

doi: 10.7690/bgzdh.2022.12.008

基于沿海声层析技术的水下目标探测技术

高怡心¹, 谢心怡¹, 许世杰¹, 李光明², 黄豪彩¹

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071)

摘要: 针对难以对水下目标进行快速有效探测的难题, 利用声层析的方法观测域内的水下目标尾流分布及其随时间演变过程, 通过流场变化以实现水下目标的探测。通过沿海声层析 (coastal acoustic tomography, CAT) 5 站声同步传输观测试验, 获得双向声传播时间数据, 进行流场分布反演; 利用 3 维反演方法观测得到自主式水下潜器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 潜航所在深度的水平流场演变过程, 反演结果与直接计算的路径平均流速基本吻合; 实验过程中, 鱼雷型水下机器人经过后流场产生明显波动, 声学多普勒流速剖面仪 (acoustic doppler velocity profiler, ADCP) 与 CAT 观测结果分别为 1.57, 1.43 m/s。结果表明: 利用 CAT 方法在小尺度区域内观测探测 AUV 目标取得的成功, 为后续的观测实验打下了基础。

关键词: 沿海声层析; 目标观测; 小尺度; 水下监测网络; 反演方法

中图分类号: TJ63 **文献标志码:** A

Underwater Target Detection Technology Based on Coastal Acoustic Tomography

Gao Yixin¹, Xie Xinyi¹, Xu Shijie¹, Li Guangming², Huang Haocai¹

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

2. National Defense Science and Technology Innovation Research Institute,
PLA Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to detect underwater targets quickly and effectively, the acoustic tomography method is used to observe the wake distribution of underwater targets in the domain and its evolution process with time, and the detection of underwater targets is realized through the change of flow field. The experiment of simultaneous acoustic transmission at 5 stations of coastal acoustic tomography (CAT) is carried out, and the two-way acoustic propagation time data are obtained, and the flow field distribution is inverted; Three-dimensional inversion method is used to observe the evolution process of the horizontal flow field at the depth of the autonomous underwater vehicle (autonomous under water vehicle, AUV), and the inversion results are basically consistent with the path-averaged velocity calculated directly; During the experiment, the flow field of the underwater vehicle was obviously fluctuated, and the acoustic Doppler current profiler (acoustic Doppler velocity profiler, ADCP) and CAT observations were 1.57 m/s and 1.43 m/s, respectively. The results show that the success of using CAT method to observe and detect AUV targets in small-scale areas lays a foundation for the follow-up observation experiments.

Keywords: coastal acoustic tomography; target observation; small scale; underwater monitor; inversion method

0 引言

由于自主式水下潜器 (AUV) 等水下机器人尺寸小、信号弱, 且其经常活动的港口和沿海等浅水地带会存在船舶残骸、港壁、海床等后向散射体或边界, 混响噪声严重, 是当前传统探测手段的主要技术瓶颈^[1]。随着减振降噪和新型隐身材料等技术的发展, 仅采用声纳进行潜艇和无人潜器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 等水下目标的精确搜索与定位打击变得非常困难, 亟需发展新型探测技术和手段对水下目标进行探测和有效反制^[2-4]。沿海声层析技术 (CAT) 通过换能器之间声信

号的相互传输获得的传播时间差用于计算沿声线路径上的路径平均流速。CAT 作为海洋声层析 (ocean acoustic tomography, OAT) 在沿海的应用, 利用多站水声传感网络, 可对大范围的水流动态信息和水参数进行遥感观测^[5-6]。

潜艇及 AUV 等水下目标以一定航速航行时, 由于受本体效应、冷却水的排放以及螺旋桨对海水扰动的影响, 会在尾部留下目标尾流, 水下目标特征明显的尾流为目标探测提供新的思路^[7]。目标尾流具有范围大、持续时间长、不宜消除和不易伪装的特点^[8-9]。而尾流将对声波在不同 CAT 系统间传

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-09-20

作者简介: 高怡心 (2000—), 女, 安徽人, 从事基于沿海声层析的高精度温度场与流场观测研究。E-mail: gaoyxcn@zju.edu.cn。

播时间产生影响,依据声波在各 CAT 测站间的传播时间信息,利用反演算法来重构目标流场,根据流场的演化过程进而进行水下目标探测;因此,应用高频声学反演技术,开发 3 维反演算法,在水库布置 5 套系统对尾流进行观测分析并验证水下尾流探测的可行性。

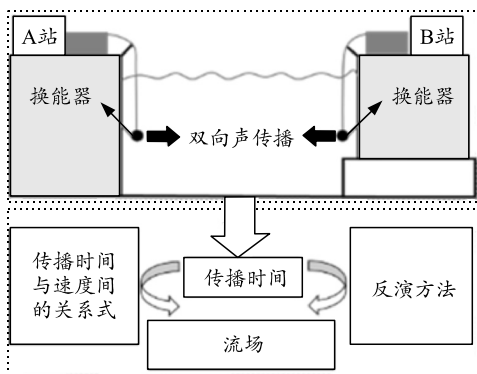
1 原理与试验

1.1 观测原理

图 1(a)为 CAT 系统。CAT 系统主要包括声层析系统主机、GPS、蓝牙监测、换能器电源、主机电源以及线缆。CAT 系统是采用自相关性良好的 M 序列伪随机声信号,通过 CFG 文件的编写来设置信号类型与信号传输方式。多个观测节点的换能器通过线缆与主机连接于水下进行双向声信号传输,如图 1(b)所示,基于获得的传播时间差数据,通过反演算法重建流场。



(a) CAT 系统



(b) CAT 观测原理

图 1 CAT 系统与观测原理

图 2 为站位位置,5 个 CAT 站点进行同步观测,AUV 在观测区域内经过时其尾流会对原环境流场产生一定的扰动。将 CAT 系统置于浮标或船上,每台 CAT 系统配备一个具有高精度 GPS 用于各仪器之间的时间同步,以确保传播时间差的正确计算。此外,GPS 也可获得各站位的位置信息,

作为实际站位位置的参考。

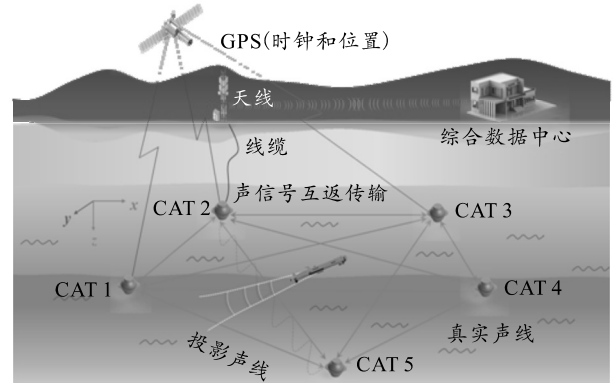


图 2 站位位置

在反演计算之前,需要先进行声线模拟,通过声线模拟可较直观地得出在试验观测区域内的声传播情况,包括声线的传播路径、发射角度、长度。根据声线模拟结果,给定初始的时延窗以分辨声信号的多到达径,进而获得反演需要用到的传播时间数据^[10]。图 3 所示为 3 维流场反演的流程:首先,计算出每一层的路径平均流速,根据每层的反演误差进行迭代校正;然后,基于垂直分层路径平均流速求得多层水平流场,获得 3 维流场时空结构。3 维流场的观测需要使用更多的观测站,采集尽可能多的贯穿观测区域的声线时间信息,并在垂直剖面反演中取得较高精度的分层路径平均流速。利用高精度的声线模拟不仅能判断观测不同水层的流速,而且可以指导现场的试验设置,以确保声线在较集中的水层获得更高质量的声信号。

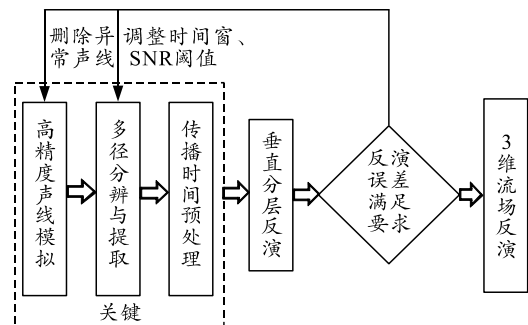


图 3 3 维流场反演流程

1.2 实验设置

2022 年 3 月 1 日,笔者在湖南省宁乡县黄材水库开展了声学 AUV 观测实验。实验持续大约 0.5 h。实验地点及站位位置如图 4 所示。该实验使用 5 台 CAT 仪器进行声信号互反传输,声信号选用 7 阶 M 序列, $Q=2$,以保证各站位之间同发同收。图中利用白色圆圈和白色三角形分别展示了 5 个 CAT 仪器 (T1—T5) 以及 TD (temperature-depth sensors) 的站

位布置。白色箭头是 AUV 的航迹。各站间连线代表声线传输路径的水平投影。T1 是水库的试验平台, T2 布置在小型养殖区的固定架上。实验中也同时使用了 TD、ADCP 采集温度、流速、地形等数据。

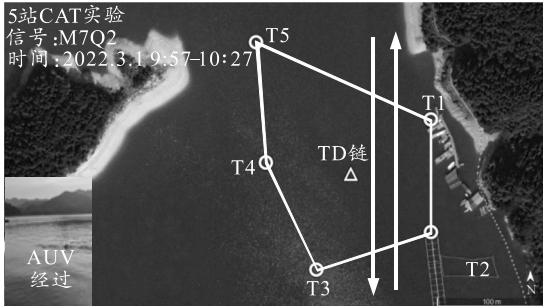


图 4 实验地点及站位布置

T1, T2, T3, T4, T5 站位换能器分别布置于水深 10, 15, 15, 15 和 15 m 处, 分别与重物、浮标连接。CAT 系统布置于浮标内, 浮标通过重物锚定于观测位置, 布置完成后关闭浮标盖, 并覆盖一层防雨布。最终布置完成后的浮标如图 5 所示, 旁边的浮球是用于试验初选位置标记。



图 5 CAT 系统实际布放情况和试验用 AUV

表 1 是各观测站位节点的距离, 最大间距为 235.8 m, 整个观测区域在不超过 200 m×200 m 的小尺度范围内。试验用 AUV 长度不超过 3 m, 最大速度 2.5 节, 在观测域内的运行轨迹是先下潜至 4~5 m 水深处, 航行一段时间后再上浮。

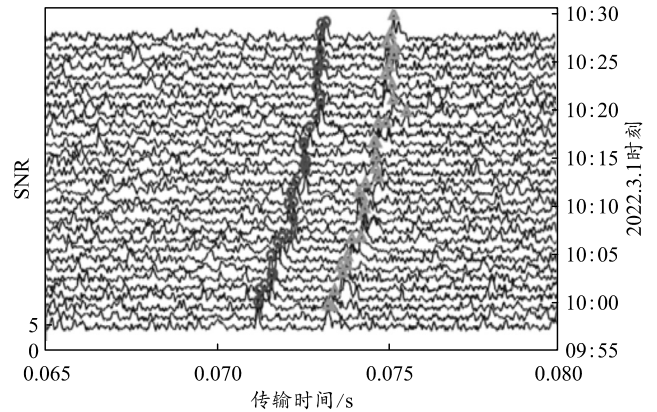
表 1 站位间距 m

站位	T1-T2	T1-T3	T1-T4	T1-T5	T2-T3
距离	102.7	172.6	156.2	175.0	110.0
站位	T2-T4	T2-T5	T3-T4	T3-T5	T4-T5
距离	163.6	235.8	108.1	214.9	110.3

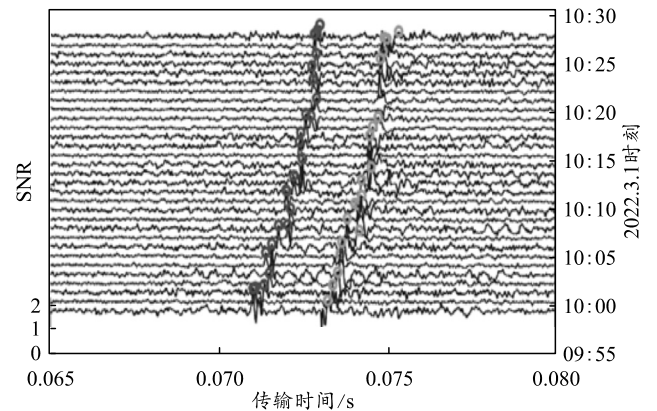
2 观测结果

获得接收数据后, 对每个 CAT 站接收到的数据

进行互相关处理。图 6 是以 T1-T2 传输路径为例的双向相关模式堆叠图, 其中, 图 6(a)为 T2 站对 T1 站发射信号的相关结果, 图 6(b)为 T1 站对 T2 站发射信号的相关结果, 结果对应的峰值即为不同声线路径对应的传播时间。本次试验识别并提取出 2 个有效到达峰, 左峰和右峰分别对应直达径和表面反射径。横坐标代表传播时间, 纵坐标为信号的传输时刻, 高度轴是声信号的信噪比。



(a) T2 站所收 T1 发射信号



(b) T1 站所收 T2 发射信号

图 6 T1-T2 的互返传输的互相关结果

图 7 是 AUV 始于 9:57 的运动轨迹, 从 T2-T3 边进入穿过观测区域从 T1-T5 穿出。整个过程为先下潜, 巡游, 再上升。AUV 速度是 2.5 节, 其潜航深度在 4 m 深度附近, 而各观测站点的换能器布放深度在 10~15 m 位置, 需通过 3 维反演算法计算得到不同深度层的水平流场。

通过 CAT 多站点协同工作组成水下传感网络, 对观测区域进行不间断的声波照射, 将 AUV 进入探测区域、在探测范围内航行及驶出探测区域的过程进行连续分析。在本次试验中, 由于 T5 和 T4 站位的表面反射径信噪比很低, 剔除了信噪比过低的数据用于 3 维反演的数据。图 8(a)~(f)是水深 4 m 附近 6 张经典的水平流场反演结果。箭头长度代表

流速大小，可见流速箭头整体较短，观测区域的流总体较小，总体来说很平稳并且几乎无流。直到 AUV 经过后由于尾流扰动整个流场产生较大波动，最大速度达到 1.43 m/s，并随时间推移缓慢变化。AUV 是 9:57 从 T2-T3 传输线为入口游行，以 2.5 节的速度向北前进，在 9:57 左右 T1 位置附近流速明显变大，由于 AUV 尾流的扰动影响，流速大小和方向均产生了明显波动。10:10 左右 AUV 从 T5 附近返回，对应的 T5-T2 传输线上的流速随之增加。说明在观测的 30 min 时间内，流速的变化与外部事件存在明显密切关联。并且，发现 AUV 所在层的流场波动比换能器所在层的波动更加明显，进一步说明 AUV 尾流所产生的扰动对附近层深的流场影响更大，同时证明了立体观测在探测 AUV 目标的必要性。

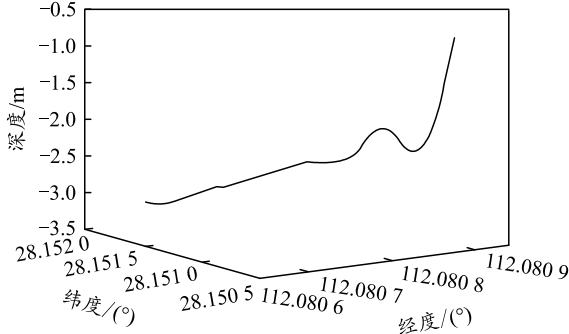
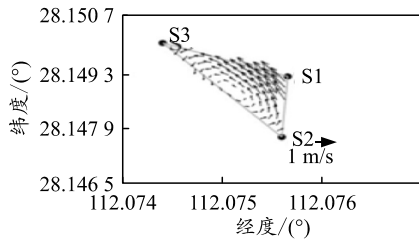
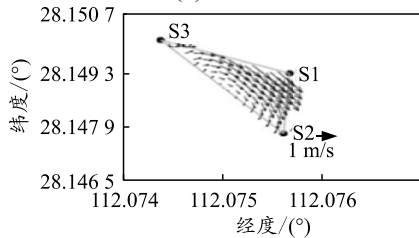


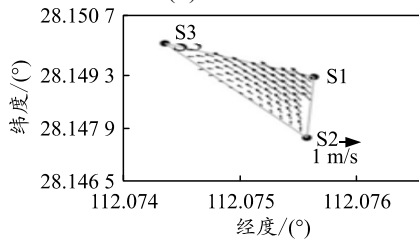
图 7 AUV 运动轨迹



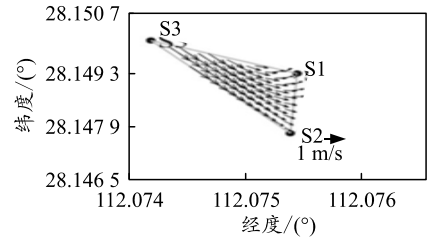
(a) 9:59



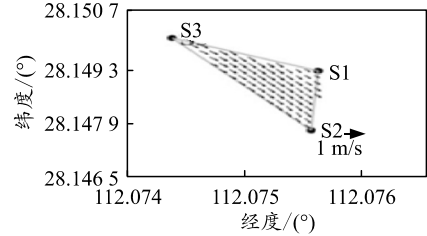
(b) 10:01



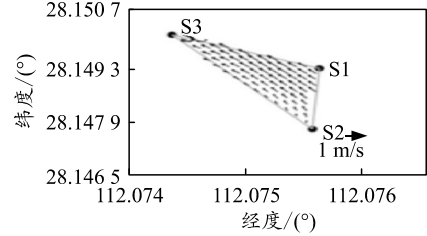
(c) 10:02



(d) 10:10



(e) 10:13

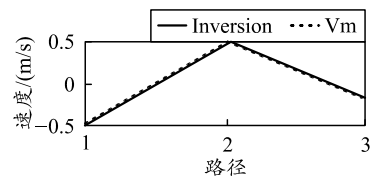


(f) 10:22

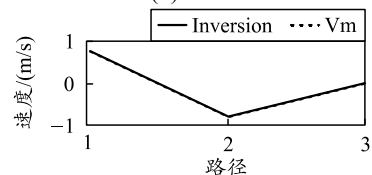
图 8 4 m 水深层的 2 维水平流场

3 数据分析与讨论

为验证观测结果，通过差分行程时间 (Δt) 计算的距离平均速度 V_m 与 CAT 反演结果进行比较^[11]。图 9 显示了 6 个时刻 3 条不同路径的速度比较，对应于水平速度场(图 8)。图 9 中的每个图表显示了特定时间 3 条不同路径的平均速度 V_m ，其中空心圆实线和三角形虚线分别表示反演结果和距离平均速度 V_m ，路径 1, 2, 3 分别指 T1-T2, T1-T3, T2-T3。从结果来看，路径平均流速的吻合度并不总是很好，主要原因是二次求解逆问题所带来的误差使得部分传播时间的提取存在问题，但总体而言，两者大致吻合，证明观测到的 4 m 水深层的 2 维流场具有较高的可靠性。



(a) 9:59



(b) 10:01

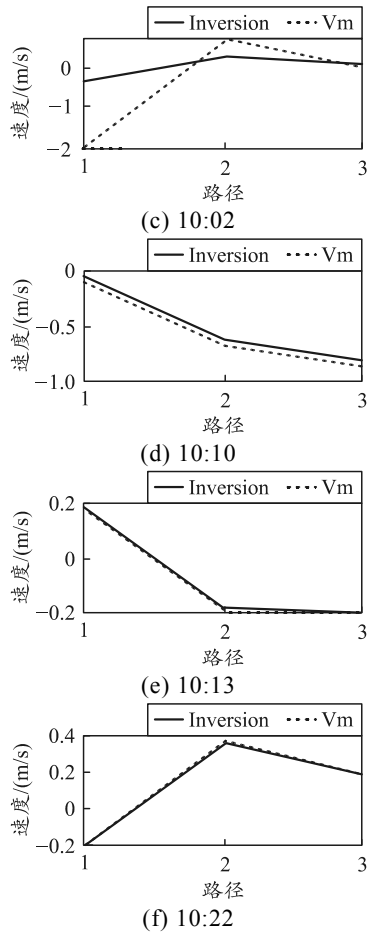


图 9 反演前后结果对比

图 10 所示为 ADCP 固定点的流速演变，可见流速非常小，存在几处流速突变点。其中 10:12 左右流速最大为 1.57 m/s，对应的 CAT 反演得到的流速为 1.43 m/s，相对误差为 8.89%，CAT 与 ADCP 的结果基本吻合，验证了小尺度 CAT 探测 AUV 尾流的可行性。

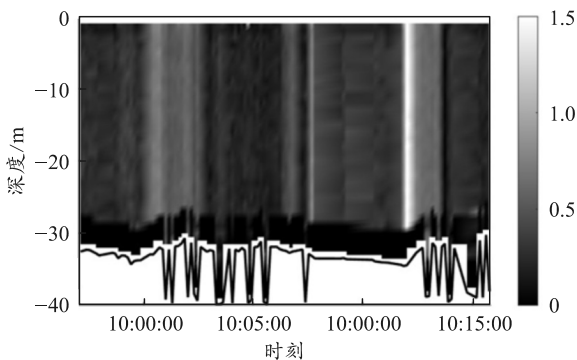


图 10 ADCP 固定点的流速演变

4 结束语

笔者开展小尺度水域 CAT 多层水平流场观测

研究，得到小尺度水域的水平 2 维流场结构，有效捕捉到 AUV 经过产生尾流时的环境流场变化。AUV 经过时流场突变对应的 ADCP 结果与反演结果相对误差为 8.9%；CAT 反演结果路径平均流速吻合良好，表明了 CAT 观测结果的可靠性。这是利用 CAT 方法在小尺度区域内构建水下监测网络探测 AUV 目标的一次成功尝试，为后续的观测实验打下基础。验证了该技术具备日常水文环境观测和 AUV 探测能力，在 200 m×200 m 探测范围内具备长度不大于 3 m 的 AUV 尾流探测能力。

后续，将进一步分析 AUV 尾流模型，获得包括目标类型、目标尺寸、航行速度及深度等参数在不同组合情况下的目标尾流场信息，通过优化声层析的方法进行流场反演，进一步完善声层析模型。

参考文献：

- [1] 陈文剑, 孙辉, 朱建军, 等. 基于分数阶傅里叶变换混响抑制的目标回波检测方法[J]. 声学学报(中文版), 2009, 34(5): 408-415.
- [2] 宋超, 刘瑞杰, 郑伟伟, 等. 国外水下无人移动装备综合隐身技术研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 186-189.
- [3] 陈强. 水下无人航行器[M]. 北京: 北京国防工业出版社, 2014: 11-20.
- [4] 孙大军, 侯开阳, 滕婷婷, 等. 空时多普勒频移域运动小目标的抗干扰探测方法[J]. 声学学报, 2022, 47(2): 161-174.
- [5] 陈政威. 沿海声层析测流方法的研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
- [6] 沈芸. 基于沿海声层析的人工上升流区水平流速场和温度场观测[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [7] 战庆亮, 葛耀君, 白春锦. 基于尾流时程目标识别的流场参数选择研究[J]. 力学学报, 2021, 53(10): 2692-2702.
- [8] 许英豪. 全附体潜艇海面映波及目标特性仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [9] 张庆国, 黄其培, 汤志峰, 等. 舰船尾流声学探测小型 ROV 系统技术研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 29-35.
- [10] 黄亮. 基于沿海声层析技术的人工上升流观测[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [11] HUANG H, XIE X, GUO Y, et al. Mapping Small-Scale Horizontal Velocity Field in Panzhan Waterway by Coastal Acoustic Tomography[J]. SENSORS, 2020, 20(19): 5717.