

【引用格式】祝侃, 尹飞星. 一种适于浅水定位的超短基线装置与定位方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(5): 430-434.

一种适于浅水定位的超短基线装置与定位方法

祝侃^{1,2}, 尹飞星^{3,*}

- (1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076;
3. 嘉兴易声电子科技有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要 针对浅水水域水声信号多途效应导致信道衰落, 真实时延信号获取难度大的问题, 研制了一种适用于浅水定位的超短基线装置, 并提出一种附有约束条件的互相关时延估计方法。采用脉冲挑选和时延差相位修正方法对目标轨迹进行精确跟踪定位, 某湖试实验结果表明, 该方法的定位轨迹光滑稳定, 野点少, 定位精度高。

关键词 互相关; 时延估计; 超短基线; 浅水定位

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)05-0430-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.05.007

An Ultra-short Baseline Device and Positioning Method Suitable for Shallow Water Positioning

ZHU Kan^{1,2}, YIN Feixing^{3,*}

- (1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China;
3. Jiaxing Esonar Electronic Technology Co., Ltd, Jiaxing 314000, China)

Abstract To address the difficulty of obtaining real time-delay signals due to the channel fading caused by multipath effect for acoustic signals in shallow waters, an ultra-short baseline (USBL) device is developed for shallow-water positioning, and a cross-correlation time-delay estimation method with constraints is proposed. Pulse selection and phase correction method for time-delay difference are used to accurately track and locate the target trajectory. The results of a lake experiment show that the positioning trajectory of the proposed method is smooth and stable, with few wild points and high positioning accuracy.

Key words cross-correlation; time-delay estimation; ultra-short baseline (USBL); shallow-water positioning

0 引言

随着海洋事业的发展, 在海洋探测研究、海洋工程、海洋矿产资源、水下考古、海洋国防建设等方面, 都离不开水下定位系统为其提供高精度、高

质量的定位数据^[1-3]。超短基线定位 (Ultra-short Baseline, USBL) 是一种水下声学定位技术^[4-7], 其基线长度一般为几厘米至几十厘米, 由于其安装简单、使用方便而得到了广泛应用。在实际测量时, 需要测量声速、声信号往返时间、基阵坐标及基阵

收稿日期: 2022-03-17

作者简介: 祝侃 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水下控制系统设计, 海洋观、探测装备设计。

*通信作者: 尹飞星 (1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋水声定位设备开发、定位系统设计等技术研究。

的方位和姿态角度^[8]。超短基线定位系统利用各个阵元之间的相位差 (或者时延差) 来测量运动目标或固定目标的方位, 通过发射与接收之间的时间差来测量两者之间的距离, 再融合高精卫星定位数据等实现目标的三维定位^[9-10]。

然而, 水声信道复杂, 尤其浅水环境下, 其边界及介质起伏效应明显, 造成多径时延扩展, 信号衰落严重, 即使利用了宽带信号检测技术, 但由于多途效应会导致对信号真正到达时刻的时延计算仍然存在一定难度。因此, 如何在这种复杂的水声环境下, 获取高质量的声学定位数据, 是水下定位的难点之一。本文提出一种附有约束条件的互相关时延估计方法用于浅水超短基线定位, 该方法适用海洋石油勘探开发、水下打捞、搜救等海洋工程涉及的水下目标定位需求, 可对水下航行体、拖鱼、潜标、潜水员及其它水下目标进行精确定位和跟踪。

1 浅水定位的超短基线装置

适用于浅水定位的超短基线装置包括定位基阵、甲板单元和辅助设备, 装置的系统框图如图 1 所示。甲板单元通过主控软件实现对定位基阵的控制和数据采集, 主控软件用于解算和显示水下目标的实时位置和运动轨迹, 可显示多个目标信息, 包含相对定位基阵的位置信息以及绝对的大地坐标信息。同时也可显示舰船的位置轨迹和航姿变化, 并能进行快速的声学性能分析。

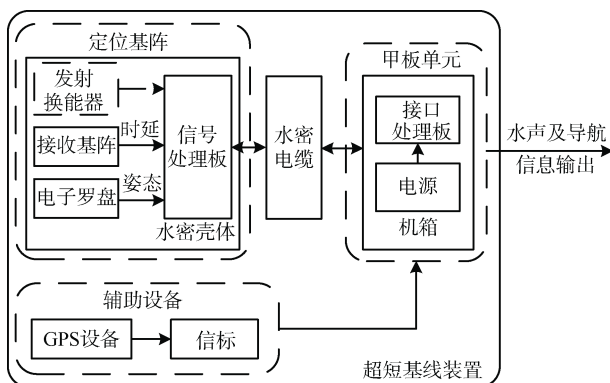


图 1 超短基线装置系统框图

Fig. 1 Block diagram of USBL system

定位基阵采用一体化基阵, 包括接收基阵、电子罗盘、信号处理板、发射换能器以及水密壳体。

接收基阵采用短间距四元十字交叉设计, 各个阵元处于同一平面, 各个阵元同时接收声学信号, 并且把声电转换后的数据送给信号处理板。电子罗盘安装在水密壳体内, 实时测量定位基阵的三轴姿态信息, 并把数据送给信号处理板进行解算。信号处理板是整个定位基阵的核心, 负责声学信号的调理、采集、发射、处理和传输。信号处理板的处理器采用 FPGA 和 DSP 组合架构, FPGA 完成数据采集、信号处理、信号检测等任务, DSP 完成脉冲挑选和数据分析及通讯等任务。发射换能器布置在接收基阵的中间, 用于在应答方式下发射特定制式的声脉冲信号。水密壳体是定位基阵的载体, 为圆筒形结构, 并采用钛合金材料制成, 以便满足对设备重量和耐海水腐蚀的要求。

甲板单元包括机箱、电源模块和接口处理板。机箱是甲板单元的载体, 前面板用于显示状态, 后面板为开关控制区并且设置有可插拔的接插件。电源模块主要包括输入电源处理模块、开关电源模块和线性稳压模块等, 主要向甲板单元、定位基阵等设备提供稳定的直流电。接口处理板是甲板单元的中继, 用于接收和转发数据、指令、同步信号。甲板单元具有标准网络输出接口, 可融合航姿, GPS 等信息进行精确自定位。此外, 超短基线装置在使用时还需配备包括 GPS 设备、授时仪和声学信标等辅助设备, 信标支持同步和应答 2 种工作模式。

2 附有约束条件的互相关时延差估计方法

四元十字交叉接收基阵定位原理如图 2 所示。图 2 中, 1、2、3、4 分别为 4 个水听器 (或 4 个接收阵元), 两两阵元 1 和 3、2 和 4 相互间隔 d , 单位 m 。目标位于 $S(x, y, z)$, 目标矢径为 OS , R 为目标到基阵中心的距离, 矢径 OS 与 x 轴和 y 轴的夹角分别为 θ_{mx} 、 θ_{my} , 阵元 1 和 3、2 和 4 接收到目标的时延差分别为 τ_{13} 、 τ_{24} , 根据空间几何关系有:

$$x = R \cos \theta_{mx} = \frac{Rc}{d} \tau_{13}, \quad y = R \cos \theta_{my} = \frac{Rc}{d} \tau_{24} \quad (1)$$

式中: c 为水中声速, m/s , 通过声速仪测量; R 为通过回波测距法测得的斜距。因此, 定位精度主要取决于时延差 τ 的精度, 即准确估计时延差, 是提高定位精度的关键。

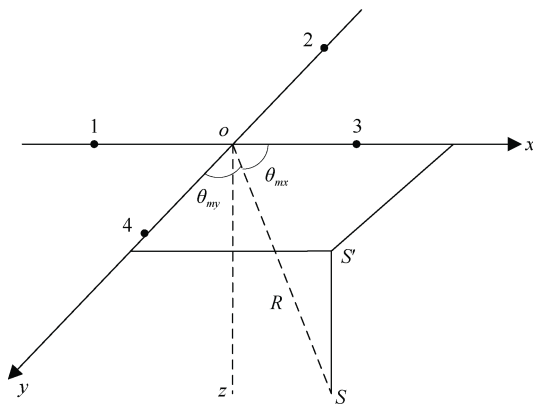


图 2 四元接收基阵定位原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 4-element receiving array positioning principle

本文提出一种适用于浅水超短基线定位的附有约束条件互相关时延差估计方法,该方法主要涉及脉冲挑选和时延差相位修正。在超短基线装置中,需要估计各个通道的时延,具体过程如下:

1) 采用宽带信号系统的拷贝相关估计时延。

设声源发出的信号为 $s(t)$, 其信号持续时间 T 。阵元接收到的信号 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = ks(t - \tau) + n(t) \quad (2)$$

式中: k 表示信号的幅度; τ 是信号传输的时延; $n(t)$ 是加性噪声。

接收到的信号 $x(t)$ 与参考信号 $s(t)$ 进行相关运算, 得到相关函数为

$$R(\tau) = \int_0^T s(t)x(t + \tau)dt = kR_{ss}(\tau - \tau) + P(\tau) \quad (3)$$

式中: $R_{ss}(\tau)$ 是 $s(t)$ 的自相关函数; $P(\tau)$ 是参考信号 $s(t)$ 分别与 $n(t)$ 相关得到的结果。

由于自相关函数 $R_{ss}(\tau)$ 满足 $|R_{ss}(\tau)| \leq R_{ss}(0)$, 若选择合适的信号形式 $s(t)$, 其自相关函数峰值尖锐, 使得 $R(\tau)$ 在 τ 时刻受 $P(\tau)$ 的影响较小, 那么则可以用检测 $R(\tau)$ 峰值位置的方法来获得确定时延 τ 和幅度 a , 取出峰值点处的相位 ρ , 进而确定信号到达的时延和相位和幅度。

定位基阵通过方法 1) 解算出接收信号的时延和相位以及幅度信息后, 通过电缆传输到岸上的甲板单元, 再传输到主控软件进行定位解算。

2) 脉冲挑选过程。

由于浅水环境的多径效应, 方法 1) 求出的每

个阵元满足条件的峰值脉冲可能有多个, 在主控软件内需再进一步筛选满足约束条件的脉冲。

步骤一, 低幅值脉冲剔除。剔除最大幅值脉冲的 0.4 倍以下幅值的脉冲, 避免能量小的脉冲参与到定位中, 满足脉冲幅值的约束条件为

$$a = a_{\max} * 0.4 \quad (4)$$

式中, a_{\max} 表示脉冲的最大幅值, 系数 0.4 是基于多途模型下多途的脉冲幅值不大于真实信号脉冲的倍数假设。

步骤二, 周期间脉冲剔除。根据最大工作周期和最大航速所能产生的最大时延变化, 每个脉冲与本阵元历史脉冲进行比较, 剔除周期间变化大于此限制的脉冲。与历史脉冲相比, 本周期的脉冲时延变化满足的约束条件为

$$\Delta\tau \leq T_{\text{工作周期}} * V_{\text{航速}} * 1852/3600/c \quad (5)$$

式中: $T_{\text{工作周期}}$ 为系统定位工作周期, s; $V_{\text{航速}}$ 为目标运动航速, kn。

步骤三, 阵元间脉冲剔除。根据基线长度引起的阵元间最大时延差, 计算两两阵元间的时延差, 剔除阵元间变化大于此限制的脉冲, 两两阵元间的脉冲时延差满足的约束条件为

$$\Delta\tau \leq d/c \quad (6)$$

根据以上剔除后, 所剩脉冲均满足幅值要求、工作周期、工作航速、基线长度所能容许的最大误差。

步骤四, 时延差脉冲选取。求取与历史两两阵元间时延差最小所对应的脉冲。

3) 时延差相位修正。

通过上述脉冲挑选获取到的目标脉冲求取两两阵元间的时延差为时延差的初测值, 为进一步提高超短基线的定位精度, 还需再进行相位修正, 即相位差值反映到时延差的修正值, 时延差初测值和时延差修正值的差值, 即为时延差相位修正值:

$$\Delta\tau_{\text{修正值}} = \Delta\rho/2\pi f_0, \quad \Delta\tau_{\text{相位修正值}} = \Delta\tau_{\text{初测值}} - \Delta\tau_{\text{修正值}} \quad (7)$$

式中: $\Delta\rho$ 为两两阵元间的相位差; f_0 为宽带信号的中心频率。

3 湖试实验与结果分析

图 3 和图 4 分别为自主研发的超短基线定位系

统和配套的合作声学信标。在某湖试实验中, 实现了 10~40 m 浅水条件下对水下目标的超短基线定位功能。

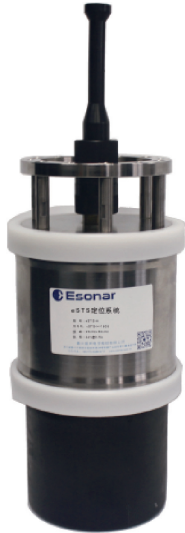


图 3 eSTS-H 超短基线定位系统
Fig. 3 eSTS-H USBL system



图 4 eBN801 声学信标
Fig. 4 eBN801 acoustic beacon

阵元 1 和 3、2 和 4 通道采集的原始时延差和经过附有约束条件跟踪后的时延差分别如图 6 和图 7 所示。对比处理前后的时延差可以看出, 通过

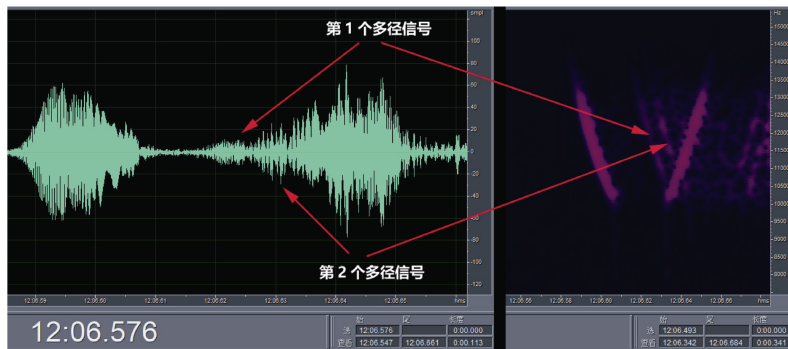


图 5 湖上试验中的声信号多径效果时频域图
Fig. 5 Time-frequency domain diagram of multipath effect of acoustic signals in lake experiment

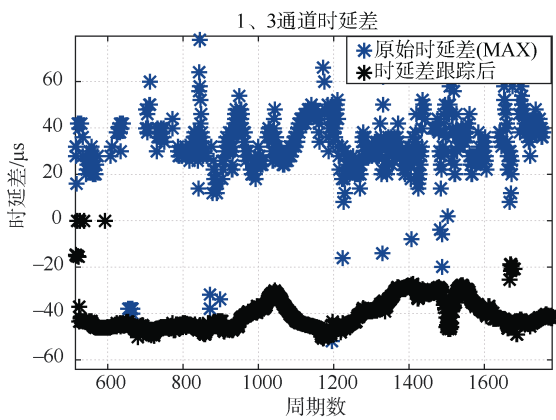


图 6 通道 1、3 时延差
Fig. 6 Time delay difference between Channel 1 and 3

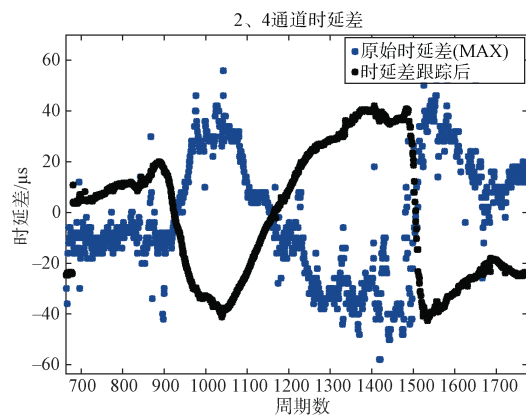


图 7 通道 2、4 时延差
Fig. 7 Time delay difference between Channel 2 and 4

约束条件互相关时延估计的时延差曲线的光滑度和连续性都有明显提高。2 种时延差对目标轨迹进行跟踪定位的结果如图 8 和图 9 所示,蓝色曲线为采用原始时延差的定位结果,红色曲线是时延差跟踪后的定位结果,红色曲线的定位轨迹光滑、稳定,定位精度高。

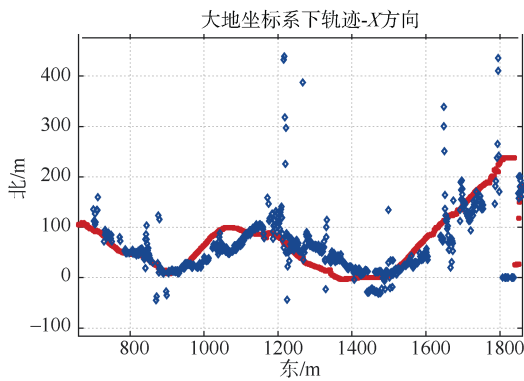


图 8 x 方向定位结果
Fig. 8 Positioning results in x direction

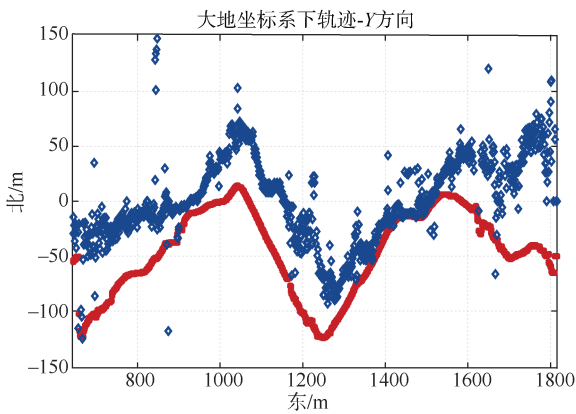


图 9 y 方向定位结果
Fig. 9 Positioning results in y direction

4 结束语

本文提出一种附有约束条件的互相关时延差

估计方法,并应用于某超短基线定位装置。通过对原始时延差附有约束条件后的处理,提高了时延差估计值的光滑度和连续性,使最终的目标定位轨迹更加光滑、稳定,提高了定位精度。湖上试验证明了方法的有效性和实用性,结果表明本文所提方法,在湖上浅水试验条件下的定位效果更好。

参考文献

- [1] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] PAULL L, SAEEDI S, SETO M, et al. AUV navigation and localization: a review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39 (1): 131-149.
- [3] 张娴, 朱月仙, 许海云, 等. 深海潜水器导航技术专利分析[J]. 科学观察, 2014, 9 (5): 1-12.
- [4] 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 等. 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.
- [5] 周红伟, 张国堉, 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): 76-79.
- [6] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 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.
- [7] 吴静波, 程淑萍, 赵鹏铎. 基于长基线和超短基线联合的拖曳目标定位技术[J]. 中国舰船研究, 2019, 14 (1): 156-161.
- [8] 余白石, 王占勇. 基于最小二乘法的超短基线水声定位系统校准方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2010, 3 (5): 408-415.
- [9] 徐晓苏, 孙晓俊, 张涛, 等. 基于重复广义互相关时延估计的超短基线水声定位算法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27 (1): 66-71.
- [10] 郑琛瑶, 潘泉, 董真杰. 利用相关峰内插时延估计提高四元阵定位精度[J]. 声学技术, 2012, 31 (5): 526-529.

(责任编辑: 张曼莉)