 光缆声压灵敏度为 -146 dB (re rad/ μ Pa)。2023 年, Chen 等^[30]对 FOH 的多层结构进行了分析和优化, 制成了一种高灵敏分布式光纤水听阵列, 其平均声学灵敏度为 -137.2 dB (re rad/ μ Pa), 他们开展了湖试岸基性能测试; Li 等^[31]从理论上根据光纤水听器的芯轴缠绕结构构建了传感模型, 并利用弹性理论、有限元分析以及数值仿真方法, 对心轴结构和光纤缠绕比进行优化, 实现了高声压灵敏度、宽频响范围、全向性的光纤水听器设计。

上述研究主要集中在分布式光纤连续增敏绕制的成缆方式上, 此类方式虽然结构简单, 但其增敏结构与承力组件直接相连, 在拖曳应用中应力直接作用于增敏单元上, 严重影响拖曳过程的低频响应; 同时, 由于连续增敏, 环境噪声可以沿着弹性体传播, 导致相邻等效基元之间产生相干串扰。2022 年, 何向阁等^[32]采用单根光纤依次缠绕多个水听器骨架的方式构建了包含 54 个水听器的光纤水听拖曳阵列, 水听器的声压灵敏度约为 -157.8 dB (re rad/ μ Pa), 他们还开展了小道

距拖曳性能拖缆地震数据采集实验。同年, 本课题组通过光纤增敏结构、材料设计、阵列结构与制备工艺优化, 研发了具备 15 阵元的分布式光纤水听拖曳阵列, 在 $10\sim 1500$ Hz 范围内获得了 -129.23 dB (re rad/ μ Pa) 的高灵敏度响应, 并通过海试验证完成了 $7\sim 19$ km 探测距离线谱拾取和 10 km 探测距离下水声目标的跟踪与定位, 这展现了分布式光纤水听拖曳阵列技术在水听领域的应用潜力^[33]。

在前期研究的基础上, 本课题组围绕大孔径分布式光纤水听拖曳阵列研制与工程化测试应用, 继续开展了一系列关键技术的攻关, 基于改进型超灵敏分布式光纤声波解调系统 (uDAS) 开展了更为全面的探测能力验证。本文提出了一种包含 192 个基元等间距排列的高密度大孔径分布式光纤水听拖曳阵列, 阐述了其中基元设计优化、姿态感知传感系统集成、阵列批量制备、传感解调方法与阵列标定测试等内容, 介绍了湖上拖曳性能测试过程, 展现了包括阵列水下姿态、拖曳噪声、空间增益和目标探测跟踪等性能的评估结果。

2 分布式光纤水听拖曳阵列设计与制备

2.1 分布式光纤水听拖曳阵列设计

图 1(a) 给出了所设计的大规模分布式光纤水听拖曳阵列结构示意图, 整体阵列由前后隔振段和中间声学段构成, 前后隔振段对的长度都为 25 m, 包含了配重支撑模块、姿态感知模块、信号传输光纤和电缆, 以及凯夫拉承力绳。图 1(b) 展示了隔振段的内部结构以及姿态感知模块、配重支撑模块之间的连接及分布状况, 其中, 姿态感知模块位于距离段首 8 m 和距离段尾 8 m 这两个位置。针对前后隔振段, 通过硅油填充和配重模块的调节, 分别设计了不同的密度配比, 以保证阵列的水下姿态。中间声学段由 2 条 50 m 长的传感阵列组成, 图 1(c) 展示了其内部结构, 由图可见其结构包含高灵敏传感基元、减振夹持模块、姿态感知

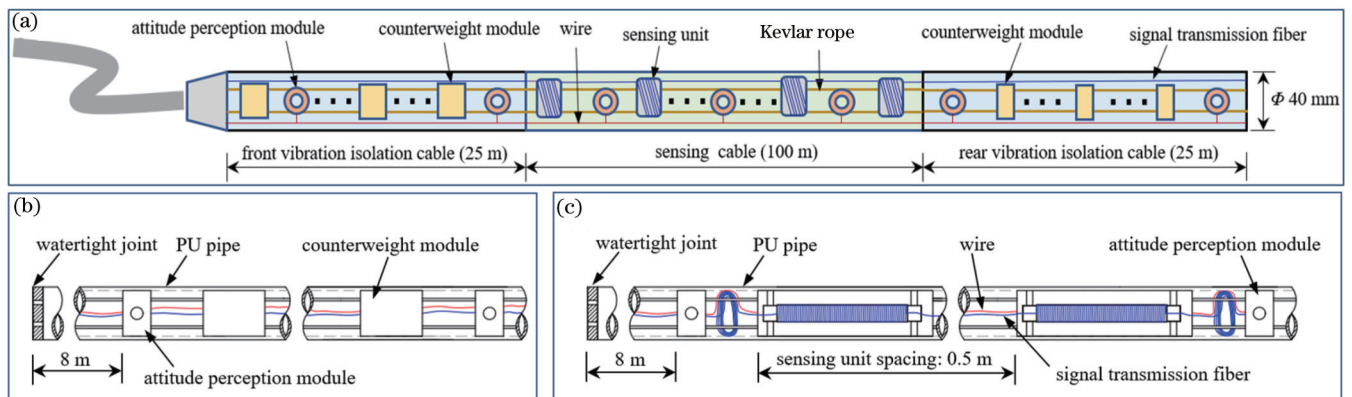


图 1 结构示意图。(a)大规模分布式光纤水听拖曳阵列整体结构示意图;(b)隔振段结构示意图;(c)传感阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams. (a) Schematic diagram of large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array; (b) schematic diagram of isolation cable; (c) schematic diagram of sensing array

模块、信号传输光纤和电缆,以及凯夫拉承力绳。高灵敏传感基元等间距排列,间距为 0.5 m;姿态感知模块位于距离段首 8 m、段中点和段尾 8 m 这三个位置。传感阵列通过硅油填充和密度优化,实现了零浮力配比。

2.2 高灵敏水听基元设计制备

常规单模光纤的声压灵敏度只有 -202 dB (re rad/ μ Pa),无法满足水声探测需求。为了实现高灵敏水声探测,通常需要对光纤进行增敏处理。本课题组提出了一种基于复合材料结构的光纤增敏设计^[33],通过在其上均匀绕制光纤,可以实现宽频带高灵敏的水声基元制备。图 2(a)给出了所制备的水听基元阵列照片,96 个水听基元由一根光纤绕制而成,传感基元上的光纤长度为 10 m,两个基元之间留有 10 m 长的自由光纤,用于隔绝相邻传感单元

的串扰,中间没有光纤熔接点,也不需要耦合器和反射镜等光学元件,这有效减小了光信号的衰减。通过光纤定长控制、绕制过程恒张力保持,以及绕制固化工艺自动化,实现了大批量传感基元的高效一致性制备。

为了保证高灵敏传感基元的一致性,在制备过程中对每 10 个基元进行了 3~5 个抽样标定测试。在驻波管内与标准数字水听器进行比较,数字水听器和光纤水听基元紧邻放置,如图 2(b)插图所示,测试传感基元的声压灵敏度。图 2(b)给出了 5 个抽样传感基元的标定结果,可以看到传感基元在 20 Hz~1 kHz 频率范围内具备 -127.44 dB (re rad/ μ Pa) 的声压灵敏度,标准差为 1.2 dB,展现出了优良的频率响应一致性和基元响应一致性。

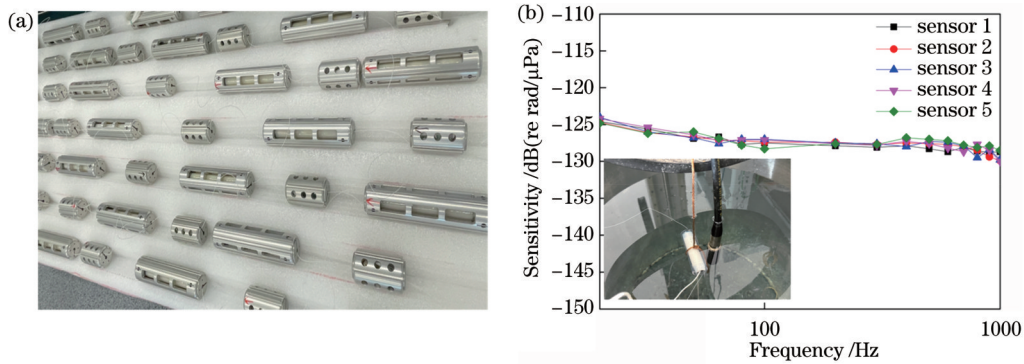


图 2 分布式光纤水听基元。(a)水听基元阵列实物照片;(b)声压灵敏度标定结果

Fig. 2 Distributed optical fiber hydrophone primitive. (a) Hydrophone primitive array physical images; (b) measured results of acoustic pressure sensitivity

2.3 姿态感知系统开发与集成

姿态感知系统由传感器单元、信号中继单元、上位机(PC)软件等构成,整体系统示意图如图 3 所示。姿态测量单元采用 MPU-9250 九轴传感器,MPU-9250 芯片内置 3 轴加速度计、3 轴陀螺仪和 3 轴磁罗盘,通过三维参量实时计算出光缆的姿态角度。深度测量传

感器采用泰科电子(上海)有限公司的 MS5837 压力传感器,通过测量光缆中的硅油压力,间接测量光缆所受到的水压,从而计算出测量点在水中的深度。两个传感单元集成在一个姿态测量单元上,刚性安装在光缆中的支撑环上,以确保实时反映光缆的姿态变化。测量数据通过 485 总线进行传输。姿态测量单元之间采

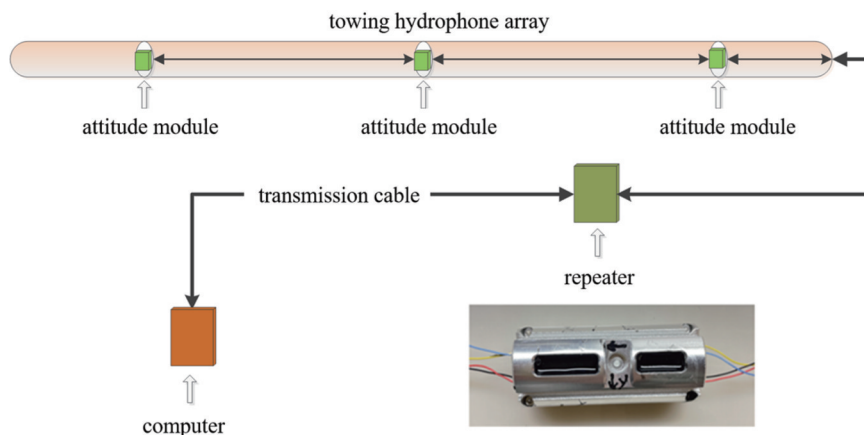


图 3 姿态感知系统结构示意图(插图为所研制的单元模块实物照片)

Fig. 3 Schematic diagram of attitude perception system (illustration is physical photo of unit module developed)

用 4 线连接,分别是电源线、地线和两根通信线。图 3 插图给出了所制备的一批姿态传感器单元的实物照片。

2.4 分布式光纤水听拖曳阵列制备

根据 2.1 节中大规模分布式光纤水听阵列设计,光纤水听拖曳阵列的制备过程为:通过凯夫拉绳以 0.5 m 等间距的方式将支撑体固定连接,凯夫拉绳两端分别与水密接头固定,形成承力结构拖曳阵列骨架。为了降低声学段的加速度响应、减弱动态应变传导,传感单元内部设置了减振夹持结构,光纤水听单元通过减振夹持组件安装在支撑体内部。按照设定的位置,

布置姿态感知模块,并通过电缆实现信号传输互联。承力结构拖缆骨架设计完成后一并封装在 PU 管中,并填充硅油以实现声阻抗匹配的效果,所制备的 50 m 传感阵列实物图如图 4(a)所示。图 4(b)给出了运用 LUNA OBR 4600 检测得到的 50 m 传感阵列中光纤的瑞利散射信号图,整个光纤链路中 96 个基元的损耗仅为 2.74 dB。可以看到,所提出的分布式光纤水听阵列的设计大大简化了系统结构,引入的光纤附加传输损耗小,这是制备大规模分布式光纤水听拖曳阵列的理想方式。

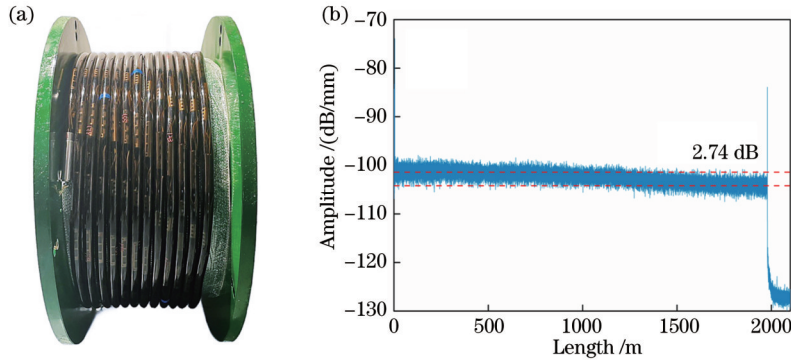


图 4 光纤水听拖曳阵列制备。(a)光纤水听拖曳阵列实物图;(b)50 m 传感阵列中光纤的瑞利散射信号

Fig. 4 Fiber-optic hydrophone towing array preparation. (a) Physical image of fiber-optic hydrophone towing array; (b) Rayleigh scattering signal of optical fiber in 50 m sensing cable

3 分布式光纤水听拖曳阵列解调

分布式光纤水听拖曳阵列的信号解调是基于 DAS 原理,通过外差相干检测、多频率调制和自稳定相位解调方式来实现的。由本课题组研发的改进型超灵敏分布式光纤声波感知系统(uDAS)的工作原理可参看文献[33]。在此,对 uDAS 系统进行简单描述:超

窄线宽激光源经过强度调制,进入声光移频环并产生多频高相干光脉冲,通过光环形器注入光纤水听拖曳阵列,光纤水听阵列传感单元的背向瑞利散射信号经过环形器进入由 3 个光电探测器组成的信号探测模块,通过 3×3 相位解调算法获得高精度的相位信息。

图 5(a)给出了 uDAS 系统样机照片,采用了多频脉冲外差干涉很好地抑制了相干衰落,通过噪声抑制,

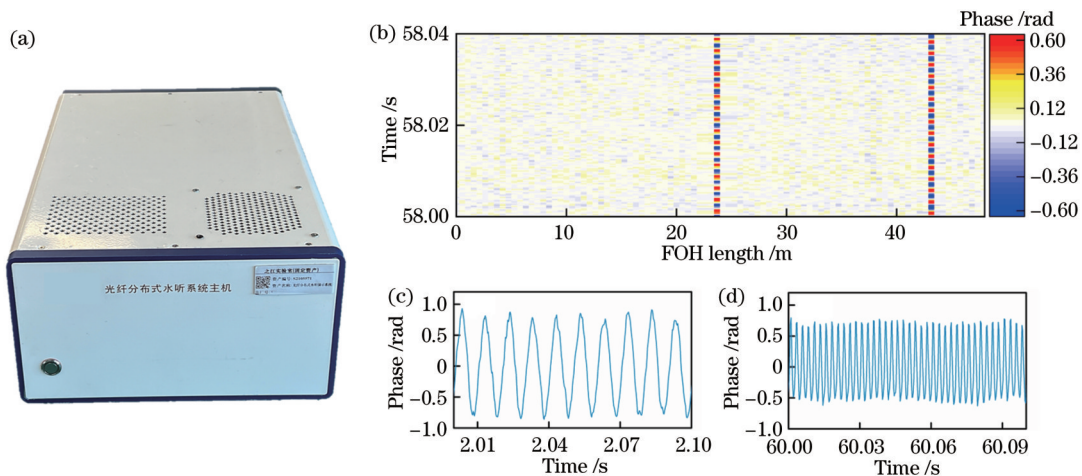


图 5 分布式光纤水听拖曳阵列解调系统。(a)uDAS 系统实物照片;(b)uDAS 系统解调声音信号响应的瀑布图;(c)解调得到 100 Hz 信号的时域相位图;(d)解调得到 400 Hz 信号的时域相位图

Fig. 5 Demodulation system of distributed fiber-optic hydrophone towing array. (a) Physical image of uDAS system; (b) waterfall plot of demodulated acoustic signal response of uDAS system; (c) demodulated time-domain phase change of 100 Hz signal; (d) demodulated time-domain phase change of 400 Hz signal

系统在 5 m 标距长度下实现了超小系统底噪 ($-78.14 \text{ dB rad}/\sqrt{\text{Hz}}$), 在 100 Hz 的动态范围超过 -120 dB , 测量带宽为 4 kHz。

图 5(b) 给出了 uDAS 系统解调得到的 50 m 传感阵列第 50 号与第 90 号基元声音信号响应的瀑布图, 从图中可以清晰地看到 2 个水听基元的位置, 且频率响应清晰一致性较好。由于放在实验室环境, 加之阵列灵敏度高, 环境噪声在瀑布图上也存在随机的强弱分布。图 5(c) 和图 5(d) 给出了 100 Hz 和 400 Hz 信号作用下, 解调得到的时域相位图。可以看到除了包含环境低频噪声(慢速缓变外包络), 激发信号被高保真地还原。

4 湖试性能测试

所研制的大规模分布式光纤水听拖曳阵列湖试在湖南省东江湖水域进行, 拖曳区域的平均水深约 70~80 m。试验中配备绞车以及 500 m 长度的通信光缆用于信号传输并减少接收船主体噪声对于传感阵列的影响; 另配备声源船一艘, 携带低频声源模拟人造水下目标, 发射线谱信号。图 6(a) 给出了湖试过程中接收母船的拖曳运动轨迹, 可以看到声源位于拖曳航道一侧, 已满足拖曳过程中信号源相对于阵列到达角的变化。图 6(b) 是实现现场拖曳过程的照片。性能测试内容包括拖曳阵列的拖曳姿态、环境适应性、线谱探测以及声源定位能力。

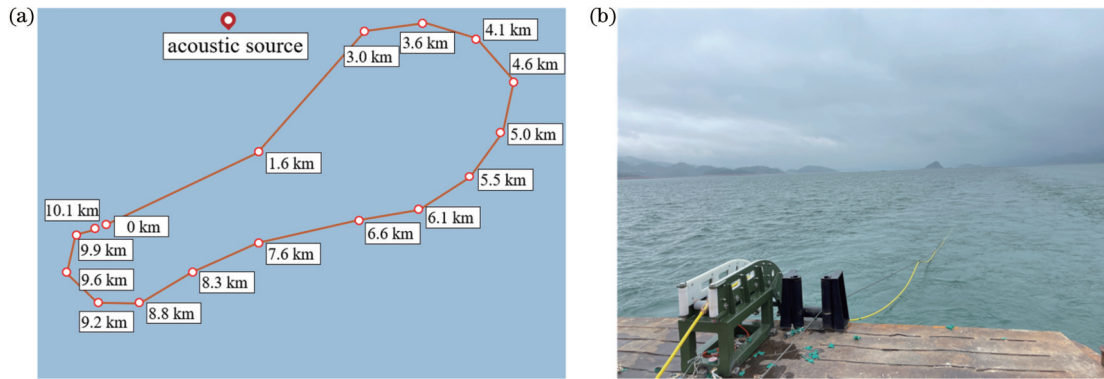


图 6 湖试测试。(a) 湖试拖曳轨迹图; (b) 现场拖曳过程照片
Fig. 6 Lake trial test. (a) Track map of lake trial; (b) photo of towing process

4.1 拖曳姿态

为了测试姿态感知系统性能和验证所设计的拖曳阵列的姿态控制策略, 测试了 6 kn 航速下的分布式光纤水听拖曳阵列的水下姿态。阵列布放时通信光缆下水的长度为 90 m。图 7 给出了 150 m 长度(声学段 100 m)分布式光纤水听拖曳阵列测试结果, 并采用 OrcaFlex 软件对光纤水听拖曳阵列水下拖曳的姿态进

行了仿真比较。图 7(a) 给出了姿态感知系统的现场测试界面; 图 7(b) 给出了实验和仿真结果比较, 在 6 kn 航速下, 阵列的首部深度为 14.7 m, 尾部深度为 31.3 m, 阵列声学段的倾角约为 7.8° , 阵列深度的实测结果和仿真结果的吻合度较好。整体来看, 在 6 kn 的航速下阵列水平度较好, 在更高速的拖曳航速下, 阵列水平度将会得到进一步的改善。

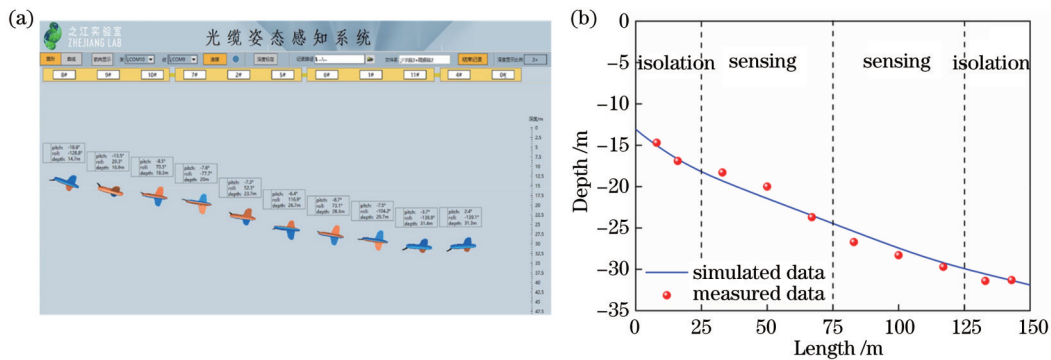


图 7 水听阵列的拖曳姿态。(a) 姿态感知系统现场测试界面; (b) 水听阵列在 6 kn 航速下的深度
Fig. 7 Towing attitude of hydrophone array. (a) Testing interface of attitude perception system; (b) hydrophone array depth data at 6 kn

4.2 拖曳噪声

为了评估不同航速下拖曳噪声的变化, 试验中记录了分布式光纤水听拖曳阵列在不同航速下的噪声信

号, 开展功率谱密度(PSD)分析。拖曳过程中, 特定航速下, 基于姿态传感器数据观测水下阵列姿态, 确保拖曳系统进入稳定状态后, 采集阵列噪声数据。

图 8(a)给出了在 1 kn、3 kn 和 6 kn 拖曳航速下采集到的噪声 PSD 数据。可以看到,随着拖曳航速的增加,流噪声的 PSD 明显增加,拖曳噪声在低频段 (<100 Hz) 更加显著,这是由于拖曳噪声来自于呼吸波、膨胀波及湍流边界层噪声,这些噪声均以低频为主^[34]。图 8(b)给出 4 个不同频率段的拖曳噪声随着拖曳航速的变化。具体地,以 100 Hz、400 Hz 和 1000 Hz 为例: 100 Hz 处的噪声 PSD 从 -55.79 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 增大到 -33.53 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$), 比 1 kn 航速拖曳下增加了 22.26 dB; 400 Hz 处的噪声 PSD 从

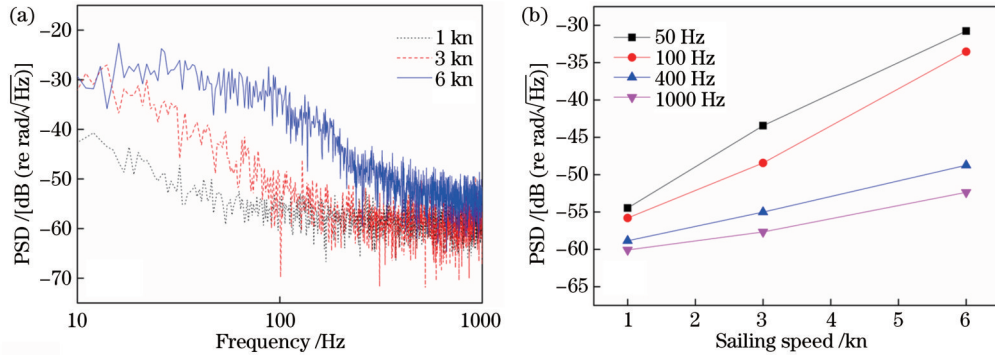


图 8 水听拖曳阵列噪声分析。(a)不同航速下拖缆 PSD;(b)4 个不同频率段 PSD 随着拖曳航速的变化

Fig. 8 Hydrophone towing array noise analysis. (a) PSD of towing system at different sailing speed; (b) PSD for four frequencies varying with sailing speeds

4.3 线谱探测

分布式光纤水听拖曳阵列各通道的信号相位一致性是实现波束赋形、目标定位等相干阵列信号处理的基础,是水听阵列的重要指标。为了测试不同通道的相位一致性,发射船发射 300~1500 Hz 的线性扫频信号,每个线谱频率的持续时间为 6 s,接收船在 6 kn 拖曳航速下采集数据。

图 9 显示了分布式光纤水听拖曳阵列的声学段首部位置 17、18、19、20 通道,中部位置 122、123、124、125 通道,以及尾部位置 169、170、171、172 通道,对 600 Hz 线谱信号的响应。其中,图 9(a)为采集到的 12 个通道的相位时域谱。可以看到:阵列尾部各个通道的相位变化大小相近,时域响应较为平坦;阵列头部受水流冲击摆动,所接收到的时域信号波动较大,表现出明显的低频噪声干扰。图 9(b)给出了 600 Hz 信号的 PSD 结果,平均 PSD 峰值为 -11.8 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$),起伏小于 ± 0.7 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$)。图 9(c)给出了 400 Hz、500 Hz 信号的 PSD 结果,400 Hz 信号的平均 PSD 峰值为 -18.2 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$),起伏小于 ± 1.8 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$),500 Hz 信号的平均 PSD 峰值为 -15.1 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$),起伏小于 ± 1.2 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$)。可以看到虽然各个通道受到噪声的影响不同,特别是阵列首部的几个通道噪声较大,但线谱信号的响应一致性良好,这为阵列信号处

理提供了良好的基础。
—58.84 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 增大到 -48.73 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$), 比 1 kn 航速拖曳下增加了 10.11 dB; 1000 Hz 处的噪声 PSD 从 -60.07 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$) 增大到 -52.36 dB (re rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$), 比 1 kn 航速拖曳下增加了 7.71 dB。相比于文献[32]报道的结果,所研制的分布式光纤水听拖曳阵列表现出更为良好的拖曳噪声抑制能力。考虑到随着航速加大,母船本体的发动机噪声也会增强,可以推断实际拖曳系统的流噪声抑制能力比目前的测试结果更优。

理提供了良好的基础。

对 192 个传感单元采集的数据进行传统波束合成 (CBF) 阵列信号处理,评估阵列空间增益。图 10(a)、(b)展示了 300~1500 Hz 线谱信号波束赋形前后的时频图,可以看到通过波束赋形后噪声得到了明显的抑制,不同频率下的整体信噪比都得到了大幅提升。图 10(c)给出了 400 Hz 信号波束赋形前后的功率噪声谱变化,可以看到阵列的空间增益达到了 16.87 dB。400 Hz 线谱信号对应的声波波长为 3.75 m,理论上有效基元数为 53,理论空间增益为 17.24 dB,实验数据与理论值相吻合,侧面反映出所制备阵列的频率响应一致性。

4.4 目标定位

将低频声源作为模拟水下目标,发射 400~600 Hz 的线性扫频信号,接收船在 6 kn 拖曳航速下采集数据,根据采集到的线谱信号,采用 CBF 来抑制随机噪声,增强入射声信号的方向,开展到达角估计 (DOA),获取目标的方位角信息。图 11(a)给出了 400 Hz 线谱信号的 DOA 计算结果。可以看到,分布式等效阵列元件的振幅响应与入射角有关,通过对阵列的每个等效元件采样的信号进行相干求和,减少了来自信号波束外方向的噪声,提高入射角度方向的 SNR。通过扫描从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 的转向角,拖曳阵列的 DOA 指向性明显。需要说明的是,DOA 主瓣旁出现了 4~5 个次级主峰,

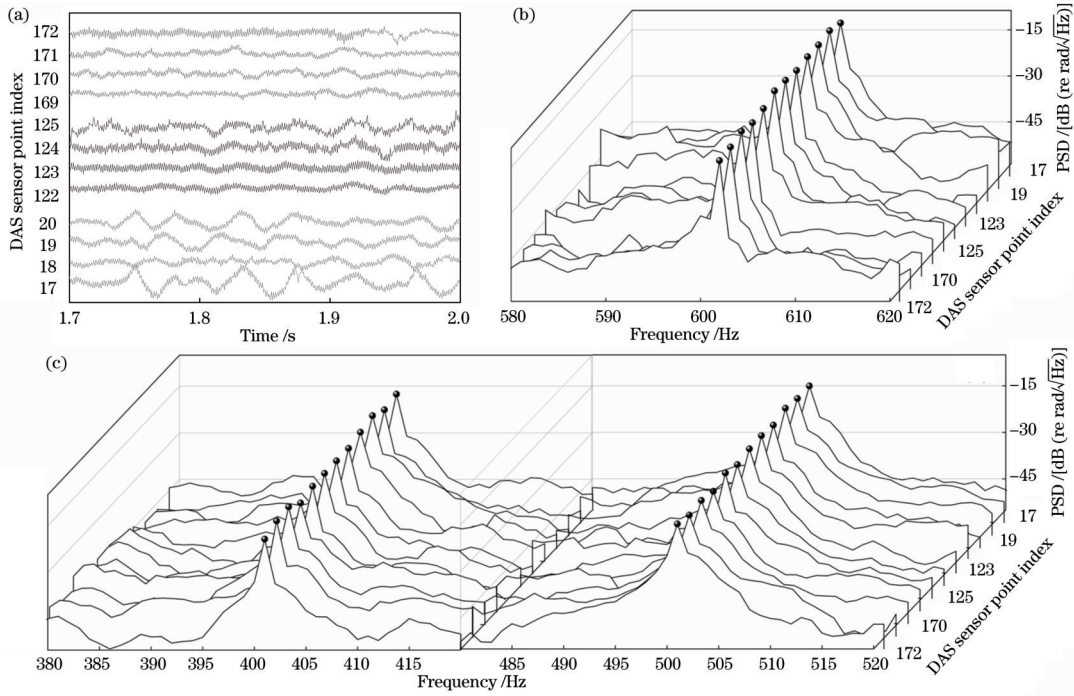


图 9 频率响应结果。(a)12个通道采集到的 600 Hz 信号的相位时域谱;(b)600 Hz 信号的 PSD 结果;(c)400 Hz 和 500 Hz 信号的 PSD 结果

Fig. 9 Results of signal frequency response. (a) Phase evolutions of 600 Hz signals from 12 channels; (b) PSD of 600 Hz signal; (c) PSD of 400 Hz and 500 Hz signals

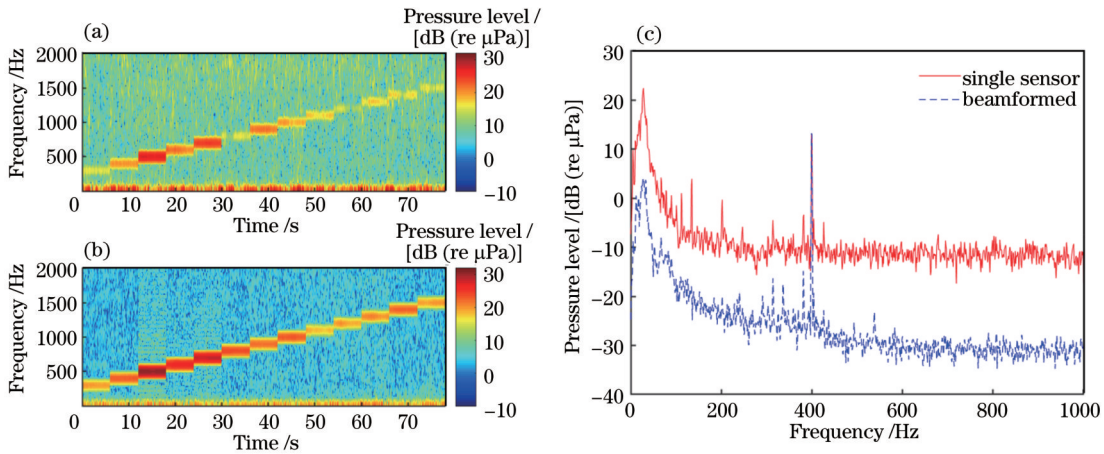


图 10 信号波束赋形。(a)(b)波束赋形前后时频图;(c)400 Hz 功率噪声谱比较

Fig. 10 Signal beamforming. (a)(b) Spectrograms before and after beamforming; (c) 400 Hz power noise spectra

出现该现象的原因是:湖底和两侧山坡的反射存在较为明显的多径效应,但其强度与主瓣相差较大,不影响主方向的判断。对拖曳过程中连续采集的线谱信号进行目标轨迹 DOA 提取跟踪,得到如图 11(b)所示的方位历程图,可以看出:随着拖曳的进行,侧面模拟声源相对阵列的 DOA 呈现先变小再逐渐增大的趋势,这与实际拖曳从侧面接近声源又远离声源的工况相符。实验结果表明,分布式光纤水听拖曳阵列能够实现目标定位和方位轨迹提取。

5 结 论

本文详细描述了大规模分布式光纤水听拖曳阵列的设计、制备和测试过程,介绍了 uDAS 信号解调系统,分析了湖试数据,得到以下结论:

- 1)所研制的大规模分布式光纤水听拖曳阵列具备 20~1000 Hz 宽频带高声压灵敏度响应,声压灵敏度平均达到 $-127.44 \text{ dB (re rad}/\mu\text{Pa)}$,标准差为 1.2 dB;
- 2)所研制的大规模分布式光纤水听拖曳阵列具备实时姿态感知能力,可以实现在水下较好的阵列姿态保持;

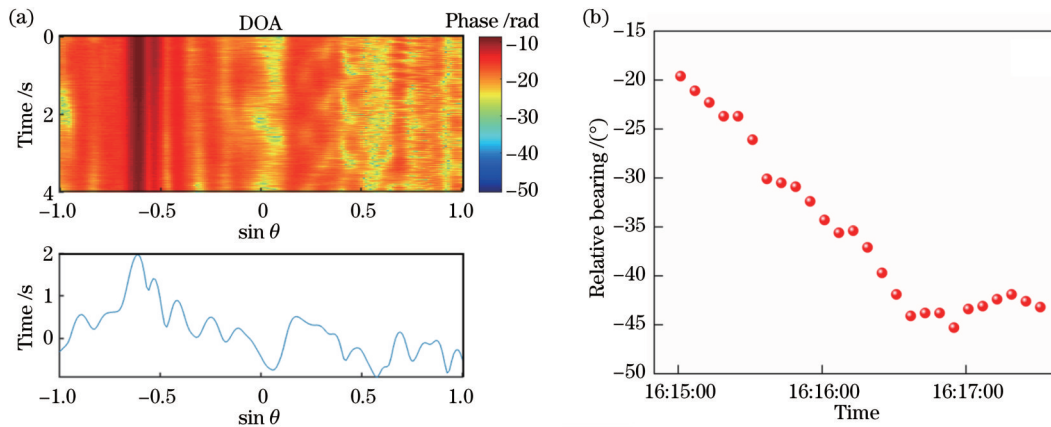


图 11 到达角估计。(a)DOA 结果;(b)水声目标探测方位历程图

Fig. 11 Direction-of-arrival estimation. (a) Results of DOA; (b) relative bearing of underwater acoustic target detection

3)在 6 kn 拖速下,所研制的大规模分布式光纤水听器拖曳阵列表现出良好的拖曳噪声抑制能力,通过阵列信号处理,水听器阵列的空间增益达到近 17 dB,DOA 估计方向明显,能够实现水声目标定位和方位轨迹提取。

参 考 文 献

- [1] Kirkendall C K, Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): R197-R216.
- [2] Toky A, Singh R P, Das S. Localization schemes for underwater acoustic sensor networks: a review[J]. *Computer Science Review*, 2020, 37: 100241.
- [3] Cole J H, Kirkendall C, Dandridge A, et al. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory[J]. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 2004, 90(3): 40-57.
- [4] Peng G D, Chu P L. *Optical fiber hydrophone systems*[M]// *Fiber Optic Sensors*. Boca Raton: CRC Press, 2008: 369-373.
- [5] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Recent progress in fiber-optic hydrophones[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 109-122.
- [6] Yang Y, Luo Z C, Wang Z M, et al. High-performance fiber optic interferometric hydrophone based on push-pull structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-13.
- [7] Liu F, Xie S R, Gu L J, et al. Common-mode noise suppression technique in interferometric fiber-optic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(21): 5619-5627.
- [8] 郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106003.
- [9] Karas A R, Papageorgiou A W, Cook P R, et al. A passive optical fibre hydrophone array utilising fibre Bragg grating sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10539: 105390H.
- [10] Li M, Sun Z H, Zhang X L, et al. Development of high sensitivity eight-element multiplexed fiber laser acoustic pressure hydrophone array and interrogation system[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 253-260.
- [11] Zhang W T, Liu Y L, Li F, et al. Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: theory and experiment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1349-1352.
- [12] Lavrov V S, Plotnikov M Y, Aksarin S M, et al. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 47-51.
- [13] 冉曾令, 饶云江, 王熙明, 等. uDAS[®]分布式光纤传感地震仪及其应用[J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 41-49.
- [14] Ran Z L, Rao Y J, Wang X M, et al. Ultra-sensitive distributed acoustic sensor seismograph and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1): 41-49.
- [15] Masoudi A, Newson T P. Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 011501.
- [16] Bruni S, Goodall R, Mei T X, et al. Control and monitoring for railway vehicle dynamics[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(7/8): 743-779.
- [17] 刘威, 朱鸿鹄, 王涛, 等. 基于分布式声波传感的大地探测技术研究进展[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 29-41.
- [18] Liu W, Zhu H H, Wang T, et al. Research progress of earth exploration technologies based on distributed acoustic sensing[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 29-41.
- [19] Wang Z T, Jiang J L, Wang Z N, et al. Quasi-distributed acoustic sensing with interleaved identical chirped pulses for multiplying the measurement slew-rate[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38465-38479.
- [20] Rao Y J, Wang Z N, Wu H J, et al. Recent advances in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) [J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1): 1-30.
- [21] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847A[P]. 1993-03-16.
- [22] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 074207.
- [23] Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 074207.
- [24] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [25] Shang Y, Sun M C, Wang C, et al. Research progress in distributed acoustic sensing techniques[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 6060.
- [26] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306009.
- [27] Meng Z, Chen W, Wang J F, et al. Research progress of fiber optic hydrophone technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306009.
- [28] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0100001.
- [29] Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic

- sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0100001.
- [25] 王照勇, 刘依凡, 陈义赐, 等. 分布式光纤水听器技术研究和应用进展[J]. *光学学报*, 2024, 44(1): 0100010.
Wang Z Y, Liu Y F, Chen Y C, et al. Research and application progress of distributed fiber optic hydrophone technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(1): 0100010.
- [26] Liu X H, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic sensing with Michelson interferometer demodulation[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 193-198.
- [27] Dandridge A. Fiber optic interferometric sensors at sea[J]. *Optics and Photonics News*, 2019, 30(6): 34-41.
- [28] Guan H J, Han B, Han Z W, et al. High performance DAS-based optical fiber hydrophone[C]//Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC), October 24-27, 2020, Beijing, China. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2020: M4A.100.
- [29] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on Φ -OTDR and its field test[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [30] Chen J F, Li H, Xiao X P, et al. Fully distributed hydroacoustic sensing based on ultra-highly sensitive and lightweight fiber-optic hydrophone cable[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 169: 107734.
- [31] Li Z Y, Wang C J, Gui X, et al. A high-performance fiber-optic hydrophone for large scale arrays[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4201-4210.
- [32] 何向阁, 文鹏飞, 杨辉, 等. 基于分布式光纤传感技术实现的小道距海上拖缆地震数据采集系统[J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 70-77.
He X G, Wen P F, Yang H, et al. Marine towing cable seismic acquisition with small trace interval based on distributed optical fiber sensing[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1): 70-77.
- [33] Yan G F, Wang D L, Long J Q, et al. High-performance towing cable hydrophone array with an improved ultra-sensitive fiber-optic distributed acoustic sensing system[J]. *Optics Express*, 2023, 31(16): 25545-25556.
- [34] Beerens S P, van Ijsselmuide S P, Volwerk C, et al. Flow noise analysis of towed sonar arrays[M]. Swanley: Nexus Media Limited, 1999.

Large-Scale Distributed Fiber-Optic Hydrophone Towing Array and Lake Trial Performance Test

Long Junqiu¹, Jiang Lang¹, Xiao Chun¹, Guo Ruqian¹, Yan Guofeng^{1*}, Wang Delin²,
Ran Zengling³, Gong Yuan³, Rao Yunjiang^{1,3**}

¹Research Center for Optical Fiber Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

²Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

³School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract

Objective Acoustics detection is significant for national marine military defense, resource exploration, and disaster monitoring. Hydrophone technology is a key means of underwater acoustic detection and has been extensively researched. Compared to traditional electronic hydrophones, fiber optic hydrophone (FOH) has advantages such as resistance to electromagnetic interference, small size, light weight, and high detection sensitivity, making them a research hotspot for the new generation of hydrophones. Compared to traditional point-type FOH arrays, FOH based on fiber-optic distributed acoustic sensing technology (DAS), has advantages such as large capacity, high consistency, miniaturization, and low cost. It has gradually become a research hotspot in recent years. In 2017, due to its unique advantages, the DAS technology was first introduced into the field of underwater acoustic detection. This new type of FOH was continuously wound with one fiber, without any fusion splice and other optical components, which greatly reduces the complexity of the system and the manufacturing process and shows the potential application as the distributed FOH array. In 2022, a short tested distributed fiber-optic hydrophone towing array was proposed and demonstrated in a sea trial. We elaborate the comprehensive study on the development of a large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array with 192 independent sensing units, including the optimization of array-structure design, the integration of attitude perception system, the large-scale manufacture technology, the demodulation methods, and the calibration testing. The lake trial test with the performance evaluation on the array towing attitude, the noise test, the spatial gain, and the localization of the artificial target is presented as well.

Methods The distributed FOH array is composed of an acoustic sensing cable sandwiched between front and rear vibration-isolation cables. Each vibration isolation cable is 25 m long, with different designed density ratios. The acoustic sensing cable consists of two 50 m long sections, including the high acoustic pressure sensitivity sensing units, the vibration damping modules, the attitude perception modules, the signal transmission fibers, and the Kevlar tension ropes,

with a neutral buoyancy in water. The acoustic sensing unit is specially designed with a fiber evenly wrapped on the composite material structure to enhance acoustic pressure sensitivity. The 50 m long sensing cable includes 96 sensing units, which are wound by a single fiber. Based on the automation of the fiber length control, the constant tension maintenance, and the winding curing process, we achieve the highly efficient and consistent manufacture of the large-scale sensing unit. The attitude perception module has an oil pressure hole to sense the hydraulic pressure and evaluate the depth of the array with an error of less than 2 cm. Besides, the local incline angle can be acquired by the attitude perception chip embedded in the module. With the home-developed signal acquisition terminal and display software, the attitude angle and the depth of the cable can be obtained in real time.

Results and Discussions The lake trial test of the developed large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array is carried out in Dongjiang Lake in Hunan Province. When the towing speed is 6 kn, the depth at the front of the array is 14.7 m, while the depth at the tail is 31.3 m. The inclination angle of the acoustic section of the array is about 7.8° , maintaining a good level (Fig. 7). The measured results of the array depth match well with the simulation results. The variation of towing noise with the towing speed shows that the hydrophone towing array has good noise suppression capabilities. The phase time domain spectrum of the 600 Hz signals from 12 channels of the array, as well as the PSD results of the 400 Hz, 500 Hz, and 600 Hz signals are presented in Fig. 9. Although different channels suffer different levels of noise, the response to the line spectrum signal exhibits excellent consistency. Traditional beamforming (CBF) signal processing is performed and the spatial gain of the whole array can be achieved as 16.87 dB (Fig. 10). The arrival angle estimation (DOA) is also conducted at 400 Hz. The relatively bearing time trajectory of the hydroacoustic target is obtained by continuously recording the DOA data (Fig. 11), which indicates that the distributed FOH towing array can achieve target trajectory tracking.

Conclusions We elaborate on the design, manufacture, and testing process of a large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array, introduce the uDAS signal demodulation system, and analyze the lake trial. The conclusions are listed below:

- 1) The large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array has an average acoustic pressure sensitivity of -127.44 dB (re rad/uPa) with a standard deviation of 1.2 dB, within the frequency range of 20–1000 Hz.
- 2) The large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array has real-time attitude perception capability and can maintain good array posture underwater.
- 3) At a towing speed of 6 kn, the large-scale distributed fiber-optic hydrophone towing array shows good towing noise suppression capability. By array signal processing, the spatial gain of the hydrophone array reaches nearly 17 dB and the DOA estimation is achieved. It can achieve underwater acoustic target location and trajectory tracking.

Key words fiber optics; fiber-optic hydrophone; fiber-optic hydrophone towing array; fiber-optic distributed acoustic sensing; acoustic pressure sensitivity; attitude perception; target trajectory tracking