

座底式长基线水声跟踪系统校阵方法研究

张庆国, 要庆生, 黄其培, 连 莉

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650051)

摘要: 为了解决座底式长基线水声跟踪系统的高效校阵问题, 结合工程项目实际提出一种智能化分组并行校阵方法。该方法利用水下基阵布阵施工时获得的水声及差分全球定位系统(Differential Global Positioning System, DGPS)测量数据为基准, 在校阵试验中采用多个水下基阵分组并行校阵的快捷方式, 根据自动反馈的测量数据进行校阵误差收敛测量, 当满足事先设定的校准误差后, 获得水下基阵的精确位置信息, 同时完成多个水下基阵的阵型校准。最后, 在某水域采用跑船试验的方式进行验证。长基线系统测量的船只航行轨迹与 DGPS 轨迹重合性好, 证明该方法具有智能化程度高、测量精度高、测阵效率及经济性好等优点, 具有较高的军事及民用价值。

关键词: 座底式; 长基线定位系统; 水声跟踪; 测阵校阵

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-05-0408-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.05.004

The array calibration method for bottom-mounted underwater long baseline acoustic tracking system

ZHANG Qing-guo, YAO Qing-sheng, HUANG Qi-pei, LIAN Li

(Kunming Shipborne Equipment Research & Test Center, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: To solve the problem on efficient array calibration of bottom-mounted underwater long baseline acoustic tracking system, a packet parallel array calibration method derived from actual engineer project is proposed. The method utilizes the measurement data of sonar and DGPS obtained at the time of implementing the array layout as a benchmark, adopts a shortcut manner of dividing multi-arrays into packets for simultaneous calibration test, and makes array calibration error convergence measurement according to the automatic feedback measured data. As long as meeting the pre-set calibration error, the precise location information of underwater base array is obtained, and then the underwater multi array's attitude calibration is completed. Finally, the method is verified by ship-running tests, the trajectory measured by the Long Baseline acoustic tracking system coincides well with the one measured by DGPS. It's proved that this method has advantage in high degree of intelligence, high precision, high array measuring efficiency and cost saving, with very high military and civil values.

Key words: bottom mounted; long baseline positioning system; underwater acoustic tracking; array calibration

0 引言

长基线水声跟踪系统是海洋资源探测与开发的重要测量设备, 同时也是各国水下靶场的典型试验测试手段, 在水声跟踪领域具有重要地位。长基线定位跟踪系统(Long Base Line, LBL)的基阵孔径通常为几百米到几千米^[1], 布放三个或多个水下基阵组成一定的几何图形, 并精确测量各基阵的水下坐标, 通过测量水下目标与水下基阵之间的距离, 获得水下目标的位置信息。根据水下基阵的布放方

式可分为浮标式和座底式, 根据测量方式又分为应答式和同步式^[2]。

由于长基线系统^[3]具有更高的定位精度和更大的覆盖范围, 获得了各国水声跟踪导航设备研制厂家的青睐。座底式结构不受水面风浪影响, 且安全性较高, 可全天候进行跟踪测试, 跟踪效率高, 逐渐成为了世界各国大型综合化海军靶场的典型标志^[4]。如美国大西洋试验与鉴定中心和美国太平洋导弹试验中心的巴尔金沙滩靶场^[5], 均采用座底同步式长基线水声跟踪系统, 进行各型水下武器的跟踪测试试验。座底式长基线水声跟踪系统在布放完成后, 必须进行水下基阵位置的测量校阵, 以获得水下基阵的绝对位置, 通过坐标转换便可获得水下目标的绝对位置信息。众所周知, 长基线水声跟踪系统的水下基阵数量较多, 结构复杂, 大量的水下

收稿日期: 2016-02-24; 修回日期: 2016-04-18

作者简介: 张庆国(1982—), 男, 黑龙江人, 高级工程师, 研究方向为水下武器弹道跟踪与测量技术研究。

通讯作者: 张庆国, E-mail: ZQG750@126.com

设施造成布放、校准、回收和维护的极大困难^[6]。因此,如何在复杂水声环境中,高效完成长基线系统中众多水下基阵的校阵测量,成为了系统必须要解决的关键技术难题。

1 座底式长基线水声跟踪系统

座底式长基线水声跟踪系统主要用于固定水域内,对水下目标的实时跟踪、导航、定位等。系统利用布放在水下不同位置的水声基阵,组成座底式长基线跟踪系统。采用同步式长基线阵测量原理实现水下目标的定位与跟踪^[7,8],需要在目标上安装声源设备,定时发送同步声信号。各水下基阵(节点)接收端根据接收到的声信号传输时延值进行距离计算,采用球面交汇原理获得目标在发射声信号时刻的位置信息,最终获得目标的航行位置及轨迹。系统工作示意图如图1所示。

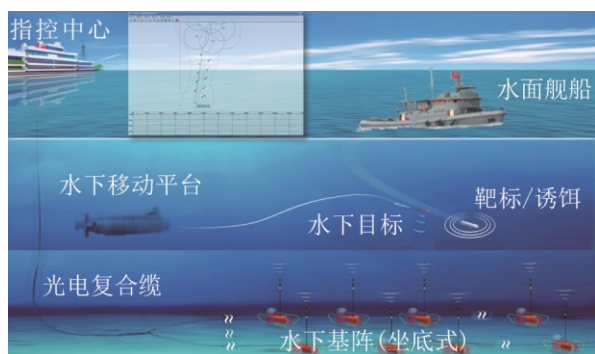


图1 长基线水声跟踪定位系统工作示意图

Fig.1 Working diagram of the long baseline underwater acoustic tracking and positioning system

图1中水下基阵布放在试验水域内,通过光纤连接至岸基指控中心。水下目标安装有声源设备,水下基阵实时将接收到的声信号传输至岸基,经过相应的信号处理获得传输时延值、信号中心频率(用于多普勒修正等)以及姿态编码^[9]数据等信息。将上述信息进行融合处理后,便可获得水下目标的精确轨迹及航行姿态等信息,为水下目标导航、定位及试验判定提供测量数据。水下基阵若按照等边三角形组阵可提高长基线阵跟踪测量精度^[8],但考虑到整个系统的跟踪覆盖面积,本系统将水下基阵设计成近等腰三角形结构,其间隔约为1 500~2 000 m,兼顾跟踪精度和覆盖面积。

通常情况下,座底式长基线水声跟踪系统以其水下基阵为坐标参考。以当前基阵位置为参考点,利用获得的时延值,采用球面交汇或双曲线交汇算法获得目标的位置坐标。由此可见,基阵位置信息

的精确测量(又称“测阵校阵”),是长基线水下跟踪定位系统正常工作的基本前提^[2,10],对于系统性能指标的实现至关重要。由于长基线系统的基阵数量较多,其多个基阵的现场布放施工及后期校阵工程量极大,因此长基线系统基阵坐标测量校准必须在满足系统测量精度的前提下,具有快捷、高效的施工特点,才能满足该系统现场校准需求。在每个基阵上设计有独立的声学自校准设备,接收岸基指控中心命令及数据进行信标信号的转换控制与声信号发射。该设备主要用于长基线系统测阵校阵,同时兼顾水声通信节点功能。在测阵校阵时作为点声源,用于与附近其它基阵间距测量,而在水声通信时,可作为单个通信节点与水下目标/设备进行水声组网。测阵校阵时设置相应基阵的自校准设备工作,产生并发射特定的自校准声信号,其它基阵处于接收状态,实时接收该基阵发射的声信号,利用时延值估计获得两个基阵之间的距离。更换多个基阵进行上述自校准动作后,即可获得全部水下基阵之间的间距,从而获得长基线阵基阵孔径;之后再利用相关方法实现基阵的大地坐标间接测量,完成绝对测阵校阵。

2 常规校阵方法

在浅水时,基阵的位置通常直接采用布放点(Differential Global Positioning System, DGPS)信息作为绝对点坐标。实际上当在水面进行水下基阵(或节点)的布放施工时,由于受到风和浪涌等因素的影响,使得水下基阵的落底点与入水点的水平坐标位置产生偏差,并且该偏差与布放水域深度直接相关,因此无法使用直接使用布放点的DGPS值作为水下基阵位置的绝对值。特别是布放在较深水域的长基线水声跟踪系统,更不能直接用布放点水面DGPS信息作为基准;要实现精确的定位跟踪功能,必须进行水下基阵位置坐标的精确测量。在施工水域天气环境多变以及布放船只受限的实际情况下,如何简单、高效实现水下节点位置信息测量,成为了系统必须解决的关键技术问题。

在工程实施中,长基线系统水下基阵的位置信息测量,通常采用绝对测阵、相对测阵两种方法。绝对测阵利用带有DGPS及声学定位/测距设备的水面船只,按照矩形或曲线型航路^[10,11],在将要测量的基阵附近进行多方位、多点位、大数据测量,利用船载DGPS及声学定位/测距信息获得水下基阵的位置。绝对测阵方法(如图2所示)需要具备水

声定位/测距试验船只, 以及船载 DGPS 及声学定位/测距设备, 对船只及测量设备要求较高, 经济性较差。并且该方法需要针对每个水下基阵, 进行不同方位、较大范围内的“跑船”测试, 并在大量测试数据中进行处理和选择, 最终获得水下基阵的水下位置坐标。当水下基阵数量较多时, 该方法航路长、所需跑船试验时间长, 测阵效率低, 试验成本高, 并且测量结果精度容易受到单个点位测量准确度影响, 总体精度不高。

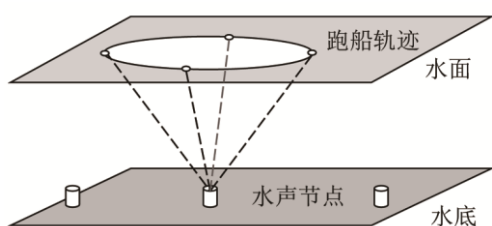


图2 绝对测阵原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of absolute measurement array

相对测阵方法主要针对应答式水下基阵的阵型测量, 需要逐一获得水下基阵之间的实际距离, 根据测量的距离数据解算获得水下基阵的几何图形结构, 之后再利用载有声源发射装置的船只进行跑船试验, 最终获得水下阵型的位置信息。该方法主要适用于水声应答方式的长基线水下基阵点测阵校阵^[1]。由于受到声信号相互干扰影响, 多个水下基阵需要逐一进行距离测量, 无法分组同时进行。并且在无法预定其距离测量次数的同时, 只能事先加大每个基阵测距时间, 依靠获得大量测距数据的平均值, 才能完成相对阵型的确定。由此可见, 相对测阵方法, 虽说较绝对测阵效率有提高, 但仍需较长时间来进行距离测量, 且无法将水下基阵进行分组同时进行阵型测量, 更无法利用软件程序规划实现智能化测阵。

综上所述, 常规测阵方法中的绝对测阵和相对测阵, 均要求试验船只按照一定的航路进行跑船校阵试验, 同时跑船航路需要覆盖全部基阵的跟踪范围。当基阵数量较多时, 航路冗长复杂, 需要大量的测试数据进行平均以提高测量精度, 且试验时间长, 经济性差。因此, 常规水下基阵校阵方法, 无法满足本系统对水下基阵高效、高精度测阵的要求。

3 高效校阵方法

为了解决上述问题, 本文设计了一种可高效实施并具备较高测量精度的长基线校阵方法。该方法

是一种可广泛应用于水下目标定位跟踪及水下探测、导航等方面的智能化水下基阵测阵校阵方法, 具有效率高、测阵精度高、控制智能化等优点。

通常情况下, 基阵布放与测阵校阵分为两个独立步骤进行, 即先进行布放施工, 之后再进行“跑船”校阵获得基阵绝对坐标。本方法可在布阵施工的同时完成测阵校阵, 无需两个航次, 因此效率高、经济性好; 在布放船上实时发射声源信号, 布放完成的水下基阵接收声源信号进行多点测距, 结合船载声源点位的 DGPS 信息进行反向基阵定位(图 3 所示)。由于布阵船只航速较慢, 且距离基阵较近, 重复测量数据精度好, 因此测阵精度高。该方法主要实施步骤如下:

(1) 在布放船上装载固定连接的发射声源, 同时在发射换能器处放置 DGPS 天线(尽量使天线与换能器在同一垂直线上), 通过光缆给基阵供电, 控制船载声源进行同步声信号发射;

(2) 根据事先规划点进行基阵布放, 利用基阵上的深度传感器及通过光缆传回的同步声信号进行布阵过程监视, 实时同步存储相关信号及数据, 直至基阵落底;

(3) 在布放船离开该基阵去往下一基阵布放点的初始航段(距离较近), 实时记录刚布放完成基阵接收到的船载声源发射的声信号(测量原理图如图 3 所示), 连续测量多点后, 结合船载 DGPS 信息反向定位获得该基阵的位置信息;

(4) 如水下已布放完成多个基阵, 则可逐一控制布放完成的基阵进行阵间距测量, 获得多个水下基阵之间的相对距离信息;

(5) 重复上述施工, 直至最后一个基阵布放完成, 在布放船上即可获得完整的基阵相对距离信息, 结合步骤(3)中船载声源及 DGPS 信息获得基阵的绝对定位信息;

(6) 在布阵船布阵施工完成后的返航过程中, 可持续发射声信号, 并利用刚获得的基阵测阵数据在船上进行定位跟踪, 对其测阵校阵的精度进行综合测试。

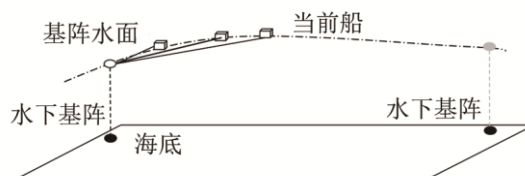


图3 单点定位原理图

Fig.3 Flow chart of the intelligent measurement array

上述方法除了基阵布放施工的基本要求外,无特殊要求。整个布阵过程中同步进行布阵施工监视及测阵校阵等操作,在布放船只上利用软件操控完成,其软件流程图见图4所示。

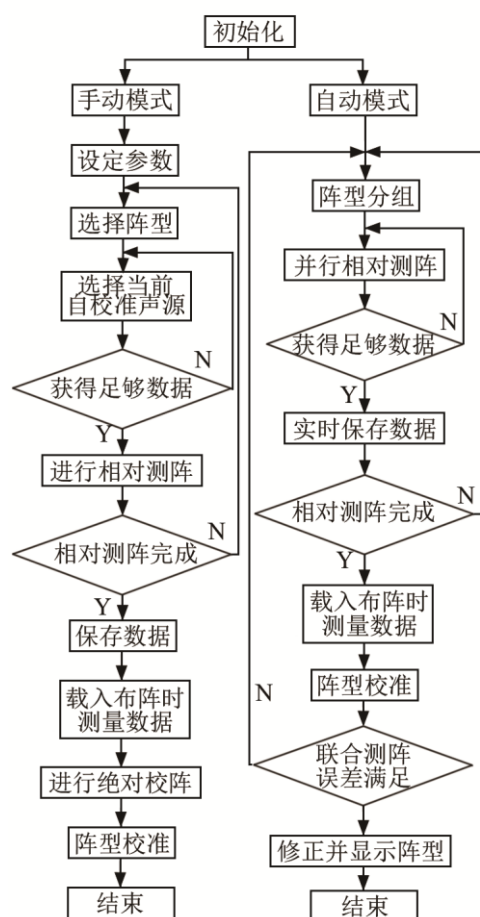


图4 智能化测阵流程图

Fig.4 Physical map of the underwater array

图4中,当用户执行校阵操作时,可以选择自动或手动两种模式。手动模式主要针对阵型大概结构未知,需要人工设定,并针对不同的水下基阵作为校阵声信号发射点,人工选择周边基阵作为声信号接收点,获得大量数据后进行阵型解算。如能获得解算阵型所需数据,并载入布阵时的船载DGPS、水声测量等数据进行阵型的平移、旋转处理,最终完成整个水下基阵的测阵校阵。优点是步骤清晰可控,可通过反复测量数据提高测量精度;缺点是人工干预较多,对操控人员的要求较高,且执行效率不高。

自动模式工作时,在布放船上控制长基线系统上电工作,软件控制布放完成的基阵分组进行信号收发切换,控制船载声源发射声信号。软件根据估计的时延值进行基阵通道增益自动调控,确保阵间

距测量准确可靠。获得阵间距后,将布阵施工中初步测量的基阵坐标作为初始参数,用于水声定位解算。依据布放船载声源和船载DGPS应该轨迹重合的基本原则,将布阵施工过程中同步记录的声信号及DGPS信息进行融合处理。由于水声定位解算的位置和船载DGPS同时刻位置存在一定偏差,校阵软件自动将上步设定的基阵坐标初始参数进行调整(如平移、旋转等),再将重新解算的水声定位点与DGPS点进行比较,若满足实际设定的允许偏差则修改基阵位置信息,直至整个系统水声定位点与同时刻船载DGPS定位点满足设定偏差,完成水下基阵的测阵校阵。整个校准过程(自动校准模式)无需人工干预,智能化程度高,可设定校阵偏差进行反复测量,以提高测阵精度。

图4中“载入布阵时测量数据”是指在布阵船只上实时发射声源信号,记录水下基阵接收到的该点声源解算数据及同一点位上DGPS、实测声速剖面等相关数据。为了实时检测布阵施工时水下基阵的工作状态,布阵施工时水下基阵均为加电工作状态,布阵布放船上可实时监测各水下基阵的工作状态(对布放船只无特殊要求,只需提供交流电源即可),并可接收和记录相应测量数据。本方法正是基于以上布阵施工的实时监测现状,将原本“布阵”和“校阵”需要两个或多个航次独立完成的工作进行合并,提出一种可在布阵施工的同时高效完成测阵校阵的智能化方法。总结该智能化校阵方法的主要特点如下:

- (1) 将“布阵”和“校阵”施工合并,只需一个航次便可完成全部工作,效率高、经济性好;
- (2) 整个测阵校阵过程自动执行,无需人工干预,依据设定的准则智能化实施,集成度高;
- (3) 利用布阵船航速低且距离基阵近等优势,结合可设定的偏差进行反馈控制,反复迭代确保基阵位置测量精度较高(可达1 m);
- (4) 针对数量较多的水下基阵,采用分组并行方式进行相对阵型的测量,可同时进行两组以上的相对阵型测量,校阵执行效率高;
- (5) 利用布阵船载声源及同一垂线上的DGPS进行基阵自定位,布阵完成后即可马上利用基阵所测量并记录的数据,对相对测阵后的基阵位置进行反馈控制与校阵,效率高,校阵精度不受人为操作影响,且对实际水声环境要求不高;
- (6) 采用非应答查询模式的直接水声测距方法,高效获得水下基阵之间的距离数据。并在通用水声球面交汇定位算法中考虑节点之间不同的

深度问题,利用现场声速修正算法提高声学定位的精度。

4 工程实施情况

针对本文提出的水下基阵智能化高效测阵校准方法,结合某工程项目进行试验实施。这里需要长基线水声跟踪系统水下基阵除了具备常规宽带声信号实时同步接收功能外,还需具备常规的可控声学自校准功能,以便高效完成多个水下基阵之间的距离测量,获得水下基阵的相对阵型信息。

除了基阵上需要装备专用的声学自校准设备外,水面布阵施工船只上也需要配备声源(含功放)、DGPS、声速剖面仪等通用设备,以及长基线系统岸基信号处理机箱(具备水声信号处理及记录回放等功能)、计算机(含专用软件)等专用设备。在水下基阵布放施工时,同时发射匹配的声源信号,并将水下基阵测量获得的水声定位数据与当前时刻对应的声源位置信息(由声源发射换能器同一垂线上的 DGPS 设备测量获得)对应记录保存,为后续的测阵校准提供参考基准。试验测试工作示意图如图 5 所示。

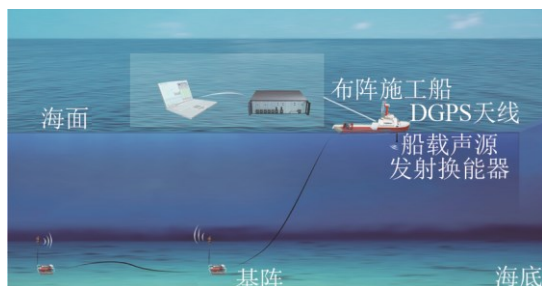


图 5 基阵布放及校准示意图

Fig.5 The trajectory of the ship tracked by the long baseline system after calibration

图 5 中水下基阵具备实时同步式宽带水声信号接收、传输,水声通信,以及可控自校准切换及声信号发射等功能。长基线系统的 1~10 号基阵分为两组并行校准,1、2、3、6、7 为一组,4、5、8、9、10 为二组。两组同时进行相对测阵,如图 6 所示。

实际上在布阵完成后,长基线系统已经具备定位跟踪功能,并投入多型号水下武器的跟踪试验。图 6 为某次“搭载”出航获得的测量数据。图 6 中 1~10 表示为水下基阵, DGPS 轨迹为实时无线回传的船只位置信息(DGPS),水声跟踪轨迹为长基线系统实时获得的水声跟踪定位信息。在测试试验中将 DGPS 天线与船载声源发射换能器固定安装在同

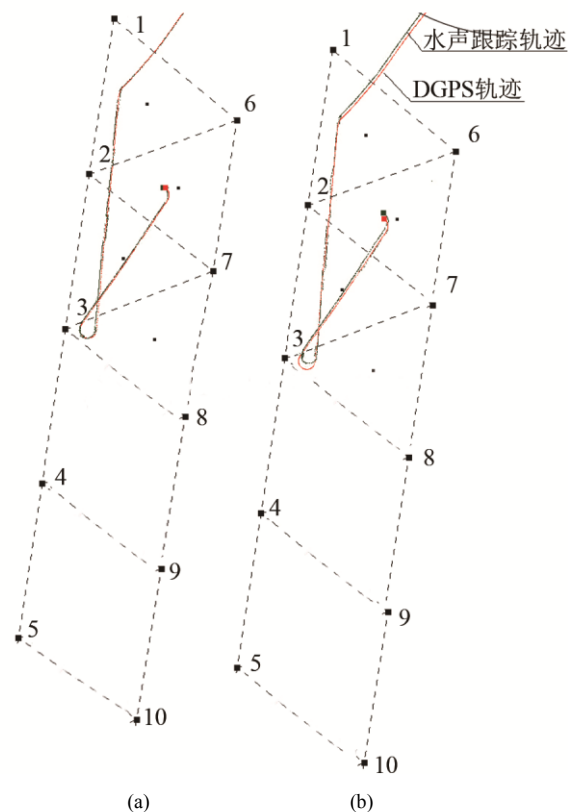


图 6 校准后长基线系统跟踪跑船轨迹图

Fig.6 After calibration of the long baseline system to track the trajectory of the ship

一垂线上^[12],以 DGPS 数据为基准测试长基线系统定位跟踪精度。从图 6 中可以看出,采用新方法的 DGPS 轨迹与水声测量轨迹重合性较好(见图 6(a)),常规方法获得的轨迹重合性较差(见图 6(b))。试验证明,该校阵方法在减少航次、缩短测阵校准时间的同时,具有更高的校准精度,可满足长基线阵水下基阵的高精度测阵校准要求。

利用该方法测阵校准的长基线系统已经成功布放在某水域,近两年多时间内,工作状态稳定,并在多型号水下武器的实航试验中得以应用,效果良好。

5 结 论

新的校准方法,可在布阵施工过程中实时完成测阵校准工作,无需常规的“跑船”校准试验。采用长基线水声跟踪系统多个基阵分组并行测量的方式,提高了相对测阵效率。在布阵施工的同时利用船载声源及 DGPS 设备获得测阵所需数据,校准程序根据事先设定的偏差进行反馈控制,最终完成绝对测阵校准,获得高精度基阵位置信息。跑船试验结果证明该方法具有智能化程度高、测阵效率

高、测量精度高、经济性好等优点, 并已经在靶场某工程项目中得到实际应用, 效果良好, 具有较高的军事及民用价值。

参 考 文 献

- [1] Cestone J A, Cyr R J, Roesler G, George E S. Latest highlights in acoustic underwater navigation. *Navigation*, 1987: 7-39.
- [2] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 110-116.
- TIAN Tan. Underwater positioning and navigation technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 110-116.
- [3] Cestone J A, Cyr R J, Roesler G, George E S. Latest highlights in acoustic underwater navigation[J]. *Navigation*, 1987, **24**(1): 7-39.
- [4] 陈晓忠. 长基线水声跟踪系统抗多途及抗距离模糊研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学工学博士学位论文, 2005.
- CHENG Xiaozhong. Research on anti multipath and anti-range ambiguities technology in long baseline acoustic tracking system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [5] 符燕, 付新胜. 世界最大的海上试验场—太平洋导弹靶场[J]. *飞航导弹*, 2009, **9**(1): 42-49.
- FU Yan, FU Xinsheng. The worlds largest offshore testfield-pacific missile range[J]. *Winged Missiles Journal*, 2009, **9**(1): 42-49.
- [6] 江南, 黄建国, 李珊. 长基线水下目标定位新技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **S2**(1): 77-80.
- JIANG Nan, HUANG Jianguo, LI Shan. A new long base line underwater positioning technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **S2**(1): 77-80.
- [7] Sozer E M, Stojanovic M. Underwater acoustic networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, **25**(1): 72-83.
- [8] 张宝成, 徐雪仙. 长基线四点接收水声跟踪系统定位计算公式及性能分析[J]. *声学技术*, 1990, **9**(1): 62-69.
- ZHANG Baocheng, XU Xuexian. Calculation formula and error analysis of long baseline underwater acoustic tracking system[J]. *Technical Acoustics*, 1990, **9**(1): 62-69.
- [9] 张庆国, 王健培. 水下高速目标航行参数遥测技术研究[J]. *声学技术*, 2014, **33**(1): 412-416.
- ZHANG Qingguo, WANG Jianpei. Research on telemetry technique of high-speed underwater target navigation parameters[J]. *Technical Acoustics*, 2014, **33**(1): 412-416.
- [10] 李莉. 长基线阵测阵校阵技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学工学硕士学位论文, 2007.
- LI Li. Study on array measuring&calibration for long base line array[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [11] 刘百峰, 杨志权, 赵珩. 一种适用长基线系统绝对测阵的新航路[J]. *舰船电子工程*, 2011, **31**(6): 172-175.
- LIU Baifeng, YANG Zhiquan, ZHAO Yan. A new sea-lane suitable for absolute measuring arrays for long baseline system[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, **31**(6): 172-175.
- [12] 唐秋华, 吴永亭, 丁继胜. 等. RTK GPS 在超短基线声学定位系统安装校准中的应用[J]. *海洋测绘*, 2005, **25**(5): 40-42.
- TANG Qiuhua, WU Yongting, DING Jisheng, et al. Application of RTK GPS in the installation and calibration of the ultra short baseline acoustic positioning system[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2005, **25**(5): 40-42.