

超短基线定位系统在温盐深剖面测量仪作业中的应用

廖周鑫, 谢海翔*

中国极地研究中心(中国极地研究所), 上海

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月19日

摘要

超短基线定位系统作为一种水下声学定位技术, 因其布设灵活、实时性较强、定位精度较高而在海洋调查、海底工程和相关水下作业领域得到应用。海洋可持续发展的核心需求之一是获取精准、高质量的海洋基础观测数据, 为海洋生态保护、资源合理开发、环境精细化管理提供科学支撑, 而温盐深剖面测量仪(Conductivity-Temperature-Depth (CTD) Profiler)是获取海水理化基础参数的核心设备, 其作业测量精度直接决定海洋基础数据的应用价值。本文旨在探讨超短基线定位系统在CTD作业中的应用, 为提高作业测量精度、加快测量效率、保障海洋调查作业质量提供技术支持, 助力海洋可持续发展实践。本文首先介绍了超短基线定位系统的原理和特点, 然后分析了其在海洋调查中的多场景应用; 同时以CTD搭载超短基线定位系统为例, 针对实验设计与数据处理进行了详细阐述。研究表明, 超短基线定位系统应用于CTD作业时, 能够较为准确地恢复水下测量单元的运动轨迹, 并在一定程度上提高测量定位精度和数据空间对应性, 减小传统作业模式下的位置偏差。本文研究为CTD作业中引入超短基线定位系统提供了案例参考, 也为海洋小尺度精细化观测中的位置修正提供了方法依据。结合实际应用, 本文进一步讨论了该技术在不同作业场景中的应用潜力与后续研究方向。

关键词

超短基线定位系统, 定位轨迹, 温盐深剖面测量仪作业, 海洋可持续发展

Application of Ultra-Short Baseline Positioning System in CTD Profile Measurement Operations

Zhouxin Liao, Haixiang Xie*

Polar Research Institute of China, Shanghai

*通讯作者。

Abstract

The ultra-short baseline (USBL) positioning system, as an underwater acoustic positioning technology, is applied in ocean surveys, seabed engineering, and related underwater operations due to its flexible deployment, strong real-time capability, and high positioning accuracy. One of the core requirements for sustainable ocean development is to obtain precise, high-quality basic marine observation data, providing scientific support for marine ecological protection, rational resource development, and refined environmental management. The Conductivity-Temperature-Depth (CTD) Profiler is the core equipment for acquiring basic physical and chemical parameters of seawater, and the operational measurement accuracy of the CTD directly determines the application value of basic ocean data. This paper aims to explore the application of the USBL system in CTD operations, providing technical support for improving operational measurement accuracy, accelerating measurement efficiency, and ensuring the quality of ocean survey operations, thereby contributing to sustainable ocean development practices. First, this paper introduces the principles and characteristics of the USBL system, then analyzes its multi-scenario applications in ocean surveys. Taking the CTD equipped with the USBL system as an example, the experimental design and data processing are detailed. The study shows that when the USBL system is applied to CTD operations, it can accurately reconstruct the motion trajectory of underwater measurement units and, to some extent, improve measurement positioning accuracy and data spatial correspondence, reducing positional deviations under traditional operational modes. This study provides a case reference for introducing the USBL system into CTD operations and offers a methodological basis for position correction in fine-scale ocean observations. Combining practical applications, the paper further discusses the technology's potential in different operational scenarios and directions for future research.

Keywords

Ultra-Short Baseline Positioning System, Positioning Trajectory, CTD Profiler Operations, Sustainable Ocean Development

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在海洋调查中,超短基线定位系统因设备集成度高、布设便捷、定位精度较高而受到广泛关注,已在水下工程、目标探测、海洋生态观测和常规海洋调查等领域得到应用。相比长基线和短基线定位系统,超短基线定位系统更适合船载条件下的机动式作业,能够较好满足海上调查过程中对水下目标实时定位的需求。近年来,随着水声定位导航技术的持续发展,超短基线系统在海洋调查中的应用能力不断提高,为相关技术研究和工程应用提供了基础[1]-[3]。

温盐深剖面测量仪(CTD)是获取海水温度、盐度、压力等基础理化参数的核心设备,也是海洋调查中的重要观测手段。在常规CTD作业中,通常将母船的GPS定位信息作为水下测量单元的位置标签,用于后续数据处理与分析。然而,受风、浪、流及钢缆受力状态等因素影响,母船位置与水下测量单元真实位置之间往往存在偏差,尤其在复杂海区、近海海域及小尺度精细化研究中,这种偏差可能直接影响

剖面观测数据的空间对应关系及结果解释的可靠性。

基于此, 本文以“雪龙2”号船搭载 Ranger2 超短基线定位系统开展的 CTD 作业为例, 选取特定海域、特定海况及特定作业条件下的实测过程进行案例分析, 重点探讨超短基线定位系统在 CTD 作业中的应用效果及其对传统定位误差的修正能力。需要说明的是, 本文研究结论主要基于单一海域实测案例, 其适用性与海区环境特征、海况条件、作业平台配置及设备参数密切相关, 因此本文更侧重于特定海域条件下的方法验证与应用分析, 而非对所有海域 CTD 作业情形的普遍性概括。本文研究可为类似海域条件下的 CTD 精细化观测和水下定位应用提供参考。

本文围绕超短基线定位系统在 CTD 作业中的应用展开, 介绍其基本原理与技术特点, 并结合实测案例分析其对水下测量单元定位误差修正的效果。通过对试验数据的处理与对比, 评估超短基线定位系统在恢复水下测量单元运动轨迹、提高观测数据空间定位精度方面的应用价值。

2. 超短基线系统及其应用介绍

2.1. 超短基线系统介绍

20 世纪中叶, 随着科学技术的发展, 在国际海洋资源和海洋工程的开发进程中, 水下探测技术逐渐为各国所重视。从早期潜水艇的水下声呐应用拓展至科学、民用方面, 相继研制了各种水下探测设备。但由于光在水中衰减过快的问题, 水下通讯逐步由水声学主导, 并逐步发展为行之有效的水下通讯、水下检测的方法。声学定位系统也被逐步应用于水下拖体、有缆遥控潜水器、水下自主潜航器、水下作业设备以及水下目标定位等领域, 逐渐成熟并实现产业化发展。

水下声学定位是利用水声设备确定水下载体或设备的方位和距离的技术。早期, 在海洋上进行水声定位时, 至少需要 3 个接收点, 即至少需要 3 个换能器接收从同一点返回的声波信号。水声定位设备整体体积较大, 且不易于在船舶上稳固搭载。而超短基线定位系统将构成主应答器基阵的 3 个以上换能器集成到仅有几厘米大小的平台上, 我们可以基本认为其位置是一致的[4]。通过接收到的声脉冲信号到达时间或相位进行定位和计算距离。

目前, 根据应答器基阵基线长度的不同, 水下声学定位可以分为长基线定位、短基线定位和超短基线定位。在海洋调查实际作业过程中, 超短基线定位系统具有简单、便捷的突出优势, 更适用于海洋科学调查作业。

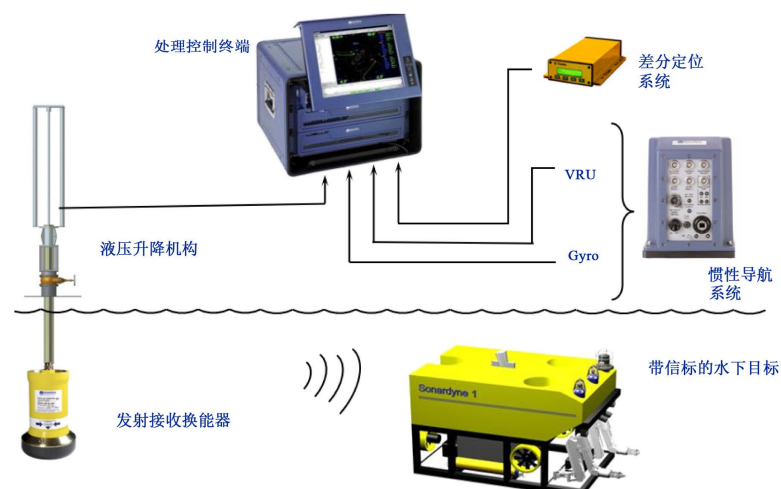


Figure 1. Ranger 2 ultra-short baseline diagram

图 1. Ranger 2 超短基线示意图

本系统采用的是英国 Sonardyne 公司旗下的 Ranger 2 型超短基线声学定位系统, 这是一套高精度的超短基线声学定位系统, 专门设计用于各种水深的动力定位船舶(图 1)。该系统通过安装在船舶上的声学换能器向水下发射声波信号, 而安装在水下目标上的声学应答器在接收到询问信号后立即返回一个与询问信号不同的响应信号给换能器。从而实现对水下目标在有效量程内的精确定位。上图为 Ranger 2 系统的组成示意图。

超短基线的测量方式为:

测距: 超短基线发射声学脉冲信号, 水下应答器收到后进行回应。

已知: 发射声学脉冲的时刻 T_1 ; 接收到回应声学信号的时刻 T_2 ; 声音在水中的传播速度 V , 则距离 $= (T_2 - T_1) \times V/2$

方位: 应答器的应答信号以球面形式到达发射接收机表面, 依据声波到达每个接收阵元的时间不同(相位不同), 即水下信标的回波信号, 会成球面状在空间逐渐传播, 第一个波面到达先到达 C 点, 然后到依次达到 B 点、D 点、A 点、E 点(图 2), 通过系统精确地测定声波达到每个换能器的时间, 也就是说系统测量到的声波到达每个换能器的相位是不同的, 系统据此通过公式换算得到, 目标物相对于换能器坐标系统的方位角度。

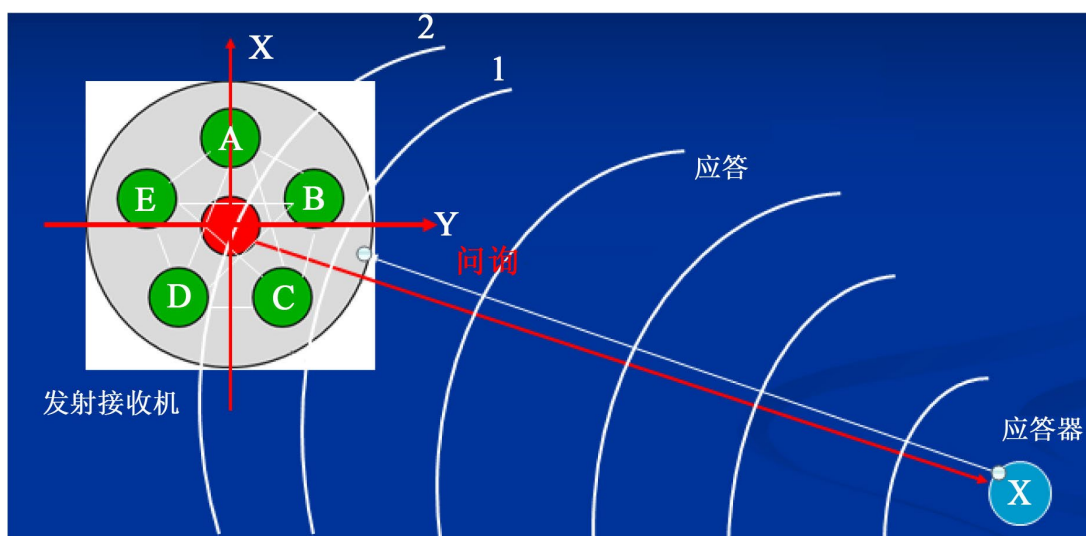


Figure 2. Ranger 2 ultra-short baseline transducer positioning schematic

图 2. Ranger 2 超短基线换能器定位原理图

在测量解算过程中, 主要存在船舶艏向、姿态和定位系统的时间同步以及不同海区的声速误差引起的偏离。通常情况下, 为了进行系统工况校准, 我们需要接入两个以上带差分的全球定位系统(GPS)、惯性导航系统和时间同步信息。本系统在 Ranger 2 固定安装调试时, 即接入了船载的差分 GPS、船舶艏向和姿态信息、换能器相对于 GPS 和姿态传感器的偏移量、表面声速以及秒脉冲(Pulse Per Second, PPS)时间同步信息。为了最大程度上与船舶艏侧推及螺旋桨保持有效距离, 安装位置的选择确保了船舶噪声对系统信号的干扰尽可能降到最低, 从而使设备能够在高精度的工作条件下正常运行。在现场作业期间, 仅需对不同海区的声速剖面进行校准。

2.2. 超短基线定位系统在海洋调查中的应用介绍

超短基线定位系统凭借设备集成度高、布设灵活、定位精度较高和环境适应性较强等特点, 已广泛

应用于海洋调查及相关水下作业领域, 如水下工程调查、深海目标探测、海洋生态观测、水下装备跟踪及常规海洋调查等[5]-[9]。与长基线和短基线定位方式相比, 超短基线定位系统更适合船载条件下的机动式作业, 尤其适用于需要实时获取水下目标位置信息的应用场景。对于 CTD 这类依赖精确空间位置开展数据分析的观测任务而言, 引入超短基线定位系统有助于弥补传统以母船位置替代水下测量单元位置所带来的偏差, 提高剖面观测数据的空间对应性和解释可靠性。因此, 本文进一步围绕其在 CTD 作业中的应用开展案例分析。

2.3. 温盐深剖面测量仪(CTD)调查作业介绍

CTD 系统是一种在 20 世纪 70 年代开始出现并广泛应用于海洋观测调查的工具。利用 CTD 系统获取现场海洋科学基础信息已成为海洋调查的基本作业项目。调查作业的流程如下: 当母船到达预定站点后, 使用船载甲板支撑系统(如综合行车吊和绞车)将测量系统水下单元投放到海水中进行数据观测和样品采集工作[10]。系统水下测量单元通过一根铠装电缆进行通信传输和收放控制, 以获取调查作业所需的数据和水样(图 3)。

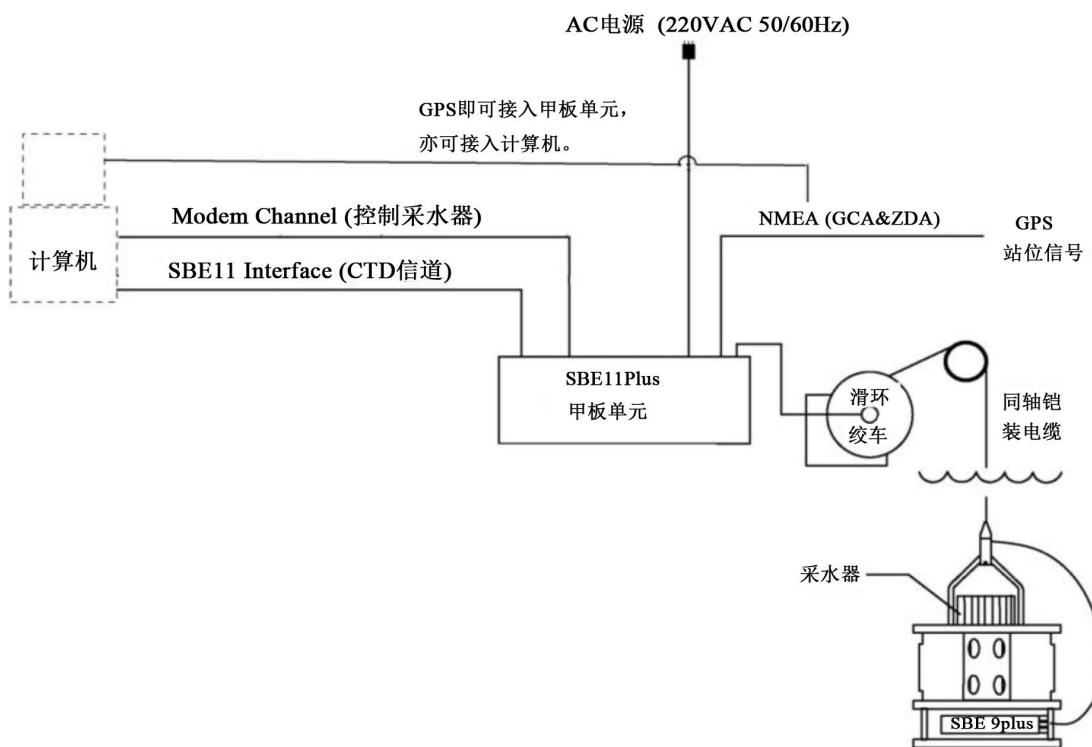


Figure 3. Schematic diagram of CTD survey operation connections
图 3. CTD 调查作业连接示意图

在开展 CTD 调查作业时, 调查人员通常会将母船的 GPS 定位及时间信息引入 CTD 系统, 作为水下测量单元的坐标信息, 以进行进一步的处理和分析。然而, 由于无法有效地还原实际水下测量单元的真实轨迹[11], 对于小尺度海洋基础信息和复杂海区情况, 无法实现原位分析, 从而无法精确地反演原位的的信息。对于海洋调查工作而言, 识别并减小这类误差来源、提高数据溯源的准确性具有实际意义。然而, 在现阶段的常规调查作业中, 由于气象、海流等客观因素, 母船定位位置与实际观测设备采样位置总是存在定位误差[12]。在远洋大尺度等宏观的调查作业中, 可以进行后期的数据处理或数值模拟等方式进行

平均。然而,对于微观尺度、近海海域和复杂海区的研究,观测设备位置信息的准确性将直接影响具体的研究结论。

3. 超短基线定位系统的实验设计与数据处理分析

3.1. 结合超短基线应用的调查作业试验

本文选取的测试海域作业海区海况为2级,水深约3900m。测试采用传统的定点调查作业模式,在约300kg的CTD采水器框架上搭载WSM6+超短基线信标(序列号:317369-004),船体HPT5000发射接收换能器型号8142(序列号:313586-001)是井道型安装方式[13],通过液压收放杆将发射接收换能器伸出船底。

3.2. 试验方案

本次试验是基于常规定点式作业方式与超短基线系统结合的方式。由于超短基线信标已实现小型化,可以直接在CTD采水器上稳固系留,确保信标通讯探头略高于采水架即可。该方法在操作层面上仅需通过增加搭载点,实现不修改现有作业模式的条件下[10],达到测量精度显著提升的效果。下面为具体实施的方案步骤:

提前检查和开启超短基线井道各设备状态,确保超短基线系统接入了船载的差分GPS、船舶艏向、姿态信息、换能器相对于GPS和姿态传感器的偏移量、PPS时间同步信息,使设备在高精度的工作条件下正常运行(如表1)。

Table 1. System signals and access status checklist

表 1. 系统信号及接入情况检查表

通讯接口及数据格式				
输入信号	端口	数据格式	波特率	检校位
定位信息(GNSS)	5B	GGA	9600	8-N-1
罗经姿态	6A	PRDID	19,200	8-N-1
罗经姿态	9B	EM3000	19,200	8-N-1
时间同步	10A	1PPS	/	/
偏移量设置				
发射接收机 S/N.	右舷(X)/m	前向(Y)/m	向下(Z)/m	
313586-001	2.99	-19.96	14.36	
定位信息(GNSS)	右舷(X)/m	前向(Y)/m	向下(Z)/m	
高精度定位与姿态设备(POS MV)	0	0	0	
系统校准修正值				
发射接收机 S/N	Pitch 修正值	Roll 修正值	Heading 修正值	
313586-001	28.32	-0.72	-0.81	

- 1) 待停船稳定且船位调整完毕后,关闭船舶侧推和螺旋桨的扰动噪音,通知现场可以进行作业。
- 2) 进行声速数据采集作业,可使用下放声速剖面仪或CTD,并将所得的声速数据导入系统进行校准(图4)。

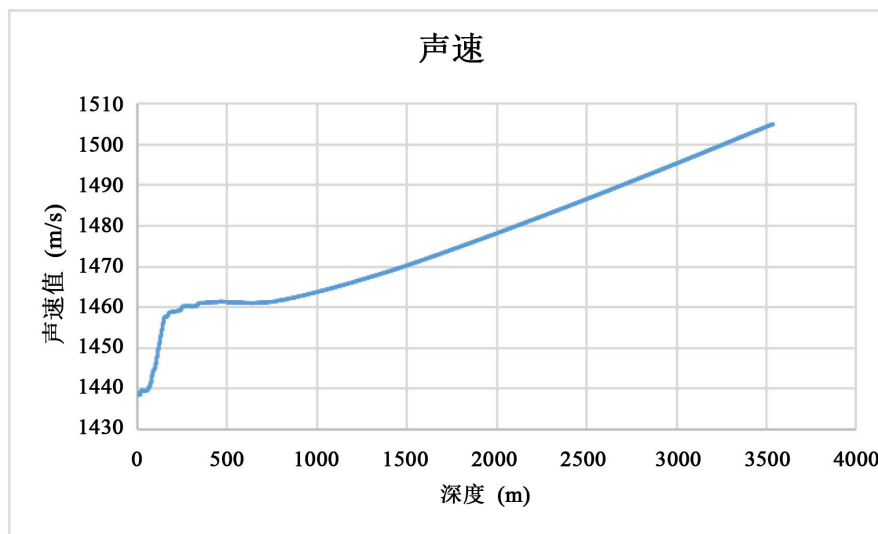


Figure 4. Sound velocity profile of the survey area
图 4. 测区声速剖面图

3) 将搭载信标的水下测量单元架推至综合行车吊的下方, 岗位人员到位并检查支撑设备是否正常运行。

4) 启动超短基线收放系统, 打开通海阀, 将超短基线收放杆伸至最大行程 3.7 米深度(最小工作深度为 1.5 米), 以避免船体对接收换能器造成干扰(图 5(b))。

5) 绞车操作人员将水下测量单元吊起, 并通过行车吊装置放入水中(一般在 20~50 米范围内), 检测信标与发射接收换能器之间的通信情况, 待通信稳定后匀速下放。

6) 室内观测人员需实时关注信标的通信情况(图 5(a)), 一旦测试达到预定深度, 立即将水下测量单元回收至甲板面。

7) 在正确固定水下测量单元后, 正常关闭绞车、超短基线收放系统和舷侧门, 并向驾驶室报告作业已结束。

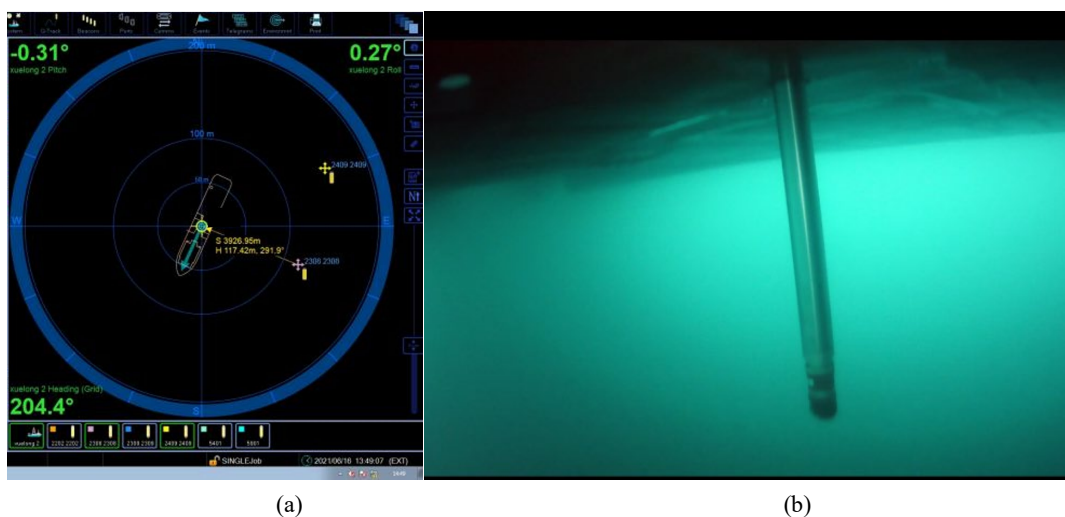


Figure 5. (a) Ultra-short baseline signal tracking diagram; (b) Ultra-short baseline receiver transducer status diagram
图 5. (a) 超短基线信号跟踪图; (b) 超短基线接收换能器状态图

3.3. 试验方案

基于测试数据分析, 可得到以下结果:

1) 即使在良好的海况下, 船舶的漂移轨迹与水下测量单元的运动轨迹存在明显的差异[14]。按照常规的定点作业模式, 母船的定位坐标轨迹会被添加到相应时间序列的测量数据中。因此, 船舶的运动轨迹应与水下测量单元的运动轨迹一致。然而根据本次测试数据显示, 船舶的位置分布图表明受到区域风、海流的明显影响, 并呈线性展开。整体运动方向可以根据实时监测的风速、风向和表面海流方向进行追踪。然而, 水下测量单元进入水体后, 其实际位置分布和变化情况较为复杂, 与船舶的位置变化趋势不一致, 并且存在较大的差距(见图 6(a)、图 6(b))。从运动范围来看, 船舶基本上在 $30\text{ m} \times 45\text{ m}$ 的范围内活动, 可以近似看作原点位置, 而水下测量单元的轨迹范围为 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ 。

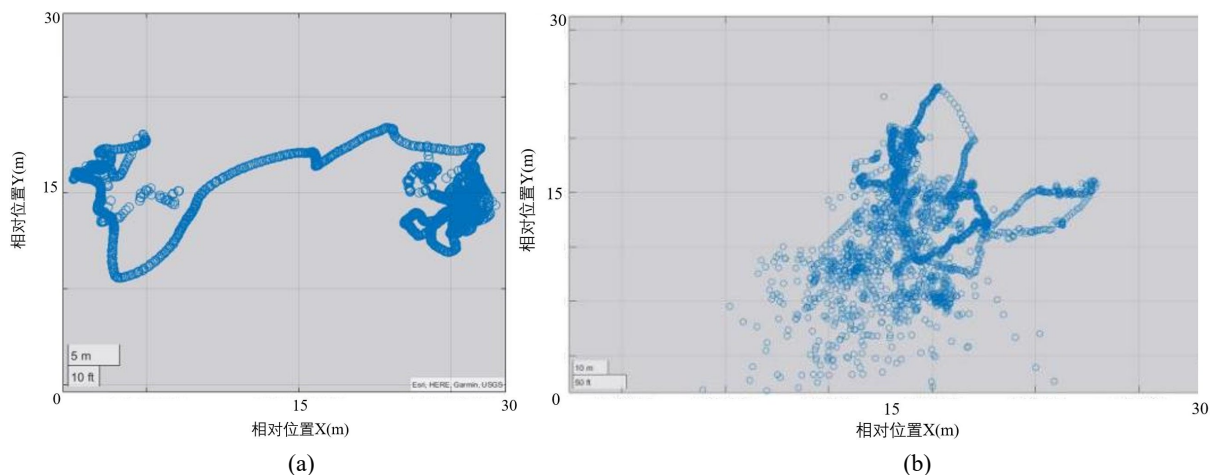


Figure 6. (a) Two-dimensional scatter plot of the mother ship coordinates; (b) Two-dimensional scatter plot of the measured target coordinates

图 6. (a) 母船坐标二维散点图; (b) 测量目标坐标二维散点图

2) 经过加入深度信息后, 以母船定位信息为标签的水下测量单元在垂直剖面上的变化趋势与以信标定位信息为主的水下测量单元完全不同。具体表现如下:

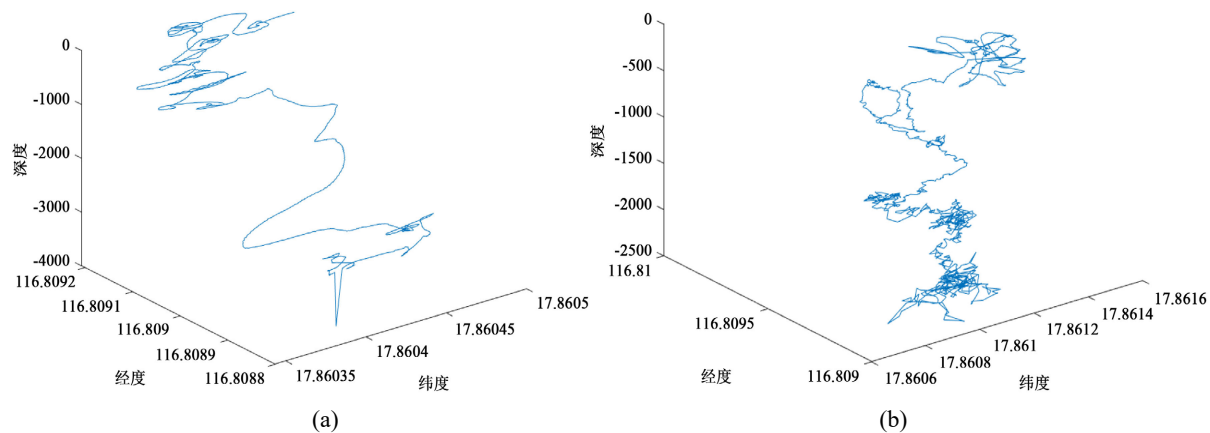


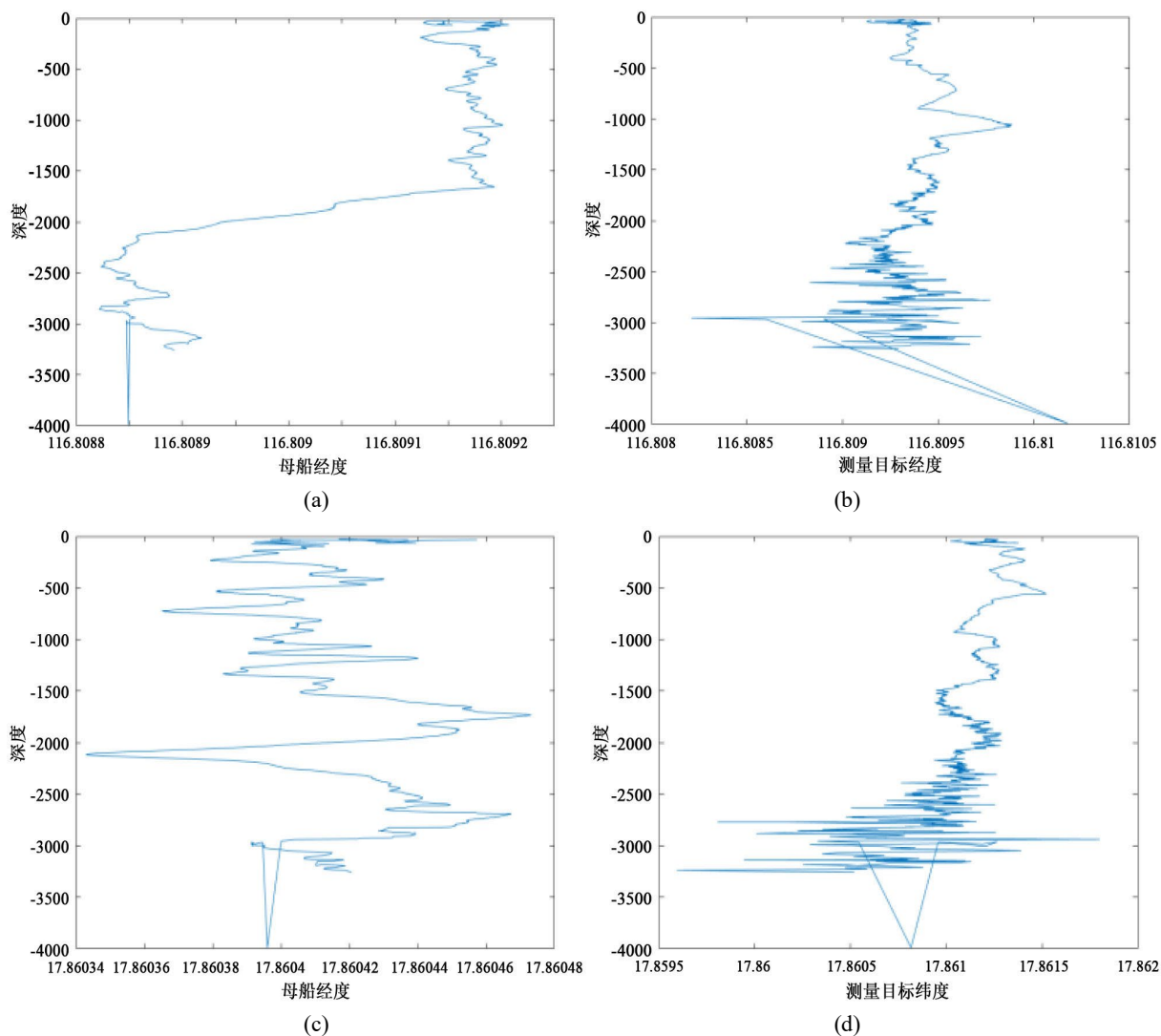
Figure 7. (a) Mother ship track diagram; (b) Measurement target track diagram

图 7. (a) 母船轨迹曲线图; (b) 测量目标轨迹曲线图

① 以船舶定位信息为主的数据(图 7(a))在垂直剖面上呈现出东西向(与经度轴平行)波动下沉的趋势,而在 1000 米深度之后,则呈现南北向(与纬度轴平行)的拖曳下沉。前期在 1000 米之前的数据轨迹较为平行,但随着深度的增加,移动方向发生了明显的变化。

② 以信标定位信息为主的数据(图 7(b))在垂直剖面上的变化情况相比之下更加复杂。在 0~300 米的表层和 2500~3000 米的底层,数据呈现出无序的下沉状态。而在 300~2500 米之间的深度范围内,可以观察到四个不同方向的层流影响,导致水下测量单元呈现出蜿蜒下降的过程。总体而言,加入深度信息后,以不同定位信息为主的水下测量单元在垂直剖面上的变化趋势截然不同,这一结果表明,不同定位信息来源会显著影响水下测量单元垂向剖面轨迹的解释。

我们对单一变量(纬度和经度)进行了下放作业时间和深度的对比分析,并发现随着深度的变化,测量目标和母船在纬度和经度上存在着显著的偏差。此外,它们的变化方向和趋势也有明显差异(图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)、图 8(d))。同时,根据经度和纬度的偏移量统计分析图(图 9(e)、图 9(f))显示,经纬度的偏移量随着深度的增加而逐渐增大。实地测试结果表明,随着深度增加,母船与测量目标之间的位置偏差呈增大趋势。



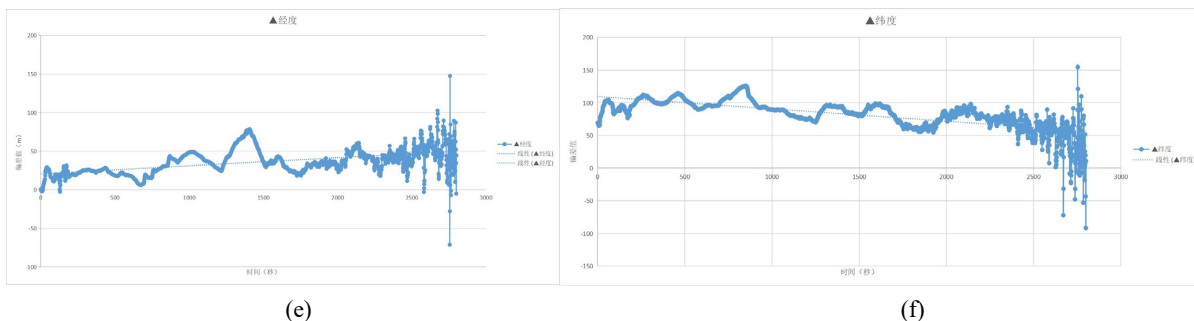


Figure 8. (a) Curve of the mother ship’s longitude varying with depth; (b) Curve of the measured target’s longitude varying with depth; (c) Curve of the mother ship’s latitude varying with depth; (d) Curve of the measured target’s latitude varying with depth; (e) Curve of longitude offset between the mother ship and the measured target varying; (f) Curve of longitude offset between the mother ship and the measured target varying

图 8. (a) 母船经度随深度变化曲线图; (b) 测量目标经度随深度变化曲线图; (c) 母船纬度随深度变化曲线图; (d) 测量目标纬度随深度变化曲线图; (e) 母船与测量目标纬度偏移变化曲线图; (f) 母船与测量目标经度偏移变化曲线图

3.4. 试验原因分析

结合测量区域大洋海流剖面结构影响因素, 我们发现从垂向剖面结构上, 受风浪影响的海洋表层和深层海流对海流的影响最为显著。利用搭载在测量目标的超短基线定位信息进行分析时, 我们发现其变化趋势与常规海流垂向分布结构相符。然而, 与母船的定位信息为基础的分析存在明显的差异。具体结论如下:

1) 在海表面, 从表层混合层到温跃层, 受风浪等因素的影响, 整体海水的理化性质发生较大变化。母船和测量目标都受到表层风浪流的影响, 两者的漂移趋势整体上一致。

2) 而在 1000 米深至海底前的基本结构稳定且流速缓慢的层流中, 当测量目标深入到这一区间时, 影响其运动的主要因素是海水中洋流推力、船舶漂移引起的钢缆牵引力、自身重力形成的合力。由于惯性影响, 测量目标呈螺旋下沉的趋势。然而, 母船仍受表层风和流的影响而运动。

3) 而在靠近海底时, 受底层流的影响, 侧向力变化增加, 测量目标的横向摆幅增大, 但由于受到钢缆的稳固拉力限制, 测量目标的下降呈现钟摆式变化。

水下测量单元在垂直剖面上受海水中流的影响较大, 并且可以明显观察到不同深度海流方向和速度的不一致性。根据未搭载水下声学定位设备的作业模式, 我们只能通过船舶运动轨迹、方向和速度来模拟生成水下测量单元的运动轨迹。测试结果表明, 两种定位方式所反映的轨迹特征存在较明显差异。因此, 若直接以船舶运动轨迹信息代替水下测量单元位置进行数据处理, 可能会对后续信息解释及被测区域环流等数值分析结果带来偏差(见图 9)。

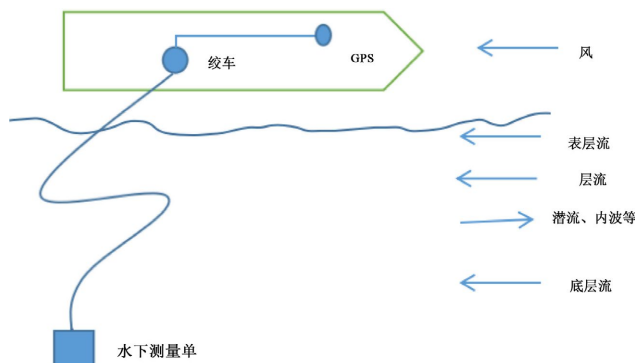


Figure 9. Simulation diagram of the fixed-point survey equipment descent trajectory
图 9. 定点调查设备下潜轨迹模拟图

4. 结论

本研究以特定海域条件下的 CTD 作业为案例, 分析了超短基线定位系统在水下测量单元定位中的应用效果, 重点评估了其对传统 CTD 作业定位误差的修正能力。结果表明, 在常规定点作业模式下, 若直接采用母船 GPS 位置作为水下测量单元的位置标签, 则难以反映 CTD 在下放过程中的实际运动轨迹; 相比之下, 搭载超短基线定位系统后, 能够对水下测量单元进行实时定位, 更准确地恢复其空间位置变化过程。

试验结果显示, 即使在较好的海况条件下, 母船漂移轨迹与水下测量单元实际轨迹之间仍存在明显差异。平面位置上, 母船活动范围约为 $30\text{ m} \times 45\text{ m}$, 而水下测量单元轨迹范围可达 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$; 同时, 随着下放深度增加, 母船与测量目标之间的经纬度偏移持续增大, 位置偏差量级可达百米。这说明传统以船位替代水下测量单元位置的方法, 可能对剖面数据的空间对应关系产生较明显影响。

从方法学角度看, 本文结果表明, USBL 技术在 CTD 作业中可用于修正定位偏差、恢复水下测量单元运动轨迹并提高数据空间定位精度。该方法有助于增强温盐深等剖面数据与实际采样位置之间的一致性, 从而提高数据解释的可靠性。尤其在复杂海区、近海海域及小尺度精细化研究中, 位置偏差对结果分析的影响更为突出, 因此采用精确的水下声学定位手段具有必要性。

需要说明的是, 本文结论基于特定海域、特定海况及特定作业条件下的案例分析, 主要反映超短基线定位系统在该类场景中的应用效果。后续仍需在在不同海域环境、不同水深条件及不同作业模式下开展进一步验证, 以完善其在 CTD 作业中的应用方法体系。

5. 展望

超短基线定位系统在海洋调查和水下作业中具有较强的应用基础。随着设备小型化、系统集成化和作业流程优化, 其在 CTD、拖体、ROV 及其他水下调查装备中的适配能力有望进一步提高。对于需要精确位置约束的观测任务, 超短基线定位系统可作为补充定位手段, 用于提升水下目标位置获取的准确性。

未来研究可重点关注以下几个方面: 一是开展不同海域、不同水深和不同海况条件下的对比试验, 以评估系统应用效果的稳定性与适用范围; 二是进一步分析声速结构、船舶姿态、钢缆受力及海流分层等因素对定位结果的影响; 三是探索超短基线定位系统与 CTD、ADCP 等观测设备的协同应用方式, 以提高多源观测数据的空间一致性和综合解释能力。上述工作将有助于完善超短基线定位系统在海洋调查中的应用方法。

参考文献

- [1] 付进. 长基线定位信号处理若干关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [2] 孙大军, 郑翠娥, 张居成. 水声定位导航技术的发展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 331-338.
- [3] 周伟红, 张国堙, 蔡巍, 等. 超短基线定位的海上应用及精度评估[J]. 海洋学研究, 2016, 34(3): 77-79.
- [4] 隋海琛, 刘彦祥, 姜晓晖. 海洋调查中水下目标位置的确定[J]. 海洋测绘, 2004, 24(3): 32-34.
- [5] (2015) SBE 9 Plus CTD User's Manual. Sea-Bird Electronics, Inc.
- [6] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 超短基线定位技术在海洋工程中的应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 8-20.
- [7] 韩德忠, 隋海琛, 赵阳, 等. 高精度超短基线 GAPS 在水下定位中的应用[J]. 港工技术, 2009, 46(S1): 40-43.
- [8] 肖家耀. 超短基线定位系统在深水工程勘察中的应用[J]. 价值工程, 2022, 41(15): 82-84.
- [9] 刘勇. 超短基线(USBL)定位技术在海工工程中的应用[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(30): 157.
- [10] 单瑞, 董凌宇, 杜凯, 等. 超短基线定位系统在深拖探测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 29-35.
- [11] Zhang, J., Yan, M. and Han, Y. (2024) A Differential-Based Method for Correcting Ultra-Short Baseline Positioning

- Results. *Ocean Engineering*, **305**, Article ID: 117984. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117984>
- [12] Sun, Z., Wang, Z., Nie, Z., Jia, C. and Shan, R. (2024) A New Angle-Calibration Method for Precise Ultra-Short Baseline Underwater Positioning. *Remote Sensing*, **16**, Article 2584. <https://doi.org/10.3390/rs16142584>
- [13] 李同, 魏波, 陈霄. 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.
- [14] 徐博, 郝芮, 王超, 等. 水下潜航器的惯导/超短基线/多普勒测速信息融合及容错验证[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2508-2515.