

基于短基线的 ROV 实时高精度定位系统^①李 壮^{②*} 乔 钢^{③*} 孙宗鑫^{*}

(* 哈尔滨工程大学水声技术国防重点实验室 哈尔滨 150001)

(** 中国舰船研究院 北京 100192)

摘 要 为了满足水下探测机器人(ROV)的工作需要,实现其在堤坝、码头及港口等复杂环境的高精度定位,设计并且实现了一种基于短基线的高精度 ROV 定位系统。该定位系统采用高频宽带调频信号和先进的自动校阵技术来提高定位精度,运用高速处理芯片实时显示定位信息。水池及外场海试等工程实验表明,该系统具有精度高和适应性强的特点,证明该系统技术路线可行且性能可靠。

关键词 水下探测机器人(ROV),短基线,水下定位,实时,高精度,宽带信号

0 引言

水下探测机器人(ROV)主要工作在堤坝、码头港口等区域,其作用是利用搭载仪器对水下环境进行探测,进而确定堤坝隐患及码头港口水下施工的位置^[1,2]。为了确定其在水下的精确位置,须对其进行导航定位。由于无线电波在水下传播会衰减很快,基于声学的导航定位技术是水下常用的技术手段,国内外对于水声定位技术进行了大量的研究^[3-5]。水声定位技术大部分都是基于长基线和超短基线的技术,长基线定位技术布放及回收困难,并且价格过于昂贵,而超短基线定位系统定位精度不能保证,并且不适宜工作在堤坝、码头等领域。本研究旨在研制一种基于短基线的 ROV 定位系统,该系统能针对传统短基线定位系统基阵布防困难、定位精度低、数据更新率慢等缺点,为满足 ROV 工作的需要,实现对其在堤坝、码头港口等环境中的高精度定位^[6,7]。现已设计和实现了一种宽带、基阵自动校准的短基线定位系统,该系统采用先进的数字信号处理硬件设计及软件集成,并将其用到工程实践中。水池试验及外场海试结果证明,该系统软硬件设计合理,工作稳定可靠,可以基本完成对水下探测机器人的实时、高精度定位任务。

1 短基线定位原理

短基线定位系统通过接收来自应答器或者信标发出的信号测出各阵元与应答器或者信标的距离,通过交汇解算最终获得相对于基阵的三维位置坐标。定位几何原理如图 1 所示。

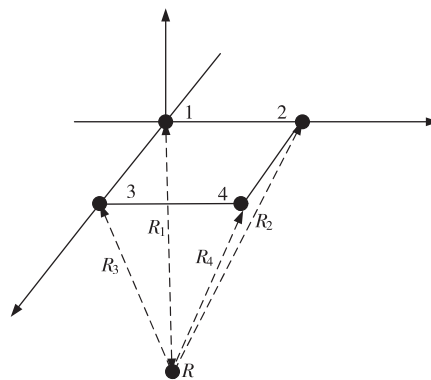


图 1 短基线定位原理图

目标位于 R 位置,短基线系统采用非同步的应答式球面定位数学模型,其表达式为

$$R_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$R_i = (c(t - t_i)/2) - t_{\Delta} \quad (1)$$

① 国防基础科研(B2420710007)和 863 计划(2009AA093601-2)资助项目。

② 男,1983 年生,博士;研究方向:水声定位;E-mail:hljstrong@163.com

③ 通信作者,E-mail:qiaogang@hrbeu.edu.cn

(收稿日期:2013-01-04)

式中 c 表示信号由应答器到短基线阵元的平均声速, t 表示短基线发射机发送询问信号的时刻, t_i 分别为短基线各阵元接收应答返回的时刻, t_{Δ} 表示短基线系统内的延时时间, R_i 表示各短基线阵元距离应答器的斜距, (x_i, y_i, z_i) 为短基线阵第 i 阵元的位置坐标, (x, y, z) 为水下探测机器人搭载的应答器坐标。联立方程(1)得方程组:

$$\begin{aligned} ((c(t - t_i)/2) - t_{\Delta})^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \\ &+ (z_i - z)^2 \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (2)$$

该方程组有 4 个未知数, 因此利用 4 个方程可以得到位置 (x, y, z) 和时延 t_{Δ} 。

2 短基线定位系统实时性的实现

该定位系统既可以工作在水面船上也可以工作于岸边, 具有机动布放、灵活安装的特点。

根据系统实时性、高精度的考虑, 将系统分为水下和水上两单元, 采用先进的数字信号处理 (DSP) 芯片硬件设计及软件流程, 以满足系统实时性的实现。图 2 所示为水下探测机器人短基线定位系统简图。该系统采用宽带调频信号提高定位系统精度, 询问信号采用正线性调频信号, 应答信号采用负线性调频信号。

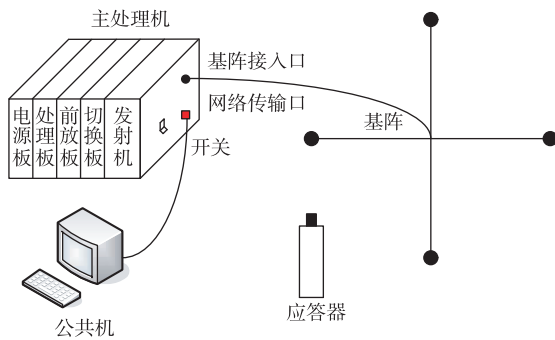


图 2 水下探测机器人短基线定位系统简图

2.1 定位系统硬件的设计

水上部分主要由主处理机、公共机和短基线基阵构成, 为了满足系统实时性的要求, 主处理机采用 TI 公司的最新型的数字处理器 TMS320C6455 作为主处理器^[8], 并且搭载 Xilinx 公司的 Virtex-4 系列 FPGA 协同控制^[9], 外部联有网络传输、串行传输等通信方式。其主要功能是通过收发合置模块接收来自基阵的 4 路模拟信号, 并且通过前端放大滤波后

对其数字采样, 进入 DSP 实时数字相关处理确定时延时刻, 得到应答器到 4 个基阵之间的距离, 通过 DSP 中的网络以 TCP-IP 协议方式传输给上位公共 PC 机, 同时通过 I²C 端口控制前放电路的放大倍数, 前放电路放大量从 2 到 1024 倍。最后经过公共机内部算法交汇解算出应答器位置坐标。该系统采用先进的数字处理芯片旨在能够实时处理水下应答数据, 实时遵照水上主机的命令, 改变发射信号状态, 确保处理后的数据能够快速完整地传输到水上主机, 其结构如图 3 所示。为了不丢失数据, 更精确地检测到返回信号, 需要较高的采样率, 本系统选择一款 18 位、1.25M 采样率、差分输入的数模转换器的 AD7643 模数转换器来完成高采样率的数据采集。

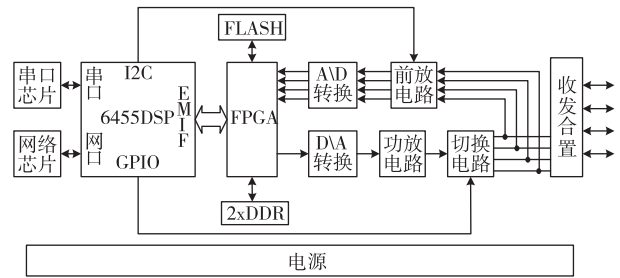


图 3 水上系统结构图

水下部分由应答器构成, 其主要功能是接收上位机发出的询问信号, 发回另一与接收频率不同的回答信号, 由于水下应答器需要长期工作于水下, 靠电池供电, 其回收和布放难度也很大, 故在选择系统主处理器时还必须考虑其功率损耗问题。为了达到高处理速度和低功耗的目的, 本系统采用 TI 公司的超低功耗的 TMS320C5509A DSP 芯片作为主处理器^[10]。利用复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 的数字逻辑处理功能配合 DSP 实现系统的时序逻辑, 其结构如图 4 所示。

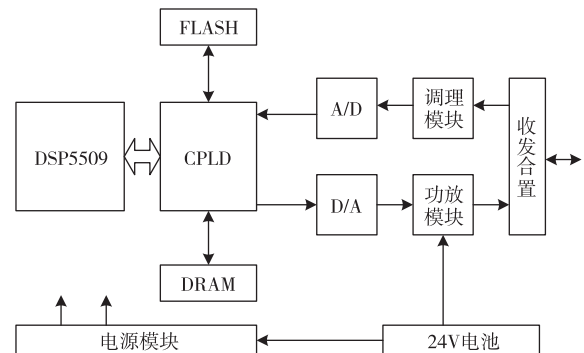


图 4 水下系统结构图

2.2 定位系统软件实现

水上部分的信号处理软件部分是基于 DSP6455 板实现的,整个信号处理软件实现了信号发射和接收的控制,信号接收后的一系列处理以及最终的数据传输等功能。信号处理软件工作的总流程如图 5 所示。可以看出,信号处理流程中所选择的工作模式的不同对应的信号处理的方法也不同,系统初始化之后便是等待模式的选择,一旦上位机传递了模式选择的命令,信号处理系统即按照图中所示的逻辑依次运行。从图上显示的流程可以看出,系统如要工作在定位模式下就必须先要进入校阵模式,这是整个系统正常工作的前提。当校阵工作完成后,系统才会执行其他模式的运行指令,按照指令选择不同的工作方式进而完成信号的接收与处理。

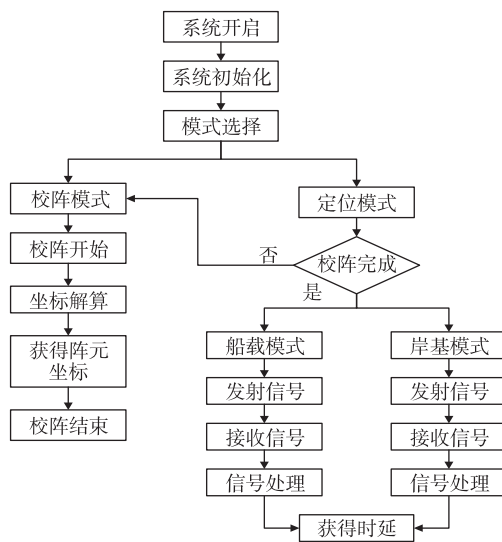


图 5 水上信号处理软件流程图

水下部分的信号处理软件部分是基于 DSP5509 板实现的,水下应答器的软件功能主要是利用时间窗来接收短基线阵列发出的询问信号,对信号放大滤波后与应答器存入的已知信号做相关处理,通过门限检测,阈值判断是否是询问信号,如果不是相应信号则继续采集数据,如果是已知询问信号则立刻发出应答信号。其软件主要流程如图 6 所示。

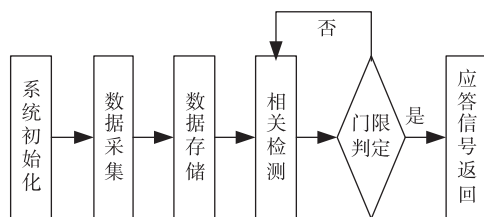


图 6 应答器软件流程示意图

3 短基线定位系统高精度定位技术

3.1 高频宽带信号时延估计技术

目前声学定位采用的主要两种信号形式为窄带信号和宽带信号。窄带信号多采用 CW 信号,宽带信号多采用编码信号和调频信号。表 1 是三种典型信号的模糊度函数及其检测性能的比较:(1)正弦填充矩形包络(CW)脉冲;(2)线性调频(LFM)信号;(3)伪随机编码脉冲。

表 1 三种信号模糊度函数及其检测性能的比较

	CW 脉冲	LFM 脉冲	伪随机脉冲
模糊度函数主峰	较平坦	较薄的刀片形状	很尖锐
模糊度函数裙边	最低	较低	很高,且有四条很高的“残脊”
测量和分辨能力	不理想	中等	好
抗多途干扰能力	好	不会形成明显的伪峰	易形成一系列与主峰相比拟的伪峰
综合性能比较	由于水声定位严重的多途干扰影响,伪随机脉冲在理想情况下有优良的分辨能力,但在非理想情况下极不稳定,CW 脉冲的检测能力又太低,所以 LFM 信号以其折衷的性能获得最优检测性能,是一种合适的主动声纳定位信号		

本声纳系统信号的频率与带宽的变化会产生以下影响:

(1)提高信号的频率可以降低基阵的尺寸,这对水下载体来说尤为重要。

(2)中心频率提高,可以获得更大的系统带宽,信号带宽 B 的增加,将增加声纳系统的处理增益,提高输出信噪比。

(3)在 500Hz ~ 50kHz 的频段内,环境噪声的谱级按每倍频程 5 ~ 6dB 的规律衰减,因此在一定的范围内,提高频率可降低环境噪声的干扰。

(4)带宽 B 的增加使得信道频散效应的影响加剧,并且有可能破坏窄带条件 ($B/f_0 < 10\% \sim 30\%$)。

(5)带宽 B 的增加会使设备复杂性增加。

综合以上的各种因素,当工作距离 r_m 为 1km 时计算最佳工作频率 f_{opt} 为 45kHz。根据经验公式 $f_{opt} = (200/r_m)^{2/3}$ 。从减少系统复杂度和提高系统运

行效率出发,可考虑带宽选为 20kHz,信号的频率范围取 35 ~ 55kHz。

采用长脉冲可以提高信号的能量和提高处理增益,但脉冲的长度受其他因素的限制:

- (1) T 的增大将加大信号检测的盲区范围;
- (2) 混响干扰的强度随 T 的增大而增大;
- (3) T 的增大将使信道的起伏影响加剧;
- (4) T 的增大将增加设备运算量。

根据计算量及处理时间考虑,应答信号脉冲长度选择为 8ms。发射信号的最高频率为 50kHz,采样频率为 250kHz,信号采用滑动相关分段处理,要求在一段处理时间窗(8ms)内完成 2048 点的相关处理,并且四路同步处理,这样的运算量对 C6455 一级的芯片来说足可以胜任。询问信号长度为 2ms,同样满足 5509 处理芯片要求。

通过对短基线定位数据更新率、定位精度及作用距离等方面进行综合考虑,得到短基线定位系统的技术指标如表 2 所示。

表 2 短基线定位系统技术指标

系统参数	技术指标	系统参数	技术指标
询问信号	正调频信号	应答信号	负调频信号
信号带宽	20kHz	信号带宽	20kHz
频带范围	35 ~ 55kHz	频带范围	55 ~ 35kHz
询问信号脉宽	2ms	应答信号脉宽	8ms
作用距离	1000m	数据更新率	2 次/s
上位机采样率	250kHz	应答器采用率	250kHz

3.2 基阵自动校阵技术

传统短基线定位系统基阵大都采用刚性固定,基阵笨重并且布放很不方便。本系统采用灵活的布阵方式,基阵可根据情况选择柔性连接或者刚性连接。当工作在岸边或者码头附近时,可以利用绳子等柔性连接工具,将基阵用绳子栓牢放入水中,这样不仅可以简化阵型,使得系统运输、布放都非常方便。但是此时由于简化了布防方式,基阵之间的坐标必须经过基阵内部的校阵功能得到,其具体实现方式为将基阵吊放入水中,通过上位机的切换电路控制轮流用各阵元发射信号,其余阵接收,测出收发时间进而测出距离。设各阵元在基线坐标系的位置为 (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 它们之间的距离为 r_{ij} , 则有

$$r_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N, i \neq j \quad (3)$$

其中, N 为阵元数,共有 $M = N(N - 1)/2$ 个距离,可列出 M 个方程。每个阵元有 3 个未知数,总未知数个数为 $3N$ 。方程数大于未知数个数时,方程可解,即

$$N(N - 1)/2 \geq 3N \quad (4)$$

解之得 $N \geq 7$ 。

当获得距离信息 r_{ij} 后, z_i 一般是已知或者等于 0,因而减少 N 个未知数。然后以阵元 1 为原点, x 轴为阵元 1 和阵元 2 在 xoy 平面投影的连线,此时,阵元 1 和 2 的 y 坐标为 0,又减少 2 个未知数。结果总的未知数减为 $2N - 2$ 。经过这样处理后,方程数总是大于未知数个数。

通过上述分析可知基阵校准算法是一个求解非线性方程组的问题。通过建立位置之间的距离方程,然后转化为如何求解函数方程的问题,并且该算法可以根据定位结果实时更新,当定位结果偏差较大时可以重新自动唤起校阵算法重新校准。

4 系统实验结果

4.1 水池实验精度测试

2012 年 5 月 14 日在水声技术国防科技重点实验室进行了探测机器人水声定位系统精度测试,室内温度为 18℃,信道水池长 45m,宽 6m,水深 4m,实验设备包括钢卷尺、绳子、机器人、基阵、公共机等。定位基阵垂直入水保证基阵平面正对机器人并且与水面垂直,改变基阵坐标系 X 方向与 Z 方向使其与水池相对应,此时水池长度方向为坐标系 Y 方向,水池宽度方向为坐标系 X 方向,水池深度为坐标系 Z 方向。机器人固定在行车上沉入水底。连续在某点测试 800—1000 次,从统计分析理论出发统计三组数据,评价定位系统性能的主要因素为定位误差,定位误差是指测量值与真值之差异,按照下式计算:

$$\text{误差} = \frac{\text{测量值} - \text{均值}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (5)$$

由于仪器、实验条件、环境等因素的限制,测量不可能无限精确,物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会存在着一定的差异,这种差异就是测量误差。图 7 及图 8 分别表示水平定位方向散点图和深度方向散点图,图中的实线分别表示定位误差为 0.5% 时的分布界限。根据统计学,置信度是指总体参数值落在样本统计值某一区内的概率,置信度越大,说明落在该区间内的测量值概率越高,与此

同时其定位精度也越高。我们统计三组测量结果落在定位误差为 0.5% 内的概率分布,统计结果如表 3 所示。从表中统计可看出,定位测量值散点分布在

0.5% 的误差范围内的概率分别为 99%、98%、80%,三次测量结果全部或者大部分测量点都优于预设值(定位误差 0.5%)。

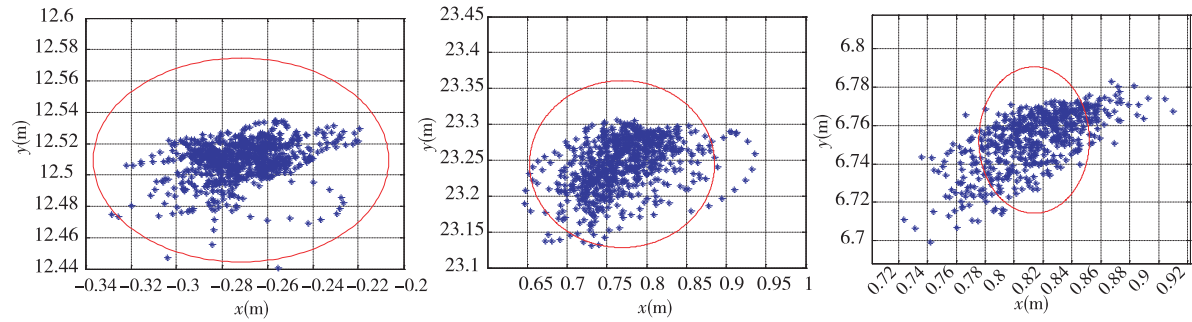


图 7 水平方向散点图

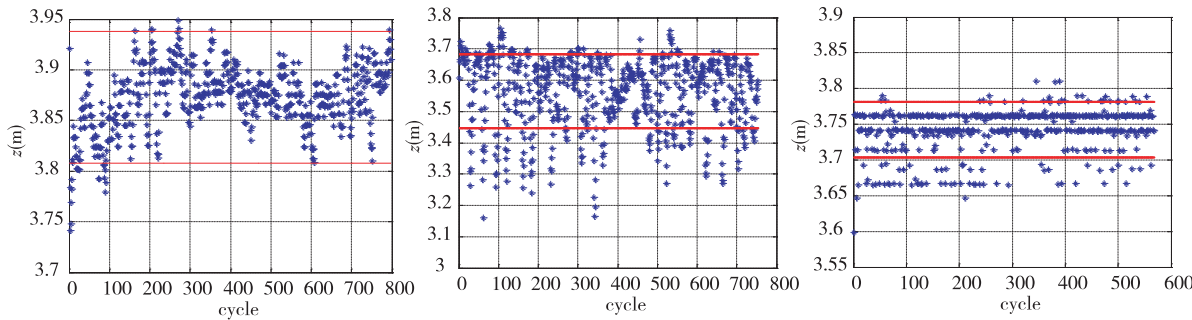


图 8 深度方向散点图

表 3 数据统计表格

坐标 次数	X 轴实 际坐标	Y 轴实 际坐标	Z 轴实 际坐标	0.5% 误差值	测量值 分布情况	结果
第一次	-0.272	12.513	3.861	0.065	99% 圈内	完全 满足
第二次	0.769	23.244	3.564	0.117	98% 圈内	满足 要求
第三次	0.813	6.7524	3.565	0.038	80% 圈内	基本 满足

从表 3 中可以得出结论,测试结果随着距离的增加而误差变大,第三次测试结果相对前两次差的原因是因为位置的变化使得信道环境的不同,但是三次测试结果基本满足系统要求精度在 0.5% 内,测试结果稳定可靠。

4.2 外场海试

2012 年 7 月 25 日在大连旅顺某海域进行水下探测机器人总体性能系统实验,根据实验要求,在水下探测机器人探测过程中定位系统要实时跟踪并且相对准确的反映探测机器人的相对位置,如图 9 所

示,水下探测机器人被放入水中,通过机器人前段的前置声纳和摄像头对该海域水下施工位置进行探测,水声定位系统的任务就是反映探测机器人的位置,实时跟踪机器人以免丢失。由于海面风浪相对较大,机器人不能平稳推进,并且机器人后面的绳缆对机器人的运动产生影响,因此其前进过程中反映的定位轨迹如图 10 所示,从图中分析可以得到定位系统可以实时跟踪机器人并且反映其相对位置关系,并且作用距离及定位精度基本达到系统要求,定位系统工作性能良好。

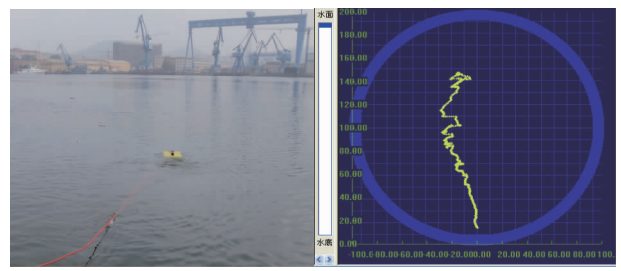


图 9 探测机器人入水状况 图 10 定位轨迹显示

5 结 论

采用高频宽带、自动校阵等先进技术的高精度、实时定位水下探测机器人的水声短基线定位系统,其硬件设计和软件集成都是一个新的挑战。本研究结合工程应用完成了定位系统的技术指标,满足了系统实时高精度的需求。水池实验及外场海试实验证明该系统软硬件设计合理,工作稳定可靠,可以基本完成水下探测机器人实时高精度定位的任务,且该定位系统结构简便,布放方便等优点还可以应用在其他领域,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 王继胜,郭元曦,乔钢. 用于堤坝检测的剖面声纳系统实验研究. 海军工程大学学报,2007,19(4):33-37
- [2] 徐玉如,李彭超. 水下机器人发展趋势. 自然杂志,2011,33:(03):125-133
- [3] 李俊,徐德民,宋保维. 自主式水下潜器导航技术发展现状与展望. 中国造船,2004,45(3):70-77
- [4] 李想,孙大军,张殿伦. 一种基于超短基线的声信标定位方法. 高技术通讯,2009,15(5):533-537
- [5] 张光谱,梁国龙,王燕. 分布式水下导航、定位、通信一体化系统设计. 兵工学报,2007,12:1455-1458
- [6] Milne P H. Underwater Acoustic Positioning Systems, 1983, Chapter 4:135-138
- [7] 田坦. 水下定位与导航技术. 北京:国防工业出版社,2007,9:14-26
- [8] Fixed-Point Digital Signal Processor. TMS320C6455. TI Inc,2007
- [9] Xilinx Inc. Virtex-4 Platform FPGA Handbook. 2007
- [10] Texas Instruments Incorporated. TMS320VC5509A Fixed-Point Digital Signal Processor Data Manual. TI Inc,2008.
- [11] 田坦. 声呐技术. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009:33-36,204-206

A Short baseline-based real-time, high-precision ROV position System

Li Zhuang^{* **}, Qiao Gang^{*}, Sun Zongxin^{*}

(^{*} National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(^{**} China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192)

Abstract

A short baseline positioning system was designed and implemented for underwater remotely operated vehicles (ROV) according to their working requirements in dam and dock applications. The high-frequency broadband positioning and automatic calibration technology were applied to the system to improve the positioning precision. A high-speed digital signal processing chip was used to real-time display the positioning information. The pool experiment and sea test verified the system's high accuracy and good adaptability, and proved that it is feasible in technique and reliable in performance.

Key: underwater remotely operated vehicles(ROV), short baseline, underwater positioning, real-time, high-precision, broadband signals