

基于脉冲信号的水下目标定位解算技术研究



史博, 曹天宇*, 葛骑岐, 郭文波, 王子涛

上海交通大学电子信息与电气工程学院自动化系, 上海 200240

摘要: 基于脉冲信号的水下目标探测方法在海洋工程领域有诸多应用。本文在基于传统圆形交汇定位解算仿真分析的基础上, 研究并设计三脉冲编码信号估计时延信息精准求解目标深度的方案, 利用其首脉冲信号探测目标位置并解算水平距离信息; 测深脉冲和参考脉冲分别与首脉冲的时延差值对应目标内的高精度传感器获取的压力差, 从而将目标的深度信息调制在信号时延信息上; 将拷贝相关技术与正交接收机算法理论相结合, 完成测深脉冲与参考脉冲的幅值检测与包络估计。通过外场实测数据结果验证, 基于脉冲信号的水下目标解算算法能够在特定场景下实现水平定位误差小于 5m, 深度定位误差小于 2m 的指标。此技术可为水下目标协同定位与航行保障维护提供有力支撑。

关键词: 脉冲信号设计; 水下目标定位; 圆形交汇算法; 误差分析

DOI: [10.57237/j.se.2023.03.003](https://doi.org/10.57237/j.se.2023.03.003)

Research on Underwater Target Positioning and Calculation based on Pulse Signal

Bo Shi, Tianyu Cao*, Qiqi Ge, Wenbo Guo, Zitao Wang

School of Electronic Information and Electrical Engineering Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: The underwater target detection based on the pulse signal has many applications in the field of marine engineering. Based on the simulation analysis of the traditional circular intersection positioning solution, this paper studies and designs a scheme for accurately calculating the target depth by estimating the time delay information of the three-pulse coded signal. The first pulse signal detects the target position and calculates the horizontal distance information. The time delay difference between the sounding pulse and the reference pulse and the first pulse corresponds to the pressure difference obtained by the high-precision sensor in the target, and the depth information of the target is obtained. However, the copy correlation technology is combined with the quadrature receiver algorithm theory to complete the amplitude detection and envelope estimation of sounding pulse and reference pulse. Through the verification of the field measurement data results, the underwater target resolution algorithm based on the pulse signal can achieve the indicators that the horizontal positioning error of the target is less than 5m and the depth positioning error is less than 2m in a specific scenario. This method can provide strong support for collaborative positioning of underwater targets and guarantee early warning maintenance.

Keywords: Pulse Signal Design; Underwater Target Location; Circular Intersection Algorithm; Error Analysis

*通信作者: 曹天宇, Cao_TY23@163.com

1 引言

海洋资源勘探与海底目标识别在海洋信息感知与交互融合领域应用愈来愈广泛[1]。探测方法主要依托于搭载海洋航行平台的声学设备在进行水下作业时对信息数据的感知,利用布放在海面的浮标单元作为中继节点,将解算数据实时传输至岸基单元,实现对水下目标位置信息的显示与控制[2]。

水下目标高精度定位探测技术根据所处试验环境与战术指标分为两种:一种是目标具备自身发射脉冲信号并接收回波进行解算,即主动探测方式,另一种是自身不具备发射信号能力,但具备探测声源实际位置,即被动探测方式[3-4]。在实际工程应用中,主动探测常常由于良好的抗干扰性被应用于水下声学感知与海底地形地貌成像领域,而被动定位具备良好的定位探测效果,被人们经常应用于合作目标定位跟踪与航行安全保障等领域。目前最为常见的水下目标高精度三维定位方法是基于中继浮标单元的定位解算技术[5-7, 12]。其中,目标搭载信标有规律的发射脉冲信号,中继浮标作为接收单元完成对编码脉冲信号的特征提取与时延信息估计[8-10]。

由于水声信道的特殊性与时变性,脉冲声信号的能量也会随着浮标阵元间隔增大而逐渐衰减,使得浮标在解算脉冲信号的过程中受到众多环境因素干扰,造成对时延估计精度的影响[11, 13]。除此之外,水下目标与中继浮标在深度方向的距离远小于浮标阵元间的距离,使深度方向误差远大于水平方向,导致系统定位精度降低或解算失效的情况。因此,研究并设计特殊的编码脉冲信号发射方式来调制目标深度信息,搭配圆形交汇定位解算技术,能够实现水下目标的三维高精度定位。

2 水下目标三维解算

2.1 定位解算原理

水下目标定位解算技术是针对声信标发射的短时脉冲信号,利用海上中继浮标单元进行声信号接收并完成时延信息估计与定位信息解算。中继浮标阵定位系统效果示意图如图1所示。

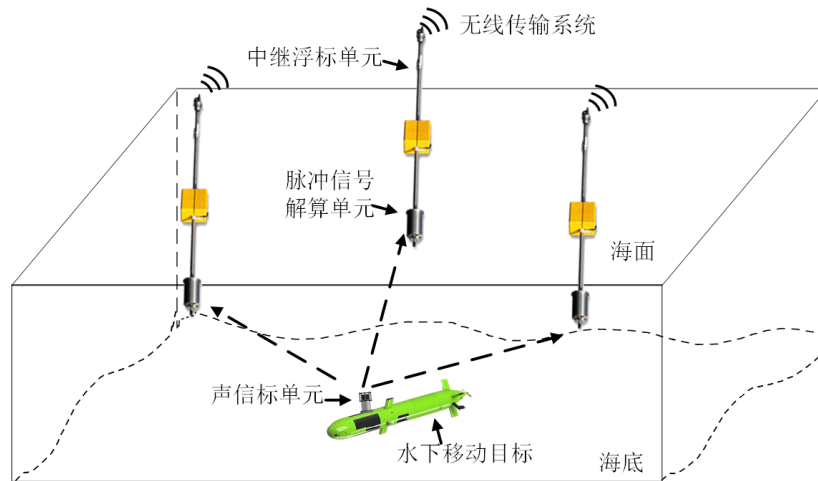


图1 水下目标定位解算示意图

其中,中继浮标单元所搭载的GPS定位接收机能够实时获取自身的位置信息,脉冲信号获取传播时延信息,并带入如下公式(1),实现目标定位解算。

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = (ct_i + c\tau_s)^2 \quad (1)$$

其中, x_i, y_i, z_i 分别为中继浮标坐标值, τ_i 为水声信号传播时延值; τ_s 为浮标解算水声信号时刻与声信

标发射信号时刻的差值; c 为水中声速。当中继浮标与水下目标处于同步工作状态,此时 $\tau_s = 0$ 。下面进行仿真分析。

2.2 定位误差仿真分析

声波在水下传播过程中受到环境噪声的影响,中继浮标在进行联合定位解算时需要考虑误差对全系统

测量造成的影响，因此根据前文交汇解算方程，利用全微分法可求得影响水下目标定位精度的因素。

$$(x_p - x_i)dx_p + (y_p - y_i)dy_p + (z_p - z_i)dz_p = (x_p - x_i)dx_i + (y_p - y_i)dy_i + (z_p - z_i)dz_i + c^2t_idt_i + ct_i^2dc \quad (2)$$

由于不同种类的 GPS 接收机具有不同的定位精度，在尽可能满足系统总体定位需求的情况下选型精度较高的 GPS 接收机能够降低系统的定位误差。水中声速也可以通过加权平均声速法或等效声速来降低对目标定位误差的影响。根据上式可以看出，影响水下运动目标定位精度的误差主要来源是脉冲信号调制的时延误差。

斜距时延误差 Δt_i 对系统定位误差 $(\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p)$ 的影响公式如下：

$$2(x_i - x_p)\Delta x_p + 2(y_i - y_p)\Delta y_p + 2(z_i - z_p)\Delta z_p = c^2 \left[(2t_i + \Delta t_i)\Delta t_i - (2t_i - \Delta t_i)\Delta t_i \right] \quad (3)$$

其中：

$$\Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \Delta x_p & \Delta y_p & \Delta z_p \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{Y} = 2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{bmatrix}$$

$$\Psi = c^2 \begin{bmatrix} (2t_2 + \Delta t_2)\Delta t_2 & (2t_3 - \Delta t_3)\Delta t_3 & (2t_4 - \Delta t_4)\Delta t_4 \end{bmatrix}^T$$

$$\Theta = c^2 \begin{bmatrix} (2t_1 - \Delta t_1)\Delta t_1 & (2t_1 - \Delta t_1)\Delta t_1 & (2t_1 - \Delta t_1)\Delta t_1 \end{bmatrix}^T$$

采用伪逆矩阵法可以整理目标定位精度公式为：

$$\Delta \mathbf{R} = (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y})^{-1} \mathbf{Y}^T (\Theta - \Psi) \quad (4)$$

根据公式(1)可得，当浮标布放深度相同时，解算方程会产生无穷多解，此时将无法定位，而在实际工程中浮标自身重量与布放条件等因素也会避免深度相同的条件，因此在进行模拟仿真分析时，设定中继浮标阵元深度不同。建立如下表 1 所示的布放位置。

表 1 浮标模拟布放位置信息表

| 浮标编号 | 横坐标/m | 纵坐标/m | 浮标入水深度/m |
|------|-------|-------|----------|
| 1 | 1000 | 1000 | 10 |
| 2 | 1000 | -1000 | 12 |
| 3 | -1000 | 1000 | 10 |
| 4 | -1000 | -1000 | 11 |

试验仿真条件：首先保证各浮标阵元间的 GPS 定

位误差保持相同且等效声速一定，引入 2ms 与 5ms 的斜距时延误差，实验仿真结果如下。

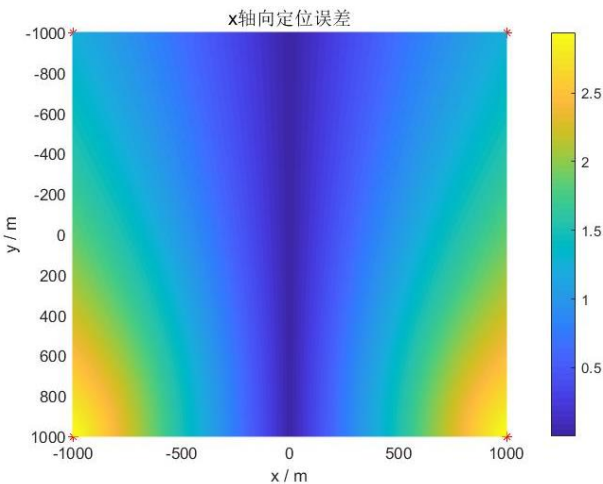


图 2 2ms 时延误差下目标 x 轴向定位误差

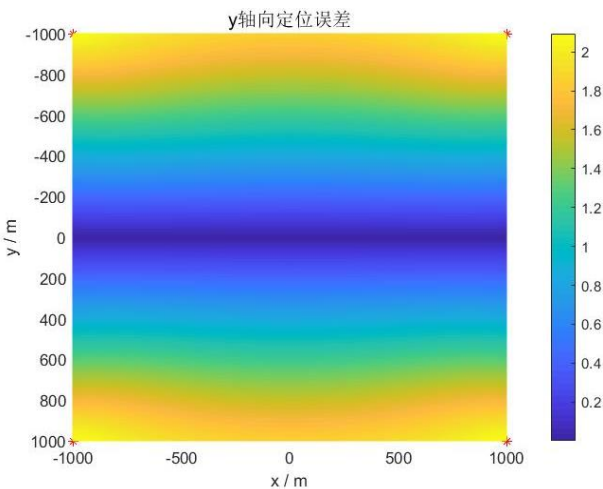


图 3 2ms 时延误差下目标 y 轴向定位误差

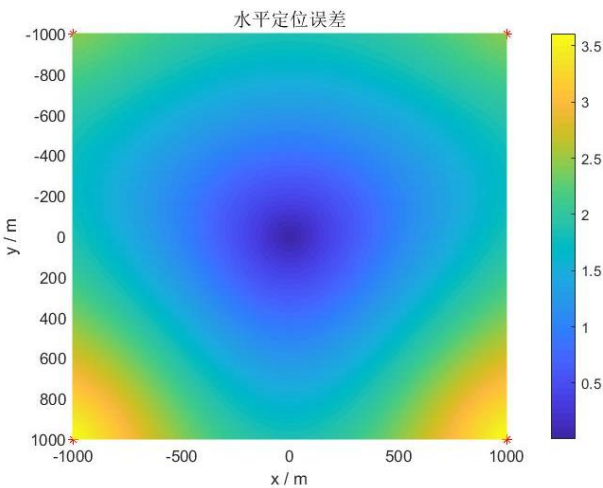


图 4 2ms 时延误差下目标水平定位误差

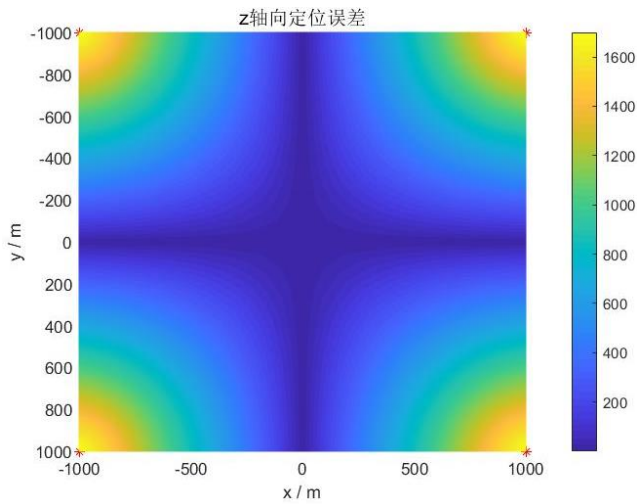


图 5 2ms 时误差下目标深度定位误差

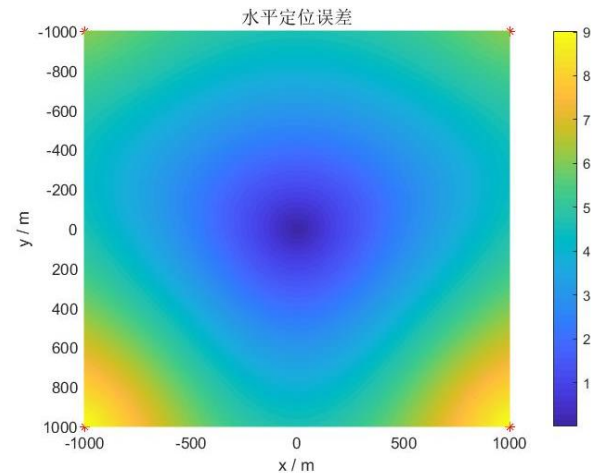


图 8 5ms 时误差下目标水平定位误差

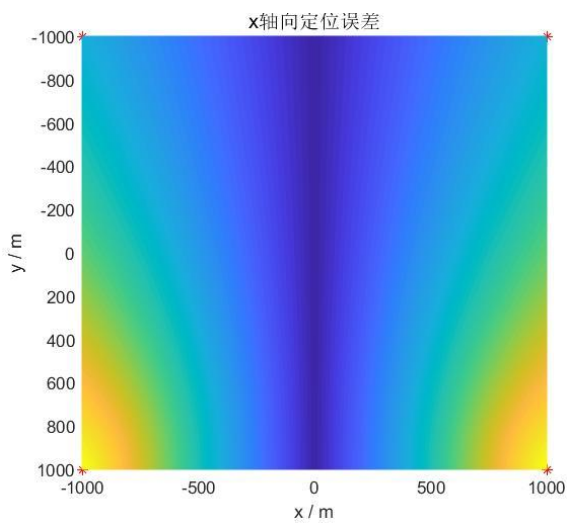


图 6 5ms 时误差下目标 x 轴向定位误差

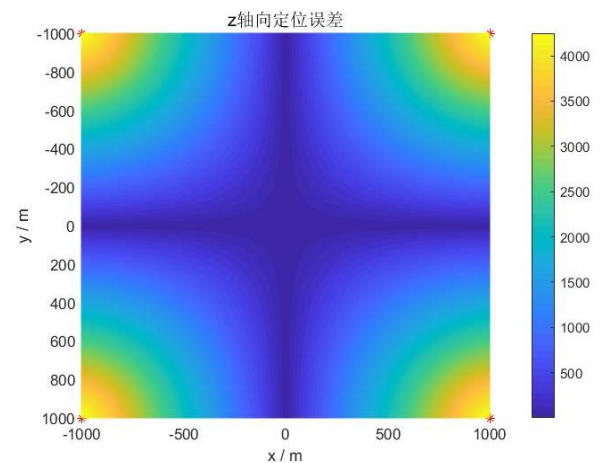


图 9 5ms 时误差下目标深度定位误差

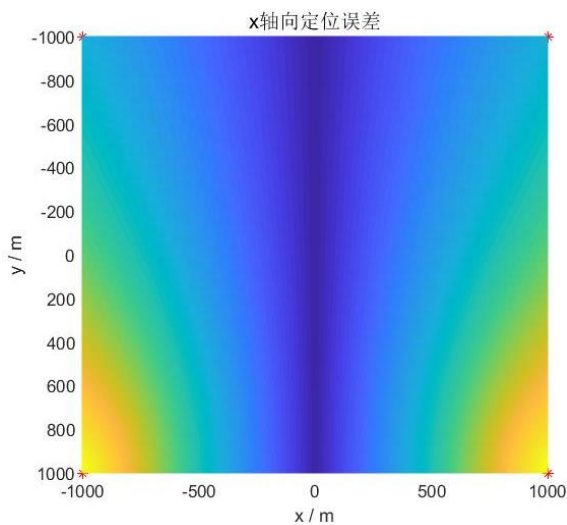


图 7 5ms 时误差下目标 y 轴向定位误差

通过对比上述 8 幅图片右侧色条,可以得出如下结论。当靠近中继浮标位置时,目标水平误差相对较高而深度方向误差较大,改变引入的时延误差,目标在水平方向的误差变化不大。但在深度方向上,误差变化明显并且远高于水平方向。通过对比图 3、图 4、图 8 与图 9 的右侧色条,可以看出,目标在水平方向的误差远小于深度方向的误差。综上所述,在进行目标定位时,中继浮标的深度信息不能作为求解已知量,需将目标深度信息提前求解或先验已知,再进行目标定位解算。

3 三脉冲编码信号设计

为了解决目标在深度方向的定位精度问题,实现精细探测和描述水下运动目标的轨迹,声信标单元可设定较高频率来抑制距离模糊效应。发射频率提高会伴随同步周期缩短,使得目标轨迹探测更加精细,但模糊距离变小又限制了探测距离。因此,本文设计一

种适应长距离定位探测的脉冲跳频编码信号设计方案，解决距离模糊问题，降低深度方向定位误差。

3.1 首脉冲测距技术

首脉冲为目标测距脉冲，即中心频率固定的 CW 脉冲信号。当水下目标在规定海域高速行驶时，系统

自身的多普勒效应会对目标的定位精度产生大量干扰。但由于 CW 信号具备频宽极窄，信噪比高的优点。利用 CW 脉冲作为系统的首脉冲，不仅能够精准测量目标与中继浮标之间的距离，还能为后续脉冲信号增益均衡参考，以避免由于目标自身运动带来的影响。

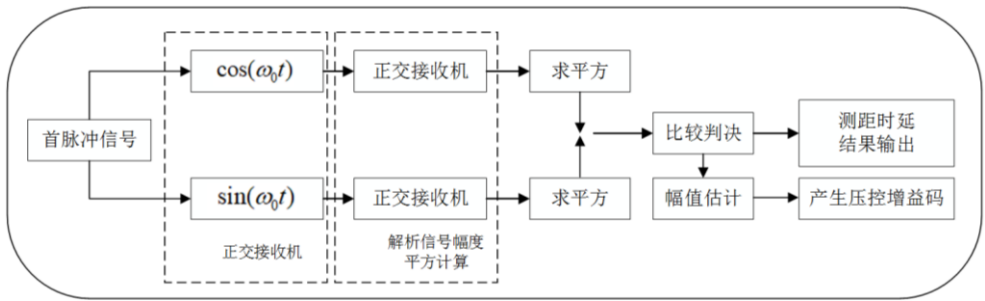


图 10 首脉冲时延检测与估计算法流程图

在信号筛选处理的过程中，首脉冲信号检测算法如上图 10 所示。正交接收机对首脉冲信号进行预处理，并对输出两路信号求平方和，然后对求和信号做过门限判决。将此判决结果作为参考值，同时对首脉冲信号做时延解算和幅值估计，并由幅值估计判别产生压控码经 DA 控制 VCA，实现对后续脉冲信号的自动控制。与此同时，部分脉冲信号会噪声虚警概率升高从而影响门限比较判决。本文采用门限比较器与鉴宽器联合判决的方法，设定阈值，对超过阈值的信号判决有效。

脉冲时延为 t_1 ；参考脉冲与首脉冲之间时延为固定值 t_2 ，测深脉冲与参考脉冲分别与首脉冲的时延差 $\tau = |t_2 - t_1|$ 与目标内部高精度压力传感器获取的压力范围 $|P_i - P_j|$ 相对应，此时等价于将高精度深度信息调制到测深脉冲与参考脉冲上。具体公式如下。

$$\tau = |t_2 - t_1| \tag{5}$$

$$H = H_{\max} \cdot \frac{\tau_{\max} - \tau}{\tau_{\max} - \tau_{\min}} \tag{6}$$

3.2 双尾脉冲跳频测深技术

双尾脉冲信号主要包括测深脉冲与参考脉冲两部分。测深脉冲为正调频率线性调频信号，频率范围 $[f_{m1}, f_{m2}]$ ，其中 $f_{m2} > f_{m1}$ ， $m=1,2,3...N$ ，N 为跳频个数。参考脉冲为负调频率线性调频信号，频率范围 $[f_{m2}, f_{m1}]$ 。测深脉冲位于首脉冲与参考脉冲之间，与首

根据上述深度信息测量公式，求解时延信号峰值是解算的必备条件。由于水声信道的时变特性，掺杂噪声的有用信号会被湮没，噪声中已知信号检测的最有效方法是匹配滤波器或相关接收机。因此，信号处理模块参考对首脉冲的判决结果，对测深脉冲与参考脉冲依次进行拷贝相关、正交变换、时延估计等处理，处理流程见下图 7。

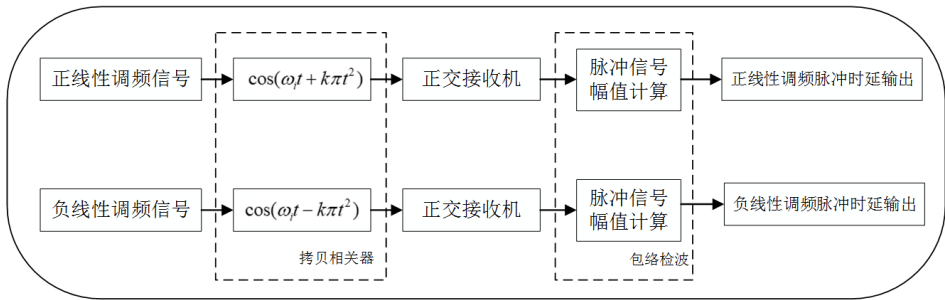


图 11 尾脉冲对时延检测与估计算法流程图

3.3 脉冲信号定位分析

根据上文所述的脉冲信号检测手段,充分展现基于编码脉冲信号在水下运动目标定位解算过程中的自动增益控制与冗余信息处理,并且保证了水下目标三维定位工作的可靠性和有效性,具体体现在以下四方面。

- (1) 对首脉冲 CW 信号处理采用窄带滤波处理技术,双尾脉冲线性调频信号对首脉冲 CW 信号处理性能造成的影响相对较小,使二者时延间隔良好区分而不会交叉重叠,方便后续定位解算。
- (2) 脉冲信号经过复杂水声信道传播,其波形、相位等一系列参数随机化。需要针对特定的信号幅值特性匹配最优的接收机才能进一步完成信号的预处理与检测。

- (3) 利用拷贝相关技术可精确地估计脉冲信号的时延差,从而保证对目标深度信息的准确解算。由于测深脉冲与参考脉冲的信号频率变化趋势相反,经过拷贝相关器时两者之间互不相关,不会对拷贝相关处理造成影响。
- (4) 测深脉冲与参考脉冲对应解算的时延信息也作为目标水平定位的冗余信息,上传至船载显控单元,进一步提高系统的抗干扰性。

4 实验数据算法验证

4.1 系统搭建与实验数据采集

在完成编码脉冲信号设计后,基于脉冲信号的定位解算算法需要在硬件接收电路中实现。声信号接收处理解算系统与数据传输汇聚单元如下图 12 所示。



图 12 脉冲信号解算硬件系统搭建图

其中, FPGA 对声脉冲信号进行采集,控制模拟放大电路和带通滤波器对脉冲信号进行预处理,同时

VCA 电路实现对放大电路增益的实时调控。完成硬件电路搭建后,将定位算法移植 DSP 处理器中进行上机

实现。完成信息解算后, 利用 FPGA 控制数据传输电台实现串口数据收发, 并将原始数据保存内部存储单元, 为后续数据分析提供有力支撑。

4.2 算法性能分析

在完成上述系统搭建与实验数据采集处理设备调试的基础上, 进行外场试验, 验证算法性能。本文选取夏季在某试验场的数据, 用统计学的方法选择多数数据点参与分析研究, 并且运用多次测量取平均值的方法, 尽可能降低系统误差。

在实验过程中, 首先利用声速仪测量实验区域的声速剖面数据作为参考声速, 根据解算的时延数据计算目标深度数据, 通过深度数据选择对应的真实声速值带入定位方程, 进行实时解算。当中继浮标与声信标入水深度改变时, 声速测量值实时修正, 进一步降低系统由于声速造成的测量误差, 从而提高目标的定位精度。

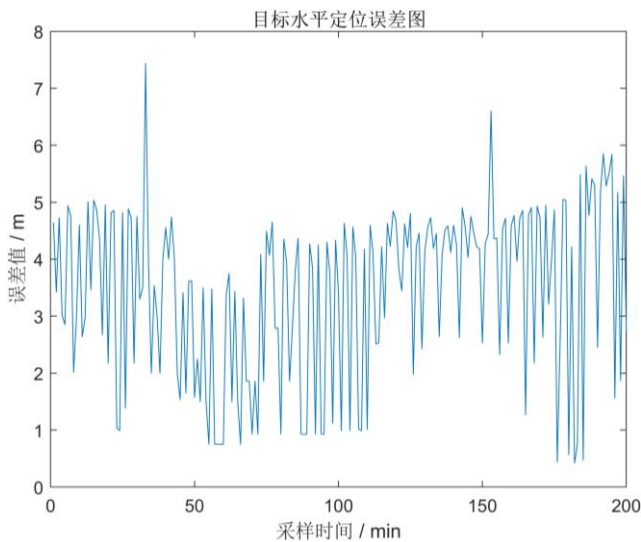


图 13 首脉冲解算误差分析

由于试验场水下环境较为复杂, 水下流速较大, 匀速航行状态下测量值仍存在起伏现象, 如图 13 所示。目标定位误差的均方根值为 3.859 米, 只有极少部分定位误差超过 5m 的预期指标。

测深脉冲解算数据误差分析如下图 14 所示, 明显看出测深数据平稳, 波动范围不大, 误差比较一致且在 1m 以内, 误差最大值为 1.21m。在后续测量与试验过程中, 可对入水深度数值进行高精度测量已达到最终深度数据测试效果良好的目的。

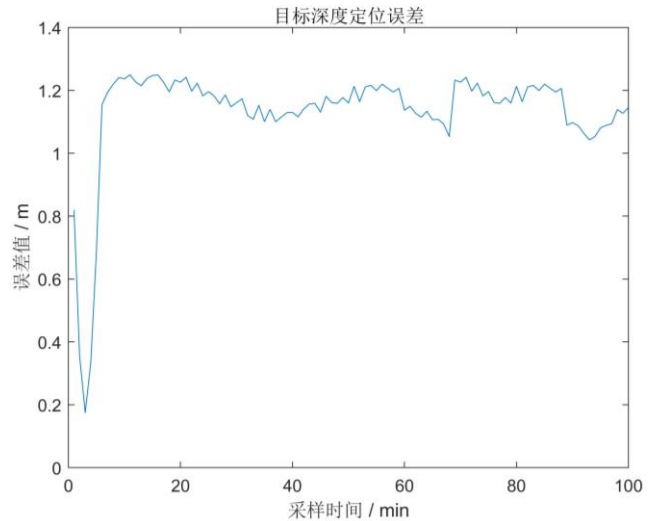


图 14 测深脉冲解算误差分析

5 讨论

本文研究的定位解算技术主要根据实际的应用需求开展的水下动态目标定位精度分析与时延估计解算。随着水深逐渐增加与非视距距离的逐渐增大, 基于脉冲信号的检测算法在海洋工程应用领域还需进一步完善与改进。

- (1) 本文选定的首脉冲 CW 信号与双尾脉冲线性调频信号采用同时发射, 同步接收的工作模式, 难免会造成时延数据丢失与串扰。因此, 针对上述问题, 在下阶段的实验过程中将通过采用上位机与水下接收单元协同工作的模式, 避免上述问题的发生。
- (2) 脉冲信号的被动估计方法比较适用于与先验信息已知情况下的水下目标三维高精度定位, 当目标处于定位盲区或系统模糊位置时, 此方法需要进一步搭配最小二乘法等原理进行初始目标选取以便完成水下目标定位。
- (3) 由于水中声速值随着温度值的改变而改变, 并且由于水温也不是一成不变的, 它也会随着深度不同、环境不同、气候不同而变化。所以为进一步提高系统定位解算能力, 需要针对不同季节、不同场景以及不同深度分析海水温度对声速的影响, 来进一步验证水中声速误差对定位解算算法精度的影响[14]。

6 结论

本文主要进行了对基于脉冲信号的水下动态目标定位解算技术研究得到以下三方面结论。

本文研究了深度方向上基于高精度压力传感器调制脉冲信号的测量原理,能够提高水下目标定位精度。

本文在进行目标位置求解的过程中,分析了圆形交汇算法在解算目标位置三维信息时的三种影响因素,并针对时延误差进行模拟仿真分析,从而得出在解算过程中,深度数据需要通过时延信号调制的方式求解,运用传统圆形交汇算法会导致误差过大,影响定位精度。

本文通过实验数据仿真分析与处理,验证了此算法可实现目标水平误差小于 5m、深度误差小于 2m 的指标。

基于脉冲信号的检测算法拥有较高的信噪比能够为水下高速运动目标提供“高、精、准”的定位技术与解算方案[15]。后续可以根据相关优化算法对目标的定位误差进行滤波,通过高斯牛顿法或举手表决法进行解算位置的优化,提高目标定位精度。通过脉冲信号的时延估计方法在未来将会广泛应用在水下目标定位等应用领域,为实现海洋强国提供有力的技术支撑与保障。

参考文献

- [1] Su X, Ullah I, Liu X, et al. A review of underwater localization techniques, algorithms, and challenges [J]. Journal of Sensors, 2020, 2020.
- [2] Liu L, Du J, Guo D. A clustering approach for error beacon filtering in underwater wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12 (12): 1550147716681793.
- [3] Hao B, Li Z, Si J, et al. Joint source localisation and sensor refinement using time differences of arrival and frequency differences of arrival [J]. IET Signal Processing, 2014, 8 (6): 588-600.
- [4] He J, Li L, Shu T. Bearing and range estimation with an exact source-sensor spatial model [J]. IET Signal Processing, 2020, 14 (9): 614-623.
- [5] 史博, 宋泓儒, 陈琳, 等. 一种新型海洋信息采集平台的设计与实现 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43 (09): 150-153.
- [6] 汪誉. 多元浮标定位水声收发系统硬件研制 [D]. 哈尔滨工程大学, 2020.
- [7] Cao T, Zhao X, Yang Y, et al. Adaptive recognition of bioacoustic signals in smart aquaculture engineering based on R-sigmoid and higher-order cumulants [J]. Sensors, 2022, 22 (6): 2277.
- [8] Cao T, Bian M, Yang Y, et al. A High-Efficiency Optimized Detection Algorithm for Non-Stationary Marine Acoustic Signals in the Time-Frequency Domain [J]. IEEE Access, 2022, 10: 64085-64094.
- [9] 魏嵩, 张磊, 马岩, 等. 低信噪比下离散频率编码波形脉冲信号联合积累检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (03): 977-986.
- [10] Li Q. Hybrid Localization Based on Time of Arrival and Phase Difference of Arrival Fusion [C]. 2019 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2019.
- [11] Wu Y, Ta X, Xiao R, et al. Survey of underwater robot positioning navigation [J]. Applied Ocean Research, 2019, 90: 101845.
- [12] Paull L, Saedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: A review [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39 (1): 131-149.
- [13] Diamant R, Lampe L. Underwater localization with time-synchronization and propagation speed uncertainties [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12 (7): 1257-1269.
- [14] K. C. Jin, G. S. Lee, G. H. Kim, "GPU-based Acceleration for 3D-OCT Imaging", 2nd Asian Conf. Quantitative InfraRed Ther., 2017.
- [15] Kojima M, Asada A, Mizuno K, et al. 3D Acoustic imagery generation by interferometric analysis of long baseline using Interferometric Real Aperture Sonar [C] // Oceans. IEEE, 2016.