

引用格式: 王雪琰, 李记龙, 黄敏燕, 等. 基于钟差建模的水下定位时延修正算法[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 194-198. [WANG Xueyan, LI Jilong, HUANG Minyan, et al. Time delay correction algorithm for underwater positioning based on clock error modeling[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(2): 194-198.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.007

基于钟差建模的水下定位时延修正算法

王雪琰^{1,2}, 李记龙¹, 黄敏燕¹, 冯海泓¹

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201815; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对同步定位模式中存在的钟差影响定位精度的问题, 提出了一种适用于水声定位系统的同步时钟修正算法。对单个水下固定潜标的时延进行长时间观测, 测量定位时延的变化量, 建立了钟差修正模型, 定位精度得到明显提高。此模型在海试试验数据中得到了验证, 两个潜标的相对定位精度分别提高了 31.1% 和 64.6%, 且解算钟差模型系数与设备精度吻合, 证明了算法的有效性。此修正算法对于水下固定节点标定精度的提高具有重要意义。

关键词: 水下定位; 长基线; 钟差建模; 时延估计

中图分类号: O427

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-02-0194-05

Time delay correction algorithm for underwater positioning based on clock error modeling

WANG Xueyan^{1,2}, LI Jilong¹, HUANG Minyan¹, FENG Haihong¹

(1. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem that the clock error in synchronous positioning mode affects the positioning accuracy, a synchronization clock correction algorithm for underwater acoustic positioning system is proposed. In this paper, the clock error correction model is established by long time observing the time delay of a fixed single submersible buoy and measuring the change of the time delay, and the positioning accuracy is improved significantly. This model is validated by the data from sea trial, and the accuracies of two subsurface buoys' relative positions are improved by 31.1% and 64.6% respectively. In addition, the calculation of clock error model coefficient is consistent with the equipment precision. The results show the validity and accuracy of the algorithm.

Key words: underwater positioning; long baseline (LBL); clock error modeling; time delay estimation

0 引言

近年来, 经济、科学和军事等方面在海洋领域的高速发展以及人类在海洋活动空间的不断拓展, 对水下定位导航授时(Positioning Navigation and Timing, PNT)提出了越来越高的要求^[1]。水下定位导航目前主要手段有惯性导航、地球物理场导航和水声导航定位^[2]。水声定位应用广泛, 灵活多变, 有广阔的发展前景, 是水下定位的主要手段。目前水声定位的方法主要有超短基线(Ultra-Short Baseline, USBL)定位系统、短基线(Shoot Baseline, SBL)定位系统和长基线(Long Baseline, LBL)定位系统。其中 LBL 的基线范围达几千米, 基阵常常布放在海底或

海面, 目标处于基阵内。装有应答器或同步信标的基阵固定在海底时, 通过测量时延可以获得每个应答器与目标的斜距。在应答器位置预先确定的条件下, 根据球面交汇原理即可确定目标的位置。水下定位中存在各种误差因素。易昌华等^[3]较全面地剖析了二次水声定位过程中 GPS 测量、坐标系转换、换能器安装、时延测量、声速计算中存在的误差, 并给出了减小和消除各种误差的方法。对于声速误差, 赵建虎等^[4]认为削弱声速相关误差的有效途径是建立声速场模型, 且声速对定位的影响与波束入射角密切相关。孙文洲等^[5]分析了声速剖面对定位测距的影响, 根据误差变化规律设计了对应的走航方式与差分算法。孙大军等^[6]提出了一种通过遗传算法提取最优有效声速的方法, 以修正非均匀声速带来的误差。关于 GPS 测定船姿态的误差影响, 赵建虎等^[7]提出了利用 GPS 相位测量技术对船姿态进行测定, 提高了数据获取精度。

海洋大地控制网是由一系列布设在海洋领域

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501703)。

作者简介: 王雪琰(1995—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为水声学。

通信作者: 黄敏燕, E-mail: huangminyan@mail.ioa.ac.cn

的测量控制点构成的大地控制网，是国家测绘局布设的“2000 国家大地控制网”的重要组成部分^[8]。由陆上、海面、海底三方面的控制点组成，其中最主要的是海底控制点。建设完备、精确的海洋大地控制网是海洋测量、检测、定位、水下作业等海事活动的基础。但由于水下测量的局限性，水下控制网点的绝对位置标定难以精确实现。通常布放在海底的固定节点的位置无法直接准确得知，故需对沉底潜标通过水面观测收集一系列时延信息以对其进行精确标定。时延获取有应答与同步两种方式，在通过同步方式获取时延值时，水面设备与水下设备精准的时钟同步是获取精确时延的前提条件。由于水上 GPS 设备与水下设备存在固有钟差，在定位时延中增加了一个干扰参数，使得获取时延存在误差，进而导致标定误差。由此可见钟差也是影响定位精度的一个重要因素，故建立水下同步信标的时钟漂移模型是亟待解决的问题。

卫星钟差的建模与预报已有许多学者进行了大量的研究，旨在修正卫星导航系统与地面设备系统之间的钟差^[9]。目前主要的预报方法有多项式模型、灰色模型、卡尔曼(Kalman)滤波模型、各种神经网络模型、时间序列模型以及以上模型的组合或改进等^[10]。在潜标定位过程中，水下设备与水面设备间的钟差产生原理与卫星钟差相似。故卫星钟差的预报模型对于水下时钟同步算法具有指导作用。

卫星钟差模型中最为常见、简便的是多项式模型中的二次多项式模型。此模型短期预报效果较好，物理意义明确。本文依据二次多项式钟差预报模型，推导了一种适用于水下声学系统的高精度同步时钟修正算法。该算法以高精度的差分 GPS 秒脉冲作为时钟基准源，以其大地坐标的位置作为水面设备的绝对位置；在水面实时监测水下设备的脉冲信号，并对其做数小时的精确测量；建立水下设备的时钟漂移模型，推演时钟误差修正量；将其代入解算方程，按照递归最小二乘法，计算时钟偏移量，并按照时钟漂移规律完成水下设备绝对时间的更新。最终通过实验数据验证，证明了本算法能有效解决水下设备与水面设备间的钟差补偿问题，实现设备间的时钟同步。

1 模型建立与仿真

1.1 模型建立

水下钟差是指在水下声学定位过程中，由于时钟频漂没有得到及时修正带来的潜标同步发射与 GPS 同步信号之间的时钟误差。误差主要来源为水

下设备恒温晶振自身晶体和元件的老化，反映为时钟的偏移与漂移。

卫星钟差的二次多项式模型可以表示为^[11]

$$L_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \Delta, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： L_i 表示 t_i 时刻与 GPS 卫星的钟差， t_0 代表参考时刻； a_0 、 a_1 、 a_2 的物理意义分别为与卫星钟的钟差、钟速与频漂。钟差与钟速对应时钟偏移和时钟漂移，为线性变化部分。文献[12]也指出，短期内时钟频率漂移呈线性变化，故假设待修正钟差为线性模型。若此修正钟差的误差模型假设为

$$t_e = kt_r + b \quad (2)$$

式中： t_e 代表含有误差的时间； t_r 代表真实时间； k 和 b 分别表示时钟漂移与时钟偏移，对应式(1)的 a_1 与 a_0 。假设信号发射周期为 m (单位：s)，由式(2)可推得真实时延公式为

$$T_{ri} = k \cdot m(i-1) + b + T_{oi} - m(i-1), \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中： T_{oi} 为第 i 个时延观测值， T_{ri} 为第 i 个真实时延， i 代表时延序号。

单点潜标的定位解算采用最小二乘法，最小二乘法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。以绕圈走航方式为例，若在不同时刻不同位置获得 N 个观测值，不考虑钟差时，根据最小二乘法潜标解算公式为

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{o1}^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{o2}^2 \\ \vdots \\ (x_N - x_0)^2 + (y_N - y_0)^2 + (z_N - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{oN}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中： (x_0, y_0, z_0) 为待解算潜标的坐标， c_0 为平均声速， (x_i, y_i, z_i) 为绕圈过程中接收信号时刻的观测点位置。若考虑钟差，则将式(3)代入式(5)，则可解算得高精度潜标位置以及误差模型待求解参量 k 和 b 。

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{r1}^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{r2}^2 \\ \vdots \\ (x_N - x_0)^2 + (y_N - y_0)^2 + (z_N - z_0)^2 = c_0^2 \cdot T_{rN}^2 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 模型仿真

为证明模型的有效性，探究钟差给定位带来的误差影响，对模型进行仿真验证。假设海洋中无多普勒影响，声速固定且无海潮情况。取信号发射周期 $m=6$ s。系统测时误差、观测误差、声速测量误差分别在 $\pm 5 \times 10^{-5}$ s、 ± 0.1 m、 ± 0.1 m·s⁻¹ 的范围内均匀分布。具体步骤如下：

(1) 选取适当的绕行轨迹与固定潜标坐标。轨迹半径取 1.5 km，误差在 ± 15 m 范围内均匀分布，

按圆轨迹均匀取 900 个观测点, 圆心处为潜标水平位置, 水深为 3 km, 如图 1 所示;

(2) 用固定声速计算出每个轨迹点对应的时延, 按照设想模型给时延附加上已设定误差参量的钟差。此处 k 按钟漂量级 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ s 设置梯度值(若钟漂量级为 10^{-9} s, 则 $k=1-10^{-9}$), 对应的 b 均设置为 0.001 s;

(3) 分别用式(4)与包含钟差修正解算的式(5)对附加不同钟差的时延数据进行解算, 并反算残差, 计算定位精度。残差计算公式为

$$\varepsilon_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - c_0 \cdot T_i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

即观测点 i 的坐标与解算所得潜标坐标之间的距离与平均声速乘以相应时延的差值。其中 ε_i 代表每个观测点的反算残差。定位精度即为反算残差的均方根值, 表示为

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2} \quad (7)$$

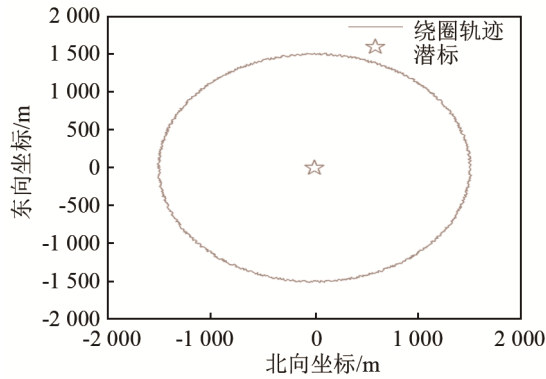


图1 仿真的绕行轨迹与潜标位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of simulated rounding track and submersible buoy's position

经以上步骤可得仿真结果, 如图 2 所示。由图 2 可见解算所得钟差系数 k 与设定值基本保持一致, 差值控制在 10^{-9} 量级。参数 b 的解算误差保持在 10^{-5} s 量级。修正前后定位精度变化如图 3 所示,

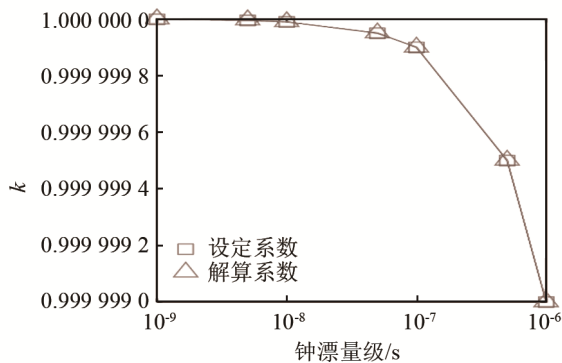


图2 模型系数 k 值对比曲线
Fig.2 Comparative curve of model coefficient k

尤其当钟漂量级变大时, 定位精度得到了显著提高, 修正后定位精度保持在 0.1 m 量级。修正前后的定位精度符合实际情况, 证明了修正模型的有效性与准确性。

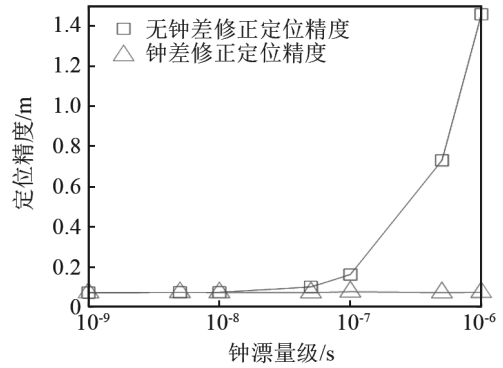


图3 钟差修正前后定位精度对比曲线
Fig.3 Comparative curve of positioning accuracy before and after clock error correction

不同钟漂量级的无修正定位反算残差曲线趋势一致, 以 10^{-7} s 的钟漂量级为例, 水下钟差对定位残差的影响趋势如图 4 所示。

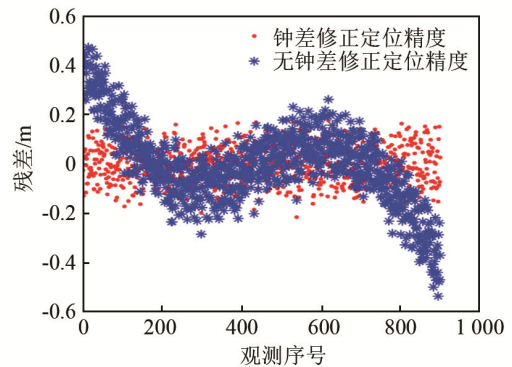


图4 有无钟差修正残差分布对比
Fig.4 Comparison of residuals distribution with and without clock error correction

2 海试验证

用于此次验证的试验数据来源于 2019 年 7 月某海上试验, 试验水深约为 3 km, 绕圈半径约为 1.5 km, 在定位区域内任取一点作为原点, 将轨迹与潜标的位置用相对坐标表示, 潜标 1 与潜标 2 的位置与绕圈轨迹如图 5 所示。在海底固定布放潜标, 水面船接收同步声信号, 测量接收时延, 同时采集船舶的位置、姿态等参考信息。上述信息可精确计算接收点位置。其中测时精度为 50 μ s; GPS 水平精度为 0.2 m, 高程精度为 0.5 m; 观测误差为 0.1 m; 声速测量误差为 0.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.1 数据预处理

实验载体的坐标、姿态、航向等数据由 GPS 和

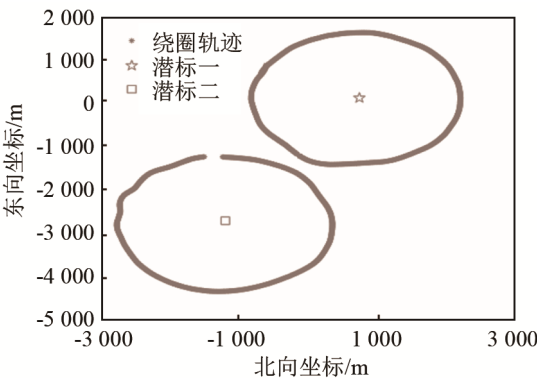


图5 海试数据得到的绕行轨迹与潜标位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of rounding tracks and submersible buoys' positions from sea trial data

姿态仪实时测定。已知接收阵元在载体坐标系下相对于 GPS 天线的坐标，将 GPS、姿态等数据与阵元时延数据通过时间标对齐后，即可利用完备的数据，通过公式换算将阵元在接收时刻的坐标转换到大地坐标系下。对于时延数据和相应的换能器坐标进行预处理。选取相应潜标的绕行轨迹与相应时延后，即可用最小二乘法解算；对于绕圈解算中的声速选取，平均声速法^[13]具有良好的适用性。平均声速法本质上是适当选取一个等效声速，使它对应的等效传播时延等于真实的传播时延。采用在垂直线上取深度的平均来对声速进行修正，公式为

$$\bar{C} = \frac{1}{Z_H - Z_0} \cdot \sum_{j=0}^{H-1} \frac{C_j + 1 + C_j}{2} \cdot (Z_{j+1} - Z_j) \quad (8)$$

式中： $\bar{C}$ 为等效声速； Z_H 为潜标深度； Z_0 为目标深度； C_j 为深度 Z_j 时的声速。试验海域声速剖面如图6。设置相对声速梯度变化量门限为 $1 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，将声速剖面等梯度分层。在此门限值下，得到700层等梯度声速。 Z_H 为6.204 m， Z_0 预估为3 050 m，代入式(8)可解算得 $\bar{C}$ 为 $1 495.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

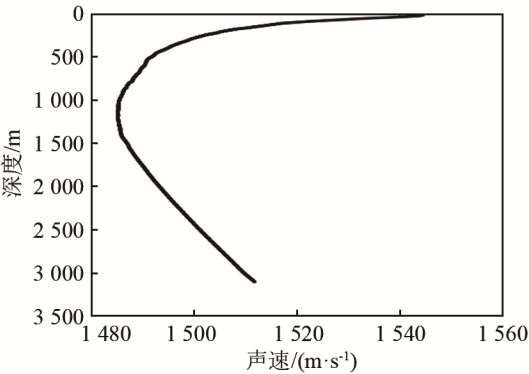


图6 试验海域声速剖面

Fig.6 Sound velocity profile in the experimental sea area

2.2 模型验证

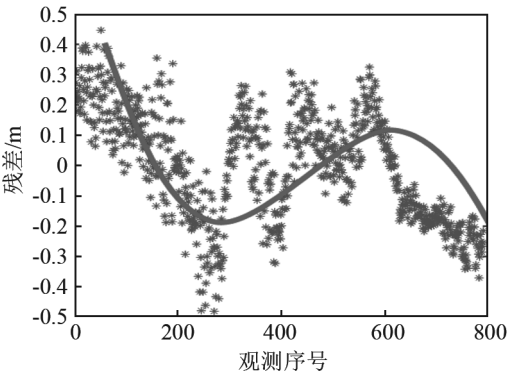
首先将处理后的数据代入无钟差修正的式(4)，

分析残差表现与定位精度。两个潜标解算所得相对坐标及定位精度如表1所示。用定位结果推残差，如图7所示，图中散点为定位残差，平滑曲线表示残差趋势。

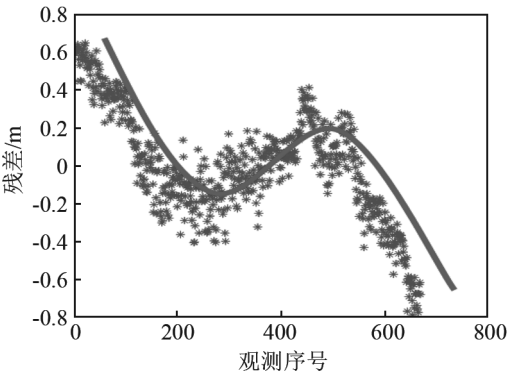
表1 两潜标的定位解算结果

Table 1 The positioning results of two submersible buoys

潜标序号	相对坐标/m	定位精度/m
潜标 1	(734.64, 128.49, -3051.74)	0.18
潜标 2	(-1 192.34, -2 689.76, -3 044.99)	0.29



(a) 潜标 1



(b) 潜标 2

图7 两潜标定位结果反算残差

Fig.7 The inversion residual of two submersible buoys' positioning results

观察两潜标的残差表现，发现均与图4中“无钟差修正残差分布”具有相似的趋势。可推测试验数据中所包含的钟差符合设想模型。故将数据代入式(5)进行解算，求得两个潜标的相对坐标、精度、及精度提高百分比如表2所示，钟差修正模型系数如表3所示。

两潜标的钟差修正前后对比如图8所示，可见残差趋势得到了有效修正。

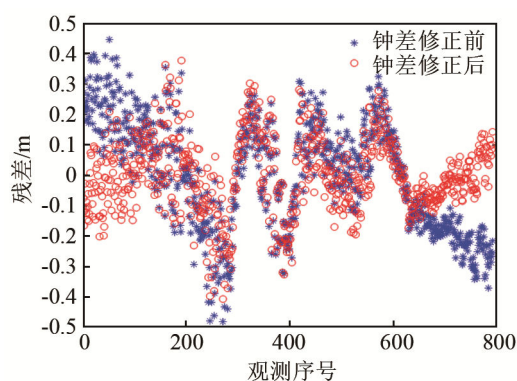
通过以上信息可知，钟差修正后定位精度得到了较明显提高，潜标1的定位精度提高了31.1%，潜标2的定位精度提高了64.6%；且解算所得模型系数与设备精度基本一致，证明了本文建立的钟差修正模型的有效性与准确性。

表 2 两潜标钟差修正解算结果
Table 2 Two submersible buoys' positioning results with clock error correction

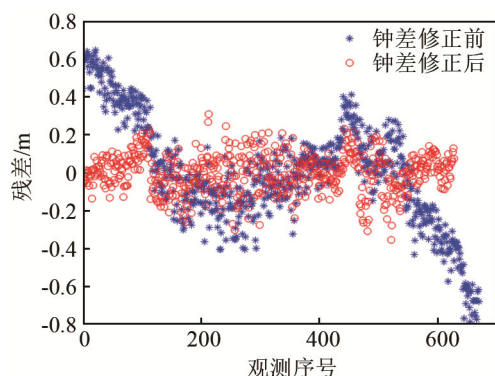
潜标序号	相对坐标/m	定位精度/m	精度提升/%
潜标 1	(734.84, 128.94, -3 053.52)	0.13	31.1
潜标 2	(-1 191.26, -2 689.62, -3 050.74)	0.10	64.6

表 3 两潜标钟差修正模型系数
Table 3 Clock error correction model coefficients for two buoys

潜标序号	模型系数 k	模型系数 b
潜标 1	$1-9.71 \times 10^{-8}$	0.001 29
潜标 2	$1-2.51 \times 10^{-7}$	0.003 97



(a) 潜标 1



(b) 潜标 2

图 8 两潜标钟差修正前后残差对比
Fig.8 Comparison of residuals distribution before and after clock error correction for two submersible buoys

3 结 论

本文通过研究水下钟差产生机理,提出了适用于水下钟差修正的算法。通过仿真验证了模型的有效性及其可行性。随后利用某海试数据对模型进行了进一步验证,两个潜标的定位精度较修正前分别提高了 31.1%、64.6%,且解算钟差模型系数与设备参数一致,定位结果反算残差对比图也显示了修正效果,证明了算法的有效性、准确性。此模型算法对高精度水下固定点声学定位的研究具有推进作用,在钟差存在的情况下可有效提高其定位精度。

本算法为长基线导航中更为复杂的钟差修正提供了理论基础,后续可以以本文模型为依据进行研究;另外,理论上声速误差也是随时空变化的,在钟差修正中,亦包含了随时间变化各种误差的线性部分;潜标 1 修正后残差在 0 附近存在波动,而系统误差应满足正态分布,推测此波动为声速二次型部分带来的影响,有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 许江宁. 浅析水下 PNT 体系及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 1-6.
XU Jiangning. Analysis on underwater PNT system and key technologies[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 1-6.
- [2] 郑彤. 国外水下导航技术现状分析[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(10): 8-10.
ZHENG Tong. Present status study on the foreign underwater navigation techniques[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(10): 8-10.
- [3] 易昌华, 任文静, 王钊. 二次水声定位系统误差分析[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 136-139, 123, 255.
YI Changhua, REN Wenjing, WANG Chai. Analysis on error of secondary acoustic positioning system[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(2): 136-139, 123, 255.
- [4] 赵建虎, 梁文彪. 海底控制网测量和解算中的几个关键问题[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1197-1202.
ZHAO Jianhu, LIANG Wenbiao. Some key points of submarine control network measurement and calculation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1197-1202.
- [5] 孙文舟, 殷晓冬, 曾安敏, 等. 附加深度差和水平距离约束的深海控制点差分定位算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1190-1196.
SUN Wenzhou, YIN Xiaodong, ZENG Anmin, et al. Differential positioning algorithm for deep-sea control points on constraint of depth difference and horizontal distance constraint[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1190-1196.
- [6] SUN D J, LI H P, ZHENG C E, et al. Sound velocity correction based on effective sound velocity for underwater acoustic positioning systems[J]. Applied Acoustics, 2019, 151: 55-62.
- [7] 赵建虎, 刘经南, 周丰年. GPS 测定船体姿态方法研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 353-357.
ZHAO Jianhu, LIU Jingnan, ZHOU Fengnian. Method in determining vessel attitude with GPS[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping (Wtasm), 2000, 25(4): 353-357.
- [8] 宁津生, 陈俊勇, 李德仁, 等. 测绘学概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [9] WANG Y P, LU Z P, QU Y Y, et al. Improving prediction performance of GPS satellite clock bias based on wavelet neural network[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 523-534.
- [10] 王宇谱. 导航卫星钟差预报研究综述[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集——S04 卫星轨道与钟差, 2018: 22-30.
- [11] 王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 卫星钟差预报的小波神经网络算法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 323-330.
WANG Yupu, LYU Zhiping, CHEN Zhengsheng, et al. Research on the algorithm of wavelet neural network to predict satellite clock bias[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 323-330.
- [12] WEBSTER S E, EUSTICE R M, SINGH H, et al. Preliminary deep water results in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, MO, USA. IEEE, 2009: 2053-2060.
- [13] 梁民赞. 水声高精度定位的后置处理技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.