

# 水下目标定位标校系统研究

陈 凯<sup>1,2</sup>, 赵安邦<sup>1</sup>, 王旭升<sup>2</sup>, 孟 华<sup>2</sup>, 张 仪<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022)

**摘要:** 为了给出水下目标的精确大地坐标, 设计了以浮筒作为载体的水下目标定位标校系统, 具有灵活方便的优点。研究了影响系统定位误差的相关因素, 并分析了系统综合定位精度, 编写了标校系统显控软件, 将差分 GPS 数据和方位姿态数据进行数据处理, 解算出水下基准位置坐标。对标校系统进行了陆上验证试验, 结果表明作为模拟目标的水下位置基准定位误差小于 1m, 可为水声定位系统提供海上定位校验的位置标准。

**关键词:** 水声定位; GPS; 标校

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0403-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.006

## Calibration of underwater acoustic target positioning system

CHEN Kai<sup>1,2</sup>, ZHAO An-bang<sup>1</sup>, WANG Xu-sheng<sup>2</sup>, MENG Hua<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** Underwater acoustic target positioning system which uses a floating camel as carrier is designed to give out accurate geodetic coordinates. The factors influencing positioning precision and the integrated positioning accuracy are studied. The display and control software written for the system receives and processes the GPS and attitude data to calculate the geodetic coordinates of the underwater reference position. The land-trial results show that the positioning error is less than 1 meter and the calibration system can provide the reference position, which is regarded as a simulated target for the underwater acoustic positioning system on the sea.

**Key words:** acoustic positioning; GPS; calibration

## 0 引言

在海洋工程、大洋调查和海军技术领域, 广泛使用各种水声定位跟踪系统来确定水下目标的位置和运动轨迹<sup>[1]</sup>。我国水声定位跟踪技术研究起步较晚, 现在也只有少数机构在进行相关领域的研究, 与国外的先进技术相比还有一定的差距, 但进步很快<sup>[2]</sup>。哈尔滨工程大学已研制出三种超短基线定位系统: 深水重潜装潜水员超短基线定位系统; “探索者”号水下机器人超短基线定位系统和灭雷具配套水声跟踪定位装置<sup>[3]</sup>。2006 年还研制成功了 LBLUNS 系统, 该系统属于便携式长基线系统, 定位精度可达 10m。水声定位跟踪系统的研制方特别是接收方需要对系统的定位精度进行校验, 以便标

校提高系统精度或对系统进行验收。本文以水下目标定位标校系统的研制为目标, 对标校系统的设计、定位精度和相关算法进行研究, 最后给出了陆上验证试验结果。

## 1 标校系统模型的建立

水下目标定位标校系统的关键是把模拟目标声源的换能器位置(水下位置基准, 或称水下基准)进行精确测定和校准<sup>[4]</sup>。本文采用浮筒作为系统的载体平台, 相比于船载式平台, 浮筒具有更大的灵活性。如图 1 所示, 浮筒底连接可变量刚性圆柱杆, 杆上安装可发出模拟目标声信号的换能器, 模拟目标的深度信息由深度传感器测得, 也可由系统解算出。浮筒顶盖上面连接另一根可变量刚性圆柱杆, 杆顶端安装 GPS 天线用以进行精确定位。浮筒里面安装方位姿态仪用来测量平台的航向角、纵倾角和横摇角, 浮筒上下两圆柱杆在同一垂直线上, 且该线纵穿方位姿态仪的测量中心。方位姿态仪所在的水平面与该线垂直, 但安装的偏差会给测量结果带来误差, 这在后文要详细探讨。实际工作时,

收稿日期: 2010-09-03; 修回日期: 2010-12-31

基金项目: 重点实验室基金(9140C2001010801)、国家自然科学基金(60802060)和哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUFT07072)

作者简介: 陈凯(1984—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 陈凯, E-mail: chenkaifeu@sina.com

利用方位姿态仪测量的平台方位姿态数据和 GPS 接收机给出的天线参考中心点的坐标数据, 通过相关算法解算出水声换能器的大地坐标, 即可为水声定位系统提供目标声源的准确位置。

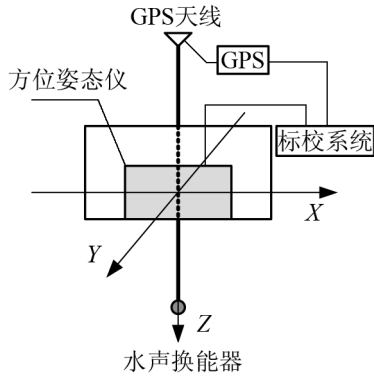


图1 系统标校平台示意图  
Fig.1 Sketch map of calibration system

## 2 系统误差分析

影响标校系统定位精度的因素有水下圆柱杆的挠曲形变、方位姿态仪测向误差、纵倾横摇角测量误差以及 GPS 定位误差等, 前两项误差很小, 对系统误差的影响可以忽略<sup>[5]</sup>, 这里不再给出具体论述, 下面主要分析纵横摇角测量误差, 然后给出组合定位误差。

### 2.1 纵横摇角测量误差

纵倾角和横摇角可以通过方位姿态仪测得, 但由于方位姿态仪本身存在测量误差, 从而给水下位置基准测量带来误差。一般船体姿态角的定义如下: 设纵倾角为  $\delta$ , 船艏向上为正, 横摇角为  $\eta$ , 右舷向下为正, 如图 2 所示。

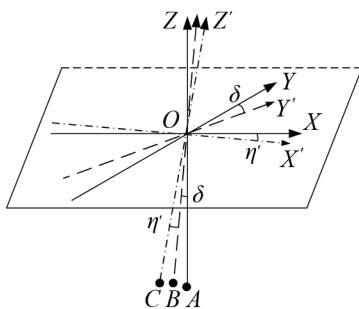


图2 姿态测量误差  
Fig.2 Measurement error of pose

以水下基准在水平面的垂点为原点  $O$ , 船艏指向  $Y$  轴正方向, 船右舷向  $X$  轴正方向, 建立坐标系, 由  $A$  点至  $C$  点可各绕两个轴转动。第一个转动以  $X$  轴为转动轴, 旋转角为  $\delta$ , 第二转动以  $Y'$  轴为转动轴, 旋转角为  $\eta'$ 。当纵倾横摇角的角度很小时,

$\eta'$  可直接取  $\eta$ , 则坐标  $A(x, y, z)$  与  $C(x', y', z')$  有下面的关系式:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

设纵倾测量误差角为  $\Delta\delta$ , 横摇测量误差角为  $\Delta\eta$ , 此时模拟目标声源中心位置的坐标  $C(x', y', z')$  变为  $C'(x'', y'', z'')$ , 将式(1)中的  $\delta$  和  $\eta$  分别换为  $\delta + \Delta\delta$  和  $\eta + \Delta\eta$  即是  $C'$  的坐标。

假设模拟目标水下位置基准到 GPS 天线中心的垂直距离为 10m, GPS 天线中心与水下位置基准的水平面投影重合, 即  $(x, y, z) = (0, 0, 10)$ , 再假设方位姿态仪的纵倾角和横摇角的最大测量误差为  $\Delta\delta_{\max} = \Delta\eta_{\max} = 0.5^\circ$ , 则可推出:

$$\begin{aligned} |\Delta x| &= |x'' - x'| = 20 \sin 0.25^\circ \cos(\eta + 0.25^\circ) \\ |\Delta y| &= |y'' - y'| = 20 \sin 0.25^\circ \cos 0.25^\circ \cos(\delta + \eta + 0.5^\circ) \\ |\Delta z| &= |z'' - z'| = 20 \sin 0.25^\circ \cos 0.25^\circ \sin(\delta + \eta + 0.5^\circ) \end{aligned}$$

误差半径为:

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = 20 \sin 0.25^\circ \sqrt{\cos^2(\eta + 0.25^\circ) + \cos^2 0.25^\circ} \leq 0.123 \quad (2)$$

由以上计算可知, 如果换能器声中心位置到 GPS 天线中心的垂直距离小于 10m, 纵倾角和横摇角的测量误差为  $0.5^\circ$ , 那么由纵倾和横摇角测量误差带来的系统定位误差将小于 0.123m。

### 2.2 组合定位误差分析

GPS 的性能对定位系统精度有着直接影响。瑞士 LEICA 公司的 1230GPS 接收机采用 VXWorks 操作系统, 它独有的 RTK(实时动态差分)成果可靠度在 30km 内达到 99.99%, 是世界上最高的成果可靠度。RTK 定位精度: 平面最高可达 10mm, 高程可达 20mm。如果标校系统选用徕卡 1230GPS, 即使将其 RTK 最小定位误差(高程)放大 10 倍取 0.2m, 再加上方位姿态仪带来的偏差 0.123 m, 考虑到姿态仪方位角的误差, 将其取为 0.2 m。那么模拟目标水下基准坐标的定位不确定度也不大于 0.4m。上文误差计算时假设方位姿态仪的航向角、纵倾角和横摇角的测量误差都是  $0.5^\circ$ , 而如果选用精度更高的方位姿态仪如英国 TSS 的 MAHRS, 它的航向角动态测量精度为  $0.1^\circ$ , 纵倾横摇角测量精度为  $0.05^\circ$ , 那么标校系统的定位精度将更高。

## 3 标校系统软件设计

本文利用 VC++ 6.0 编写标校系统的显控软件,

将串口接收到的 GPS 定位数据和方位姿态仪测量的平台姿态数据进行实时处理, 解算出模拟目标的水下基准坐标, 实时记录数据并显示 GPS 天线和基准点的轨迹。下面首先分析在得到 GPS 天线中心点的大地坐标后, 如何通过坐标变换解算出水下基准的大地坐标。

### 3.1 水下基准坐标变换

如图 3 所示, 首先测量出换能器声中心与 GPS 天线中心的相对位置。

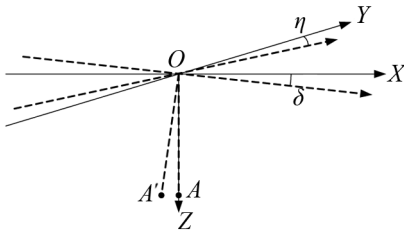


图 3 平台坐标系  
Fig.3 Reference frame of carrier

以 GPS 天线中心为原点  $O$  建立平台坐标系, 方位姿态仪的纵贯线为  $Y$  轴, 机箱顶部箭头指示方向为正, 对于船载平台而言即是船艏方向为正,  $X$  轴与  $Y$  轴垂直, 指向  $Y$  轴右侧,  $Z$  轴向下, 纵倾角为  $\eta$ ,  $Y$  轴正方向向下为正, 横摇角为  $\delta$ ,  $X$  轴正方向向上为正, 平台航向角为  $\varphi$ ,  $\varphi$  用圆周法计数, 正北方向时为零, 向东开始范围为  $0^\circ \sim 359.99^\circ$ 。假设换能器初始位置为  $A$ , 当平台姿态角变化时,  $A$  点位置变为  $A'$ , 则由坐标旋转矩阵计算出  $A'$  坐标:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & \sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

当平台处于竖直水平状态即  $\eta = \delta = 0^\circ$  时, 水下基准点  $A$  在  $Z$  轴上, 如果 GPS 天线中心点到水声换能器声中心点的长度为  $L_0$ , 则  $A$  点坐标为  $(0, 0, L_0)$ 。当平台姿态变化时, 将其代入式(3)即可求出变化后水下基准的坐标。解算出水下基准在平台坐标系中的坐标后, 可得:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $(x_0, y_0, z_0)$  为 GPS 天线中心点的大地坐标,  $(x_1, y_1, z_1)$  即为水下基准的大地坐标。

### 3.2 软件设计结构

软件结构框图如 4 所示:

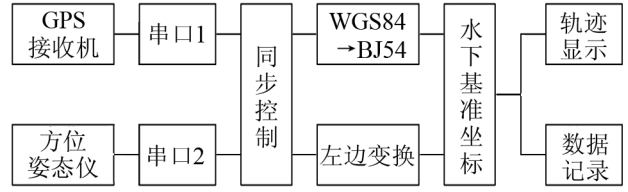


图 4 系统标校平台框图  
Fig.4 Block diagram of calibration system

在接收差分 GPS 和方位姿态仪的数据时, 由于两套设备通过串口传递的数据速率、时钟基准和帧频率不可能完全相同, 在程序设计时需要两部分数据进行同步控制。首先要控制两串口同时开始接收数据, GPS 数据使用国际航海电子联合会(NMEA)的 GGA 标准数据格式, 接收完一帧数据后, 将坐标数据提取出来, 转换成 BJ54 坐标后放入寄存器。方位姿态仪发送的数据使用 NMEA PRDID 标准格式, 数据接收后按照上文的坐标转换方法解算出水声换能器在平台坐标系下的坐标, 然后根据式(4)得到水下基准坐标, 将坐标点轨迹在窗口界面上显示, 并记录数据。

徠卡 1230GPS 接收机和 TSS 的 MAHRS 方位姿态仪输出速率设置可能不相同, GPS 最快 20Hz, 方位姿态仪最快可达 50 Hz, GPS 输出速率一般设定最高值, 在标校系统平台运动较慢或姿态变化不剧烈时, 可以降低方位姿态仪的输出速率。如果在数据处理时两者设定的输出速率不相同, 假设 GPS 为 20Hz, 方位姿态仪为 40Hz, 则需要对解算后的 GPS 坐标数据进行绑定处理, 即以 GPS 数据为基准, 查找最接近的方位姿态仪数据进行绑定, 可知两组数据最大错位不超过 25 ms, 对标校系统平台而言, 由这个错位引起的位置误差可以忽略不计。

## 4 标校系统陆上试验

为了在原理上验证本文的标校系统, 分析系统的定位精度, 2010 年 8 月在陆地上进行了组合定位精度验证性试验, 考虑到 GPS 信号强度影响, 试验场地选择在室外空旷处。当标校系统竖直静止时, 假定 GPS 天线与基准点在同一垂线上, 两者在地面上的投影重合, 用米尺测量出两者之间的距离  $L_0$ 。试验时保持基准点不动, 浮筒倾斜到一定角度(由于方位姿态仪的限制, 不能超过  $45^\circ$ ), 显控软件实时接收 GPS 接收机和方位姿态仪的数据, 解算出 GPS 天线偏移量、基准点的大地坐标、基准点平均偏差和最大偏差(均为空间偏差), 将 GPS 天线和基准点的实时相对坐标点(以静止时的位置为原点)显示在界面上, 并实时记录相关数据。

表 1 给出了试验时四种姿态的相关数据。

表 1 标校系统试验数据  
Table 1 Trial data of calibrating system

$L_0/m$ 姿态	GPS 天线漂移量	基准平均偏差/m	基准最大偏差/m
一	(-1.148,0.464,-0.123)	0.064	0.160
4.54 二	(1.466,-0.207,-0.120)	0.087	0.250
三	(1.235,0.487,-0.130)	0.077	0.180
四	(1.603,0.281,-0.175)	0.090	0.306

对表 1 中姿态四的记录数据进行回放，软件界面如图 5 所示，显示界面中向右漂移点(亮点)为 GPS 天线运动轨迹，原点处暗点为基准点轨迹。

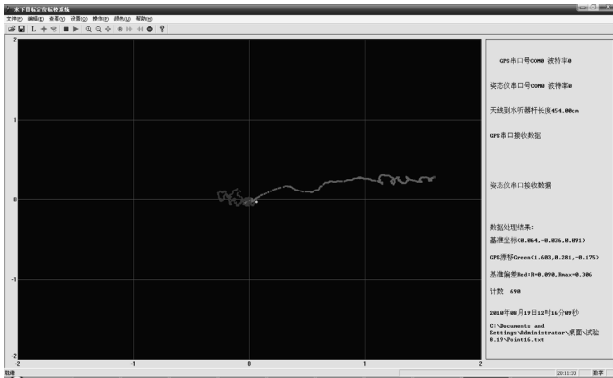


图 5 试验数据回放  
Fig.5 Playback of trial data

由于实际条件的限制，试验时基准点不可能保持不动，GPS 天线偏移越大，基准点偏移也越大，表 1 中姿态四的系统平台倾斜约 $18^\circ$ ，基准点最大偏移约 0.1 m。分析试验数据可知，由 GPS 和姿态仪数据解算出的基准点偏差不超过 0.5 m，综合考虑圆柱杆的弹性形变以及  $L_0$  的测量误差等因素，标校系统的组合定位误差不超过 1 m。下一步的工作需要对标校系统在海上进行试验，安装水声换能器的信号发射模块，处理海试数据，分析系统的定位精度。

### 5 结 论

本文设计了水下目标定位标校系统，以浮筒作为载体平台，具有灵活方便的优点。利用差分 GPS 对平台进行水面精确定位，利用方位姿态仪测量平台姿态角，由显控软件实时解算出作为水下位置基准的水声换能器声中心的大地坐标，从而为水声定位系统提供水下目标的标准位置。标校系统陆上验证试验表明，模拟目标基准位置定位误差不超过 1 m，可满足对水声定位系统的高精度标校要求。

### 参 考 文 献

- [1] Kussat N H, Chadwell C D, Zimmerman R. Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 153-164.
- [2] 郑翠娥, 孙大军, 张殿伦. 一种基于超短基线的高精度多目标水声定位技术研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(2): 12-16. ZHENG Cuie, SUN Dajun, ZHANG Dianlun. Research on high precise multi-target positioning technology based on USBL[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(2): 12-16.
- [3] 吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(4): 18-21. WU Yongting, ZHOU Xinghua, YANG Long. Underwater acoustic positioning system and its application[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(4): 18-21.
- [4] 唐秋华, 吴永亭, 丁继胜, 等. 超短基线声学定位系统的标校技术研究[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 284-287. TANG Qiu-hua, WU Yongting, Ding Jisheng, et al. Calibration of ultra-short baseline acoustic positioning system[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4): 284-287.
- [5] 刘林泉. 水声综合测控系统关键技术研究[D]. 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2008: 78-86. LIU Linquan. Study on the key technologies of hydroacoustic Synthetic measurement and control system[D]. Harbin Engineering University, 2008: 78-86.