

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416070

单平台水下定位系统设计与实现^{*}

胡武清 贾云飞 杨玉全 肖凯文
(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要: 为了解决在水下未爆实验弹体的回收工作中,LBL定位系统常表现出效率低下且耗时较长,而USBL系统则存在定位精度不足等问题,设计了一种高效的单信标水下定位系统。该系统由两部分组成:一部分为超声波信标,该装置与实验用的水下炮弹同步发射至水下;另一部分为超声波接收模块,该模块装配于UUV上,负责检测来自信标的超声波信号。通过UUV在其预定的航行轨迹上多次截获超声波信标发出的信号,并记录对应的时间戳数据。利用这些时间戳数据,结合VLBL定位技术,系统能够计算出未爆弹体的精确三维坐标。经过一系列实验测试,证明这一单信标水下定位系统能够在湖泊环境中定位50米范围内的未爆实验弹,并且定位精度可达到分米级。本项技术的成功开发不仅提升了水下未爆弹药的探测效率和安全性,也为其他海洋工程作业、水下考古以及海底资源勘探提供了一种新的高精度定位手段。

关键词: 超声波;虚拟长基线定位;水下未爆炸弹药;水下潜航器

中图分类号: TH764;TJ67;TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and implementation of a single-platform underwater positioning system

Hu Wuqing Jia Yunfei Yang Yuquan Xiao Kaiwen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To solve the problems of low efficiency and long time-consuming in the recovery of unexploded ordnance underwater by LBL positioning system, and the problem of insufficient positioning accuracy by USBL system, an efficient single beacon underwater positioning system is designed. This system consists of two parts: one part is an ultrasonic beacon, which is launched into the water simultaneously with the experimental underwater shell; the other part is an ultrasonic receiving module, which is mounted on the UUV to detect the ultrasonic signals from the beacon. By capturing the ultrasonic signals emitted by the beacon multiple times along its pre-determined navigation path, and recording the corresponding time stamp data, the system can calculate the precise three-dimensional coordinates of the unexploded projectile using VLBL positioning technology. After a series of experimental tests, it has been proven that this single-beacon underwater positioning system can locate unexploded experimental projectiles within a range of 50 meters in lake environments, with a positioning accuracy that can reach the decimeter level. The successful development of this technology not only improves the detection efficiency and safety of underwater unexploded ordnance but also provides a new high-precision positioning method for other marine engineering operations, underwater archaeology, and seabed resource exploration.

Keywords: ultrasonic; virtual long baseline positioning; underwater unexploded ordnance; underwater unmanned vehicle

0 引言

水下定位方法按照接收基阵基线的长度的不同,主流的定位系统被划分为长基线(long baseline,LBL)、短基线(short baseline,SBL)以及超短基线(ultra-short baseline,

USBL)3种类型。在LBL定位系统方面,英国Sonardyne公司的Fusion系列长基线定位系统,该系统通过在海底安置多个声学接收装置,形成海底定位基阵,并利用声波传播时间长度来实现信标定位。它运用了三角测量法以提供高精度、实时的水下定位,其精度可达到亚米级别,且极为可

收稿日期:2024-05-20

^{*} 基金项目:国防基础科研计划(JCKY2021110B024)项目资助

靠。然而,由于需要在较远的多个位置安装超声波接收器, Fusion 系统的布放、校准和回收等工作流程较为复杂和耗时^[1]。在 SBL 定位系统方面,澳大利亚的 Nartronix 公司研发了采用全非金属自支撑式光缆(all-dielectric self-supporting stranded optical fiber cable, ADSS)信号的短基线系统 NASDrillRS925,这一系统的设计将多个换能器单元准确布置在船底,并通过记录信标发出的超声波信号到达接收单元的时间差,计算出超声波信标的方位和距离。尽管如此, SBL 系统的定位精度和覆盖范围通常不如 LBL 系统,为了提升定位精度,需要增加船底基阵的长度^[2]。在 USBL 定位系统方面,法国 Oceano Technology 公司的 posidonia6000 型系统亦将定位基阵安装在船底。与 NASDrillRS925 类似,但基阵长度更短,它依靠各接收单元接收到的信号相位差来求解目标的方位和距离。由于 USBL 系统的基阵相比 LBL 系统更为紧凑,为了实现较高的定位精度,需要进行大量的校准工作^[3]。

在实验用弹的搜索工作中,时间是最关键的因素。然而,传统的水下定位系统常常因为需要布置复杂的传感器阵列,维护难度大以及占用较多空间而显得笨重和耗时,这在快速变化的海洋环境中尤为明显。为了克服传统水下定位系统的诸多弊端,本研究通过整合超声波接收器与无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV),创新设计了一种适应性强的单信标水下定位系统。该系统采用虚拟长基线(virtual long baseline localization, VLBL)定位技术,系统在 UUV 预定的航行轨迹上,多个位置采集信标信号,结合 UUV 自身的位置信息,最终解算出水下实验用弹的位置信息^[4-6]。与传统定位系统需要安装 3 个及以上的超声波接收器不同,该系统仅需在 UUV 上安装一个超声波接收器,同时减少了超声波接收器位置标定工作,极大的简化了系统的安装过程和调试时间,使其能够灵活适应多变的水域环境。这种新型系统不仅为水下实验用弹的快速回收提供了强有力的技术支持,还增强了国家的海上安全性,并助力海洋强国构建。随着相关技术的不断演进,该系统将在海洋资源勘查、环境监控以及港口管理等众多领域展现出广泛的应用潜力^[7]。

1 系统总体方案设计

1.1 超声波信标部分系统原理

超声波信标部分系统的工作原理如图 1 所示,系统主要由:电源管理部分、信号控制部分、超声波发射部分组成^[8]。

在水下定位系统中,超声波信标的核心组件是压电陶瓷超声波换能器,其工作原理基于逆压电效应。该效应通过在压电陶瓷的极化方向施加电场,激发材料的机械形变,从而产生超声波信号。考虑到超声波信标的体积限制以及与弹体同步发射至水中的要求,信标的电源设计采用锂电池。为了提升换能器产生的超声波信号强度,系统设计中

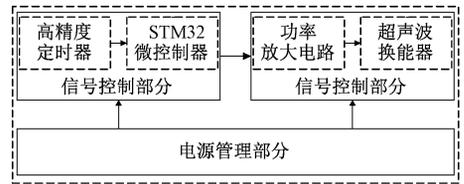


图 1 超声波信标部分系统框图

Fig. 1 Block diagram of the ultrasonic beacon part of the system

包括了超声波功率放大电路,用于提高换能器的供电电压。这一电路的作用是确保即使在低能量供电条件下,也能够输出足够强度的超声波信号,以维持其在水下的传播效率和探测范围。当换能器处于水中静止状态时,单片机将周期性地产生 35 kHz 的脉冲信号,每个周期包含 7 个脉冲。这些信号经过功率放大电路的处理和放大后,驱动超声波换能器发出相应的 35 kHz 超声波信号,以便后续的超声波接收装置能够有效地进行采集和分析。超声波信标实物如图 2 所示。



图 2 超声波信标实物图

Fig. 2 Physical image of the ultrasonic beacon

1.2 超声波接收部分系统原理

超声波接收部分系统的工作原理如图 3 所示,系统主要由:电源管理部分、信号调理部分、信号采集与存储部分组成^[9]。

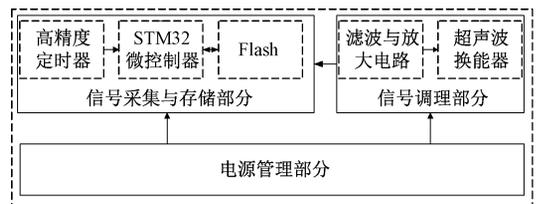


图 3 超声波接收部分系统框图

Fig. 3 Block diagram of the ultrasonic receiving section

在超声波接收部分的工作流程中,它与 UUV 协同作业,在水域中导航并侦测由超声波信标发出的信号。利用压电陶瓷换能器的正压电效应,这一效应通过压电材料在声波的机械应力作用下产生电荷的现象,实现了对超声波信号的接收和转换^[10]。紧接着,信号调理电路对转换后的电信号进行精细处理,筛选出 35 kHz 的脉冲信号,确保了信号的清晰度和可辨识度。最终,这些处理过的信号触发单片机,使其精确记录下相应的触发时刻,这一数据是计算 UUV 与信标之间相对位置的关键。超声波接收盒实物如

图 4 所示。



图 4 超声波接收盒实物图

Fig. 4 Actual image of the ultrasonic receiving box

2 系统硬件设计

2.1 电源模块设计

在超声波信标部分的设计中,该装置被安装在弹体内部,并需满足水下炮弹测试的严格要求。具体来说,信标部分的系统设计工作时间不应少于 6 h,这一时间跨度必须包括炮弹的发射前准备和发射后的回收过程。鉴于这些需求,选择了一种高能量密度、具有优异抗冲击性能的 7.4 V 锂电池作为电源,确保了信标系统在整个工作期间的稳定供电。表 1 展示了在 7.4 V 供电条件下,信标系统在不同工作状态下的电流消耗情况。

表 1 信标系统各工作状态电流大小

Table 1 The current of each working state of the beacon system

工作状态	待机	超声波发射
工作电流/mA	29	44

在设计超声波信标系统中,需确保其在 6 小时内支持炮弹的发射及回收操作。系统每 10 秒发送 7 个 35 kHz 脉冲信号,累计发射时间仅 0.25 s,可忽略不计,因此待机时间为 10 799.75 s。鉴于信标随炮弹投入水中,必须适应从 0℃~70℃ 的工作环境。特别在 0℃ 低温条件下,锂电池的有效容量将下降至其常温容量的 79.3%,影响其续航性能。为此,设计时采取保守策略,选择的锂电池容量是预期耗能的 2 倍,以应对温度引起的容量衰减并留有足够冗余。通过式(1)计算,确定配备 500 mAh 容量的锂电池能够满足系统长时间的工作需求。

$$C = \frac{29 \text{ mA} \times 6 \text{ h}}{79\%} \times 2 \approx 440 \text{ mA} \cdot \text{h} \quad (1)$$

如图 5 展示的超声波信标部分包含多个功能模块,每个模块有特定的电压需求。为此,7.4 V 的输入电源经过一个线性稳压器型号 LM1117,该稳压器负责将输入电压稳定在 3.3 V,以满足单片机的供电要求。同时,为了满足超声波换能器更高的电压需求,同样的输入电源被导向一个升压芯片 MT3608。该升压芯片根据式(2)所定义的升压关系,将 7.4 V 原始电压升至 24 V,从而为超声波换能

器提供必要的电能。

$$U_{out} = U_f \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 0.6 \text{ V} \times \frac{38k + 2k}{2k} = 24 \text{ V} \quad (2)$$

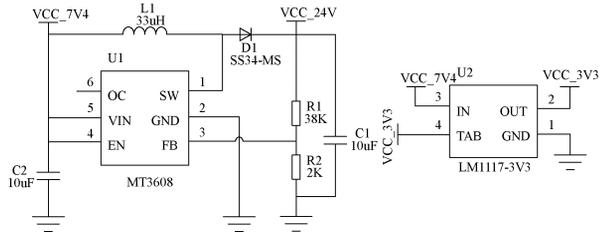


图 5 信标部分电源模块电路图

Fig. 5 Circuit diagram of the power module of the beacon part

2.2 功率放大模块设计

在超声波信标部分的设计中,由于 STM32 单片机产生的脉冲信号能量不足以直接驱动超声波换能器,因此专门设计了一个高效的驱动电路,如图 6 所示。该驱动电路旨在放大 STM32 单片机产生的低能量脉冲信号,以提供足够的驱动力给超声波换能器,确保其能够正常工作并产生所需的声波信号。

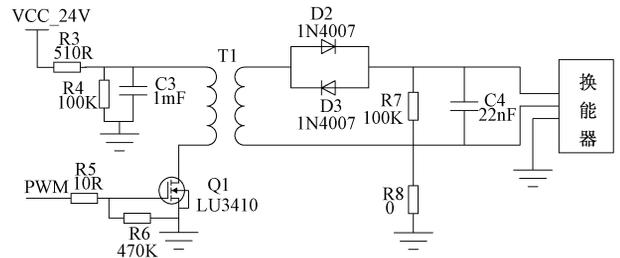


图 6 功率放大模块电路图

Fig. 6 Power amplification module circuit diagram

STM32 单片机产生 35 kHz 的脉冲信号,该脉冲信号首先通过 MOSFET 管 Q1 进行功率放大,将信号强度提升至 24 V 水平以满足变压器 T1 的输入要求。随后,经过精确设计变比为 16 : 270 的变压器 T1 进一步将 24 V 的脉冲信号电压升高至 400 V。增强后的 400 V 脉冲信号具备了足够的能量去驱动超声波换能器,从而产生出功率更强、传播距离更远的超声波信号。

2.3 信号调理模块设计

超声波换能器接收到的原始超声波信号极为微弱,通常仅有数十毫伏,为了扩展系统的探测范围并提高信号检测的灵敏度,首先需要将采集到的原信号进行放大。由于放大过程中不可避免地将噪声信号一并增强,为了准确提取出 35 kHz 的超声波信号,并去除不必要的噪声,设计了图 7 所示的多端负反馈(multiple feedback, MFB)带通滤波器进行信号的滤波处理^[11]。该接收系统的带通滤波器由四阶 MFB 带通滤波器构成,通过精确设定各级滤波器的电阻和电容值,依据式(3)~(5),可以计算出各级的中心

频率均设定为 35 kHz,而它们的放大倍数分别为 2.7 倍、2.7 倍、18.7 倍和 5 倍。利用 Proteus 软件进行的仿真实验进一步验证了整个带通滤波电路的性能,幅频特性曲线如图 8 所示,展示了该滤波器对不同频率信号的增益响应,从而确认了其设计的有效性 with 实用性。

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi C \sqrt{\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2}}} \quad (3)$$

$$A = \frac{R_3}{2 \cdot R_1} \quad (4)$$

$$BW = \frac{2 \cdot f}{\sqrt{\frac{R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}} \quad (5)$$

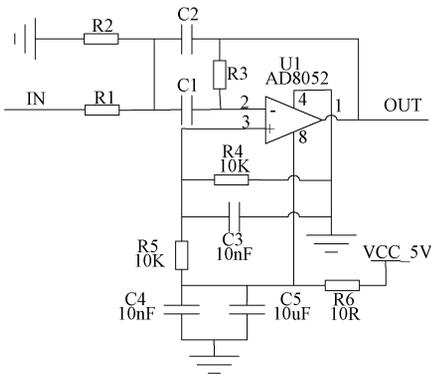


图 7 MFB 带通滤波电路

Fig. 7 MFB bandpass filtering circuit

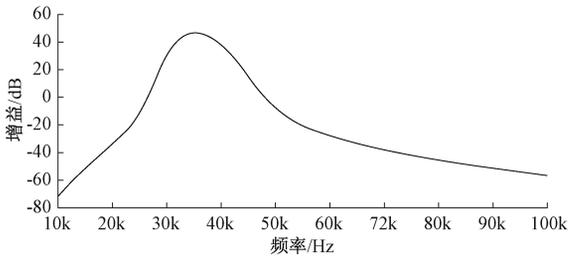


图 8 带通滤波电路幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curve of bandpass filter circuit

在信号经过带通滤波器清除噪声并强化目标频率后,所得信号被传输至电压比较器进行阈值判定。这一环节关键在于提升系统对信标信号的识别精确性,确保只有当信号超过既定阈值时才被认定为有效信号,从而减少误触发的可能性。

随后,信号进入由 NE555 芯片构成的单稳态触发电路。该电路的设计旨在确保即使超声波信标在一个周期内连续发出 7 个脉冲,系统也只会保存一次触发事件。在没有接收到下降沿触发信号时,单稳态电路保持稳定状态,输出高电平。一旦检测到下降沿触发信号,即输入信号从高电平跳转至低电平时,电路将触发并输出一个持续

1 s 的低电平脉冲。这样的设计允许系统有足够的时间来响应超声波信标的信号,同时防止由于信号中的多个紧密相邻的脉冲而导致的多次触发,提高了系统响应的准确性和稳定性。

3 系统软件设计

本设计的软件部分主要集中于超声波信标的激励信号的生成与发射、超声波接收器的触发采集以及定位算法的实施。

超声波接收器主要功能为记录超声波触发时间,并将触发时间保存在 Flash,以供后续上位机读取,具体实现流程如图 9 所示。

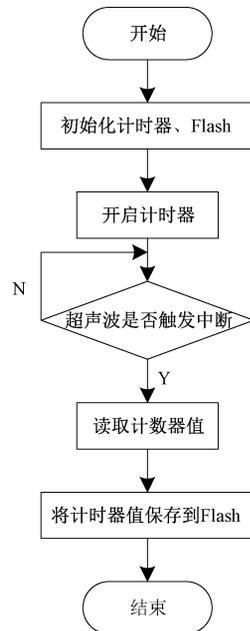


图 9 超声波接收器流程图

Fig. 9 Ultrasonic receiver flow diagram

超声波信标激励信号主要是由两个定时器产生,为了提高超声波信标的续航能力,超声波信标每 10 s 产生 7 个 35 kHz 的超声波脉冲,具体实现流程如图 10 所示。

定位算法的软件设计采用了 VLBL 定位技术,该技术可以使用单个移动的超声波接收传感器来模拟具有较长基线间隔的多个静态接收器所能达到的定位效果^[12-14]。在整个定位系统中,UUV 需要在多个不同的位置采集超声波信标触发时的时间信息,通过这些在不同空间位置记录的时间信息,可以建立数学模型并列出具体的数学表达式(6)。在式(6)中, r_i 如式(7)表示 UUV 观测点到信标的距离,其中 x_i 、 y_i 和 z_i 分别代表 UUV 在不同观测点的三维坐标; Δt_i 是连续两个采样时刻 t_i 与 t_{i-1} 之间时间差; c 为超声波在水中的传播速度; T 为信标的信标发射超声波信号的周期;基于这些参数,可以通过解析表达式(6),运用适当的数学方法解出信标的三维空间位置坐 x 、 y 和 z 。

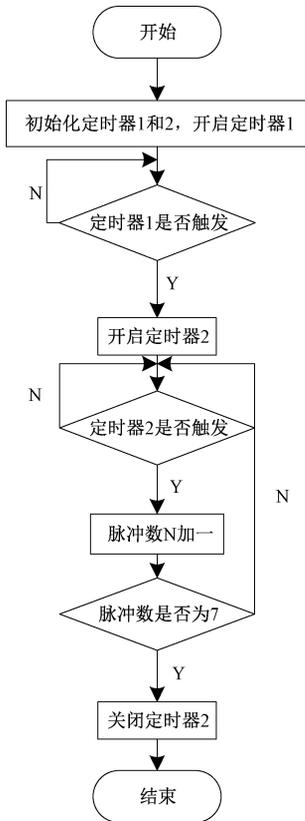


图 10 超声波信标流程图
Fig. 10 Ultrasonic beacon flowchart

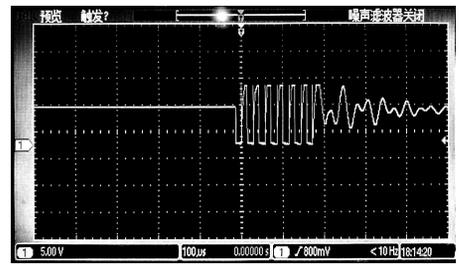


图 11 MOSFET 管 S 级输出信号
Fig. 11 S-class output signal of MOSFET transistor

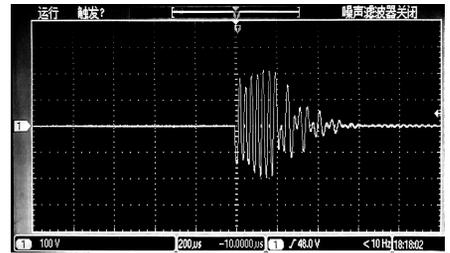


图 12 超声波激励信号
Fig. 12 Ultrasonic excitation signal

检验其在多样温度环境中的持续工作时间。

外部环境使用恒温箱进行模拟测试,将恒温箱分别设置成 0℃、20℃、40℃和 60℃,分别对超声波信标进行持续工作时长测试。测试环境如图 13 所示,最终实验结果如表 2 所示。由表 2 可知,超声波信标部分能够达到预定的 6 h 连续工作标准。



图 13 恒温箱测试环境
Fig. 13 The test environment of the incubator

$$\begin{cases} r_1 - r_0 = c(\Delta t_1 - T) \\ r_2 - r_1 = c(\Delta t_2 - T) \\ r_3 - r_2 = c(\Delta t_3 - T) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_0 = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \\ r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \\ r_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} \end{cases} \quad (7)$$

4 系统测试与分析

4.1 超声波信标激励信号测试

将超声波信标开机,使用示波器检测 MOSFET 管 Q1 源极 (source, S) 电压,如图 11 所示,和变压器 T1 二次侧电压,如图 12 所示。单片机产生的幅值为 3.3 V 频率为 35 kHz 的方波信号经过 MOSFET 管 Q1 后成功驱动了变压器 T1;再经变压器 T1 放大得到超声波激励信号,信号幅值为 400 V,频率 35 kHz,足以驱动超声波换能器。

4.2 超声波信标工作时长测试

为了准确评估超声波信标的工作时长,实施了一项严格的测试方案。在测试的初始阶段,确保信标都充电至满电状态。随后,将超声波信标置于不同环境温度条件下,以

表 2 超声波信标工作时长测试

Table 2 Ultrasonic beacon working hours test

温度/℃	持续工作时长/h
0	10.5
20	13.3
40	12.6
60	11.2

4.3 超声波信号接收测试

为了评估超声波接收装置对水中超声波信标信号的检

测性能,本实验将超声波接收装置与信标共同浸入水下环境中。启动信标后,利用示波器捕捉并分析接收装置收集到的超声波信号波形,从而精确测定其探测能力和响应特性。

如图14所示,示波器检测到的超声波换能器接收的原始信号,其最大峰-峰值仅约100 mV。当信号通过三极管共射放大电路后,如图15所示,峰-峰值增强至约1 V。随后,信号经由MFB带通滤波电路处理,结果如图16所示,其中大多数信号已经被放大至运算放大器的饱和状态。最终,通过比较器与既定阈值的比较分析,得到图17所示的信号。将超声波换能器采集到的原始信号与处理后的最终输出信号进行对比,明显显示出所设计的超声波接收盒对信标发射的超声波信号具有显著的放大效果。

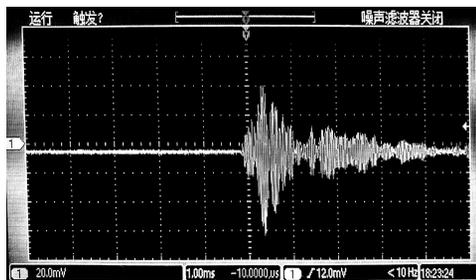


图14 换能器接收的原始信号

Fig. 14 The raw signal received by the transducer

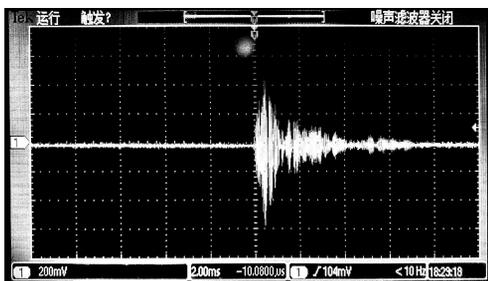


图15 三极管放大后的信号

Fig. 15 The signal amplified by the transistor

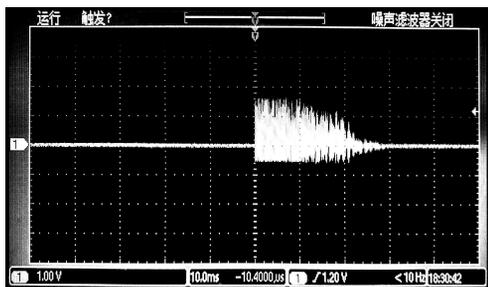


图16 MFB带通滤波后的信号

Fig. 16 MFB bandpass filtered signal

将阈值比较器输出的信号输入NE555单稳态,输出信号如图18所示,产生1s左右的脉冲信号;最后经过限幅电路处理得到单片机可以直接采集的信号。

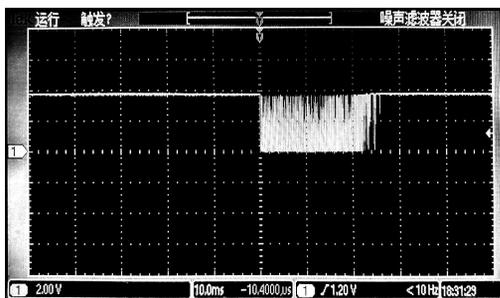


图17 比较器输出信号

Fig. 17 The comparator outputs a signal

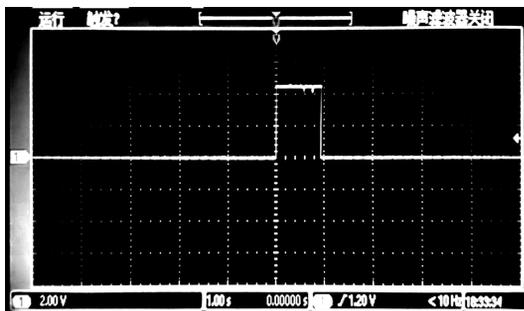


图18 超声波接收实测单稳态信号

Fig. 18 Ultrasonic receiving the measured monostable signal

4.4 超声水下测距试验

为全面评估超声波接收装置与超声波信标在水下环境中的性能表现,策划了超声波水下测距试验。该试验于2024年1月15日,在晴朗的气候条件下,在南京理工大学紫霞湖进行,如图19所示。



图19 超声波水下测距试验环境

Fig. 19 Ultrasonic underwater ranging test environment

将信标和接收器都置于水中,如图20所示,接收器首先在①号位置对超声波信号进行了五次采集;随后,接收器沿预定轨迹依次移动到②号、③号、和④号位置,每个位置仅接收一次由信标发出的超声波信号。采集到4个位置,接收到超声波的时间戳后,使用上位机进行数据读取,得到超声波触发时间戳原始数据如表3所示。由前5组数据计算可得

超声波信标实际的发射周期 T 为 $10^{10} + 120$ ns, 并且已知该条件下的超声波在水下的传播速度 C 为 $1\,262.6$ m/s, 最后根据式(8)得到了如表 4 所示的结果。

$$d = c(t_2 - t_1 - T) \tag{8}$$

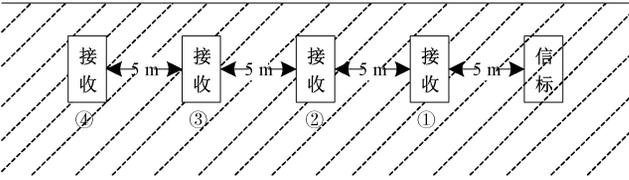


图 20 水下测距试验简图

Fig. 20 Schematic diagram of underwater ranging test

表 3 超声波水下测距测试原始数据

Table 3 Raw data of ultrasonic underwater ranging test

编号	位置	超声波触发时间戳(min:s:ms:ns)
1	1	0:7:648:58
2	1	0:17:648:180
3	1	0:27:648:300
4	1	0:37:648:420
5	1	0:47:648:538
6	2	0:57:652:635
7	3	1:7:656:724
8	4	1:17:660:815

表 4 超声波水下测距测试计算数据

Table 4 Calculation data of ultrasonic underwater ranging test

位置变化过程	时间差/ns	距离/cm	相对误差/%
1~2	3 977	502.136	0.43
2~3	3 969	501.126	0.23
3~4	3 971	501.378	0.28

4.5 超声波水下定位试验

将超声波接收安装在 UUV 上, 超声波接收器持续记录来自信标的信号的时间戳信息。同时, 这些数据与 UUV 自带的惯性导航系统(inertial navigation system, INS)数据进行融合处理。运用式(7)数据处理算法, 最终解算出超声波信标的确切位置。试验条件如图 21 所示。

将信标至于水中, UUV 移动到如图 22 位置①, 打开超声波接收器, 开始记录 UUV 位置和超声波时间戳信息, 控制 UUV 静止 30 s, 然后按照图 22 的轨迹, 在各点采集数据, 最后回到位置①。最后得到原始数据如表 5 所示, 经解算得到如表 6 所示结果。将表 6 的相关参数带入到式(7)和(8), 联立解出信标的坐标为(19.788, -0.015, 5.1479), 与真实值(20, 0, 5)相距 0.259 m 符合设计要求。在对比实验中, 本研究采用的 VLBL 定位系统与文献[15]中的 SBL 定位系统进行的水池定点测试。如表 7 所示, 文献[15]中的测试结果显示定位点与真实值之间的斜距误差为



图 21 超声波水下定位试验环境

Fig. 21 Ultrasonic underwater positioning test environment

3.13%, 而本实验系统的定位误差仅为 1.26%。此外, 文献[15]仅在二维系统中进行了定位测试, 本研究则在更复杂三维系统中进行定位。试验证明了本研究 VLBL 定位系统在水下精确定位方面的优越性能。

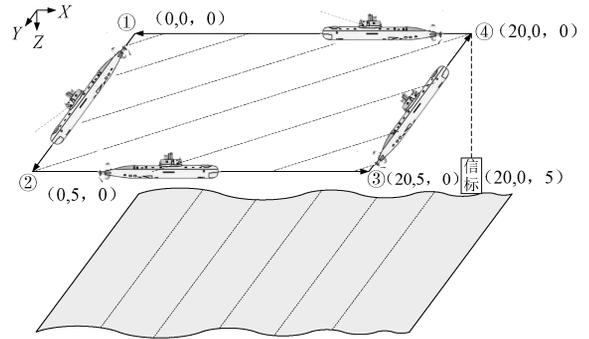


图 22 水下定位试验简图

Fig. 22 Schematic diagram of underwater positioning test

表 5 超声波水下定位测试原始数据

Table 5 Raw data of ultrasonic underwater positioning test

编号	位置坐标/m	超声波触发时间戳(min:s:ms:ns)
1	(0, 0, 0)	0:17:646:565
2	(0, 0, 0)	0:27:645:314
3	(0, 5, 0)	0:47:643:292
4	(20, 5, 0)	1:47:624:806
5	(20, 0, 0)	2:17:619:439

表 6 超声波水下定位测试计算数据

Table 6 Calculation data of ultrasonic underwater positioning test

位置变化过程	时间差/ns	距离差/cm	真实距离差/cm	相对误差/%
1~2	480	60.61	59.7	1.52
2~3	-10 980	-1 386.30	-1 414.2	1.97
3~4	-1 614	-203.78	-207.1	1.80

表7 定位实验数据对比

Table 7 Comparison of positioning experiment data

	VLBL	SBL
信标位置坐标/m	(20,0,5)	(1.8,22)
测量信标坐标/m	(19.79,-0.02,5.15)	(1.68,21.32)
斜距误差	1.26%	3.13%

5 结 论

本文提出了一种创新的单平台水下定位系统设计,该系统利用与实验用弹一同入水的信标部分来辅助定位。通过UUV搭载的超声波接收器采集信标的超声波信号,并与UUV自载的位置信息进行数据融合处理,计算出实验用弹的大致位置。经过一系列严格的水下测距试验,证明了系统与传统LBL定位系统相比,提升了系统的便携性,以及显著减少了系统因布放、校准和回收的耗时;与传统SBL定位系统相比,减少了传感器的安装数量,同时提高了定位精度。系统的定位能力得到了成功验证,并证明其可以满足实际应用场景的需求。该系统以其操作简便、定位精度高的优势,显著提高了水下未爆弹的探测效率及作业安全性,同时也为其他海洋工程作业、水下考古以及海底资源勘探提供了一种新的高精度定位手段。

参考文献

- 宁津生,吴永亭,孙大军.长基线声学定位系统发展现状及其应用[J].海洋测绘,2014,34(1):72-75.
NING J X, WU Y T, SUN D J. The development of LBL acoustic positioning system and its application [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(1): 72-75.
- 张宇,季晓燕,张丹.短基线水下定位原理及误差分析[J].舰船电子工程,2017,37(7):41-45.
ZHANG Y, JI X Y, ZHANG D. Short baseline underwater positioning principle and error analysis[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(7): 41-45.
- 张同伟,王向鑫,唐嘉陵,等.深海超短基线定位系统现状及展望[J].舰船电子工程,2018,38(10):1-6.
ZHANG T W, WANG X X, TANG J L, et al. Technical status and development trend of long range USBL[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(10): 1-6.
- 王燕,张新宇,孙思博,等.水下单信标导航算法研究及置信区间分析[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(1):119-129.
WANG Y, ZHANG X Y, SUN S B, et al. Underwater single-beacon navigation algorithms and confidence interval analysis [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(1): 119-129.
- 朱友康.基于声速改正的水下差分定位系统研究[D].青岛:山东科技大学,2020.
ZHU Y K. Research on underwater differential positioning system based on sound velocity correction[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- 杨泽宇.协同多维信息的无源定位技术研究[D].郑州:战略支援部队信息工程大学,2020.

- YANG Z Y. Collaborative passive localization based on multidimensional information[D]. Zhengzhou: Strategic Support Forces Information Engineering University, 2020.
- 于燕婷,许江宁,林恩凡,等.单信标水声定位技术研究现状及应用展望[J].导航定位学报,2022,10(2):13-20.
YU Y T, XU J N, LIN E F, et al. Research progress and prospect of acoustic positioning technology based on single beacon [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(2): 13-20.
- 付玉旋.基于STM32F7的水下信标设计[D].厦门:厦门大学,2024.
FU Y X. The design of underwater beacon based on STM32F7[D]. Xiamen: Xiamen University, 2024.
- 许文俊,瞿少成,秦天柱,等.一种基于STM32的超声波发射与接收电路的设计与实现[J].电子测量技术,2018,41(17):90-94.
XU W J, QU S H C, QIN T ZH, et al. Design and implementation of ultrasonic transmitting and receiving circuit based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(17): 90-94.
- 张志杨,贾云飞,张佳庆.可水声定位的水下弹载测试系统设计[J].测试技术学报,2023,37(5):413-419.
ZHANG ZH Y, JIA Y F, ZHANG J Q. Design of underwater missile-borne test system with underwater acoustic positioning [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(5): 413-419.
- 潘笑,王平,高峰,等.一种水声通信定位一体化潜标系统[J].舰船科学技术,2021,43(S1):72-75.
PAN X, WANG P, GAO F, et al. The design of a submersible buoy system integrated with communication and navigation [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(S1): 72-75.
- 裴玉.单平台观测水下目标定位算法设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
PEI Y. Design and implementation of underwater target positioning algorithms based on single platform observation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- 赵惠锋.单信标辅助的水下定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2022.
ZHAO H F. Research on single beacon aided underwater localization technique [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022.
- ZHANG J, HAN Y, ZHENG C. Underwater target localization using long baseline positioning system [J]. Applied Acoustics, 2016, 111: 129-134.
- 石腾.水下机器人短基线定位系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
SHI T. Design and implementation of short baseline positioning system for underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

作者简介

贾云飞(通信作者),博士,副研究员,主要研究方向为嵌入式系统的飞行器控制系统研究,基于嵌入式系统的弹载存储测试系统研究。
E-mail:yunfei_jia@163.com

胡武清,硕士研究生,主要研究方向为武器装备测试及其测试仪器。
E-mail:1786472307@qq.com

杨玉全,硕士研究生,主要研究方向为超声波定位算法。
E-mail:2046248904@qq.com

肖凯文,硕士研究生,主要研究方向为信号采集与处理。
E-mail:kevin@njjust.edu.cn