

超短基线水声定位系统动态定位误差测试研究

胡圣航, 闵小龙

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 现有对超短基线水声定位系统的误差研究多集中在静态领域, 鲜有文献对其动态误差进行研究。以 GAPS 作为主要试验设备对超短基线水声定位系统的动态误差进行了相关研究, 提出了一种超短基线水声定位系统动态定位误差测试方法。使用圆概率误差半径进行度量, 并通过湖上实验对 GAPS 的动态误差进行了测算, 为水声定位系统校准/标定方法的研究奠定了重要基础。

关键词 超短基线; 水声定位; 动态定位误差

中图分类号 P733.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)06-0516-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.06.012

Research on Dynamic Positioning Deviation of Ultra Short Baseline Hydroacoustic Positioning System

HU Shenghang, MIN Xiaolong

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract Currently existing studies on the deviation of ultra short baseline hydroacoustic positioning systems mostly concentrate on the static field, while there are few literatures focusing on the dynamic deviation. This paper uses GAPS as the main test equipment to conduct related research on the dynamic deviation of ultra short baseline hydroacoustic positioning systems, proposing a test method for these systems. The circular probability error radius is used for measurement, and the dynamic deviation of GAPS is measured through experiments on the lake, which has provided an important foundation for the study of calibration about underwater positioning systems.

Key words ultra short baseline; hydroacoustic positioning; dynamic positioning deviation

0 引言

超短基线 (USBL) 水声定位系统由于安装简单并且使用方便, 是目前水下声学定位的主流设备^[1-3]。超短基线水声定位系统的静态定位误差可以很方便地在消声水池或湖泊中进行精确测量, 同时也可看到有较多的研究和试验成果^[4-9], 但鲜见对其动态定位误差的相关研究和试验。水下航行器

搭载超短基线水声定位系统进行动态作业时, 其实时位置是操作者关注的一个重点, 因此研究超短基线水声定位系统的动态定位误差测试评估方法十分必要。根据水下测量定位计量检测系统研究的要求, 开展超短基线水下定位系统动态定位性能测试技术研究, 评判超短基线水下定位系统的动态定位精度, 对水下定位系统校准/标定方法的研究具有重要意义。

收稿日期: 2020-09-20

作者简介: 胡圣航 (1982-), 男, 工程师, 主要从事水中兵器研究工作。

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项 (关键与支撑计量技术体系研建 GASI-02-ZL-01)。

1 超短基线水声定位系统的原理及组成

超短基线水声定位系统一般由声基阵和声信标组成。声基阵集成了发射换能器和多个接收阵元,其通常安装在船上,发射换能器向水体中发射询问信号并接收响应信号,往往是半球形或无指向性的。声信标放置在海底或安装在水下移动载体上,只有在收到询问信号时才返回响应信号。解算单元根据声基阵接收阵元收到的询问信号和响应信号之间的时间差测出声基阵与水下目标之间的距离,同时利用响应信号到达声基阵各阵元的相位差,测出水下目标相对于阵元的方位,从而得到水下目标的空间位置。

2 动态定位误差测试试验构思

定位误差分析需要分别获取测量值和真实值,然后通过两组数据比对计算得到动态误差。

试验中可以将超短基线水声定位系统输出的声学应答器实时位置作为测量值,取定位精度高于超短基线水声定位系统定位精度的系统输出结果作为真实值。

消声水池高精度行走机构、基于全球导航卫星系统的载波相位差分(GNSS-RTK)测量等均可提供精度高于超短基线水声定位系统动态定位精度的定位结果,但不同的方法有各自不同的使用范围^[10-13]。本文将超短基线水声定位系统(GAPS)作为被测设备,采用GNSS-RTK测量的方法获取真实值,研究超短基线水声定位系统动态定位误差。该方法非常适合在没有消声水池的条件下,对超短基线水声定位系统动态定位误差进行快速评估。GNSS-RTK测量是GPS载波相位测量技术和通信技术的结合,其动态精度可达cm级,在定位精度和实时性方面可以很好地满足要求^[14-16]。

3 动态定位误差分析

本文对GAPS的动态定位精度评估采用比较通用的圆概率误差评定法^[17-20]。此方法根据概率为 P 时圆概率误差半径 R_p 的大小来评定^[21]。

将第 i 次的GAPS输出的声基阵纬度、经度分别记为 φ_{in} 和 λ_{in} 。为方便进行数据处理,需将声基

阵的World Geodetic System-1984世界大地测量系统(WGS84)经纬度坐标 $(\varphi_{in}, \lambda_{in})$ 转换为平面坐标 (E_{in}, N_{in}) 。转化方法如下:

$$\begin{aligned} E &= 1855(\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0 \\ N &= 1849(\varphi - \varphi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E 为平面直角坐标系东向坐标, m; N 为平面直角坐标系北向坐标, m; φ 为WGS84坐标纬度值, ' ; λ 为WGS84坐标经度值, ' ; φ_0 为参考基准纬度值, ' ; λ_0 为参考基准经度值, ' 。其中: λ 和 λ_0 东为正,西为负; φ_0 北纬为正,南纬为负。对于本例中 λ_0 和 φ_0 取声基阵经纬度坐标第1组值。

定义GAPS定位结果的东向坐标误差均值为 μ_E ,北向坐标误差均值为 μ_N 。

$$\begin{aligned} \mu_E &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) \\ \mu_N &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: μ_E 为GAPS的东向坐标误差均值, m; n 为GAPS定位结果总组数; i 为GAPS定位结果此序号; E_i 为GAPS第 i 次定位结果东向坐标, m; \bar{E} 为RTK或捷联惯导目标位置东向坐标, m; μ_N 为GAPS的北向坐标误差均值, m; N_i 为GAPS第 i 次定位结果北向坐标, m; \bar{N} 为RTK或捷联惯导目标位置北向坐标, m。

定义GAPS定位结果的东向坐标方差为 σ_E ,北向坐标方差为 σ_N 。

$$\begin{aligned} \sigma_E &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \mu_E)^2} \\ \sigma_N &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \mu_N)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: σ_E 为GAPS定位结果的东向坐标方差, m; σ_N 为GAPS定位结果的北向坐标方差, m; n 为GAPS定位结果总组数; i 为GAPS定位结果此序号; ΔE_i 为GAPS第 i 次定位结果东向坐标误差, m,表达式为 $\Delta E_i = E_i - \bar{E}$; ΔN_i 为GAPS第 i 次定位结果北向坐标误差, m,表达式为 $\Delta N_i = N_i - \bar{N}$ 。

在概率为 P 的条件下，圆概率误差半径 R_p 的计算方法为

$$R_p = \sqrt{\eta(\sigma_Z Z'_p + \mu_Z)^3} \quad (4)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{2\rho}{9\eta^2}}$$

$$\mu_Z = 1 - \frac{2\rho}{9\eta^2}$$

$$\eta = \sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \mu_E^2 + \mu_N^2$$

$$\rho = \sigma_E^4 + \sigma_N^4 + (\sigma_E^2 \mu_E^2 + \sigma_N^2 \mu_N^2)$$

式中： R_p 为圆概率误差半径； σ_Z 、 μ_Z 、 η 、 ρ 为圆概率半径计算中间数据。

表 1 Z'_p 随概率 P 变化的取值

Table 1 Value of Z'_p changing with probability P

| 概率 $P/\%$ | Z'_p 取值 | 概率 $P/\%$ | Z'_p 取值 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 50 | 0 | 87 | 1.126 46 |
| 55 | 0.125 38 | 88 | 1.175 09 |
| 60 | 0.252 93 | 89 | 1.226 67 |
| 65 | 0.384 88 | 90 | 1.281 73 |
| 70 | 0.524 00 | 91 | 1.340 97 |
| 75 | 0.674 19 | 92 | 1.405 32 |
| 80 | 0.841 46 | 93 | 1.476 08 |
| 81 | 0.877 76 | 94 | 1.555 10 |
| 82 | 0.915 26 | 95 | 1.645 21 |
| 83 | 0.954 10 | 96 | 1.751 08 |
| 84 | 0.994 42 | 97 | 1.881 21 |
| 85 | 1.036 43 | 98 | 2.054 19 |
| 86 | 1.080 35 | 99 | 2.326 79 |

4 测试系统组成

4.1 系统组成

整个测试系统如图 1 所示。GAPS 声基阵阵元向上通过试验架放置在水底，经水密电缆连接至试验船的简易控制盒 (ECB) 上。该水密电缆将 GNSS 的定位同步信号传输至 GAPS 声基阵，声信标的定位结果传输至试验船，进一步通过网桥传输至测量船，用于数据的集中记录和处理。

GAPS 声信标与 GNSS-RTK 天线通过刚性固定杆连接在一起并以 GAPS 声信标沉于水下的方式固定在测量船上，在固定时确保声信标换能器与 GNSS-RTK 的天线垂直以减小测量误差。

试验时，试验船锚泊在 GAPS 声基阵附近，测量船则以声基阵为圆心按照 3 kn、5 kn 的速度缓慢转圈，绕圈半径不小于 1 km。在每种航速下，记录 GPS 的位置信息。

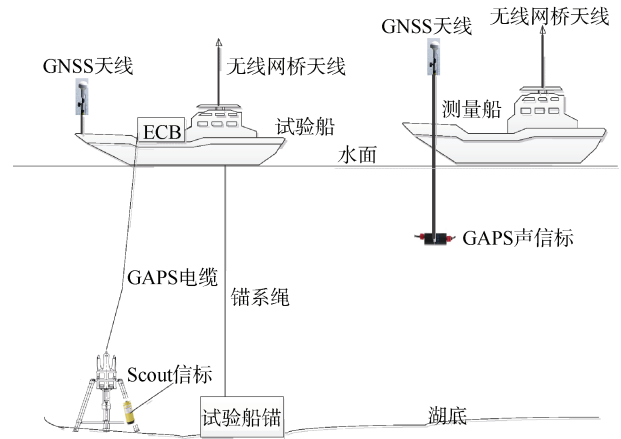


图 1 固定点测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fixed point test system

4.2 试验架的构成

试验架如图 2 所示，将布放在湖底。考虑到水底不是平整底面，试验架整体形式设计成类似于重型的三角架，通过 3 个点的支撑使得试验架放置稳定。

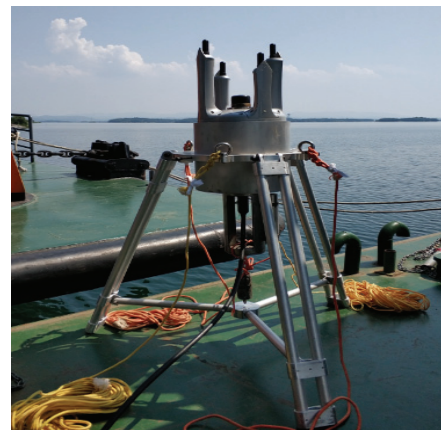


图 2 GAPS 声基阵安装试验架

Fig. 2 Support for GAPS acoustic array installation test

试验架安装座设计有万向架装置，使用时通过万向轴上部的被测设备的自身正浮力和万向轴下部配重铅块的作用，使 GAPS 声基阵接收阵元在水中呈现竖直向上的姿态。

万向架的设计可满足试验架任意方向 30° 倾斜状态下, 接收阵元都能保持竖直向上的姿态。如通过 GAPS 内置姿态传感器得知声基阵倾角不满足试验要求, 可进行重新布放。

4.3 高精度定位系统信标

试验架在沉入水底前, 可通过 GNSS-RTK 信息确定精确位置, 但在布放过程中, 受各种环境的影响, 试验架不会垂直落入水底, 所以布放结束后的试验架位置只能通过高精度的水声定位系统进行确定。

本测试试验使用 Scout 超短基线系统。该设备是英国 Sonardyne 公司专门为近岸带 (0 ~ 500 m 水深)、近距离 (0 ~ 1 000 m) 跟踪而研发和生产的, 主要用于跟踪 1 ~ 10 个水下目标物, 并将跟踪到的目标物的大地坐标从系统的串口输出到外部数据采集系统从而完成水下定位。经多方验证, 该设备的静态测试精度可以达到 0.5%。在使用时, 将 1 个信标安装在试验架上, 通过试验船多次围绕试验架测量, 可精确确定试验架的经纬度信息。



图 3 Scout 短基线系统
Fig. 3 Scout short baseline system

4.4 试验船设备

试验船上安装设备如图 4 所示, 通过 Moxa NPort5045 串口服务器实现网桥网络接口至串口的接口转换及数据共享。网桥则选择成熟的 BreezeNET DS.11 型网桥, 其传输距离为 10 km, 带宽为 11 Mbps, 试验船上所有设备通过发电机供电。

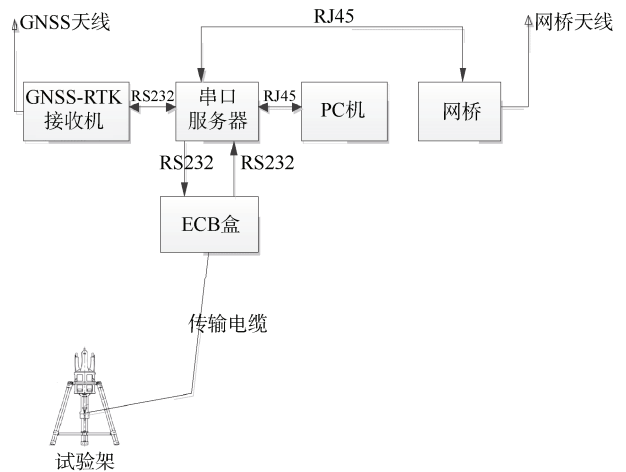


图 4 试验船设备组成框图
Fig. 4 Block diagram of test ship equipment

4.5 高精度 GNSS-RTK 接收机

本文使用 DOVE-E4-PLUS 型 GNSS-RTK 接收机, 如图 5 所示。该接收机使用 4G 网络接收千寻的网络 RTK 信号, 实现水平精度小于 2 cm, 高程精度小于 5 cm 的精确定位。



图 5 高精度 GNSS-RTK 接收机
Fig. 5 High-precision GNSS-RTK receiver

5 试验方法

试验前将按图 4 将设备布放、安装完成。测量船围绕试验船绕圈航行。试验船将 GAPS 输出信号通过网桥传输到安装信标的测量船的数据处理中心, 数据处理中心通过软件将 GAPS 数据、GPS 数据保存到一个文件中。通过计时设备得到数据对比的时间点, 在同一个时间点上以 GPS 数据为真值, GAPS 数据与真值之间通过圆概率误差评定法进行评定。

6 数据结果

本次试验在某水库水域进行,该水域开阔。试验船在以 R 为半径绕圈时,有不小于 $2R$ 的机动范围,在 2 倍声基阵作用距离以内无其他水声干扰。使用 RTK 定位方式,试验区域离无线电信标台站或基准站的距离应与 GPS 定位精度要求相适应,水文地理条件的要求与相关设备要求一致。试验时,试验船以 3 kn 和 5 kn 的速度航行时,要求移动测量船在以 R 为半径绕圈航行时具备良好的机动性。运行轨迹及 GAPS 定位轨迹,如图 6 和图 7 所示。在 3 kn 和 5 kn 速度下,圆概率误差半径结果见表 2 和表 3。

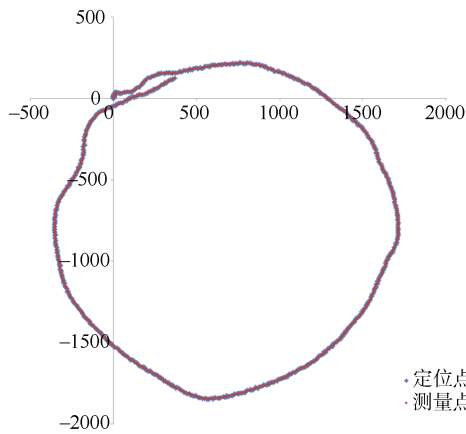


图 6 速度 3 kn 时运行轨迹及 GAPS 定位轨迹
Fig. 6 Trajectory and GAPS positioning trajectory at speed of 3 kn

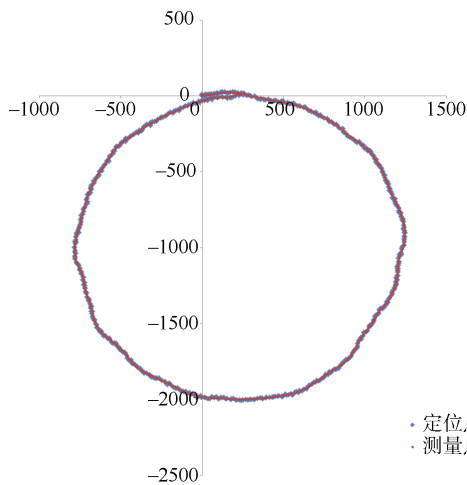


图 7 速度 5 kn 时运行轨迹及 GAPS 定位轨迹
Fig.7 Trajectory and GAPS positioning trajectory at speed of 5 kn

表 2 速度 3 kn 时误差半径计算结果

Table 2 Error radius calculation results at speed of 3 kn

| 概率 $P/\%$ | 误差半径/m | 概率 $P/\%$ | 误差半径/m |
|-----------|--------|-----------|--------|
| 50 | 2.914 | 87 | 5.094 |
| 55 | 3.136 | 88 | 5.197 |
| 60 | 3.368 | 89 | 5.307 |
| 65 | 3.613 | 90 | 5.425 |
| 70 | 3.878 | 91 | 5.553 |
| 75 | 4.171 | 92 | 5.693 |
| 80 | 4.505 | 93 | 5.849 |
| 81 | 4.579 | 94 | 6.024 |
| 82 | 4.655 | 95 | 6.226 |
| 83 | 4.735 | 96 | 6.466 |
| 84 | 4.818 | 97 | 6.766 |
| 85 | 4.905 | 98 | 7.171 |
| 86 | 4.997 | 99 | 7.825 |

表 3 速度 5 kn 时误差半径计算结果

Table 3 Error radius calculation results at speed of 5 kn

| 概率 $P/\%$ | 误差半径/m | 概率 $P/\%$ | 误差半径/m |
|-----------|--------|-----------|--------|
| 50 | 4.663 | 87 | 8.245 |
| 55 | 5.027 | 88 | 8.414 |
| 60 | 5.407 | 89 | 8.595 |
| 65 | 5.810 | 90 | 8.790 |
| 70 | 6.245 | 91 | 9.001 |
| 75 | 6.726 | 92 | 9.232 |
| 80 | 7.276 | 93 | 9.488 |
| 81 | 7.397 | 94 | 9.777 |
| 82 | 7.523 | 95 | 10.110 |
| 83 | 7.654 | 96 | 10.506 |
| 84 | 7.791 | 97 | 10.999 |
| 85 | 7.935 | 98 | 11.667 |
| 86 | 8.086 | 99 | 12.745 |

7 结束语

本文以 GAPS 为研究对象,对超短基线水声定位系统动态定位误差进行了研究。其动态误差在速度 3 kn 时有 86%的概率,其误差控制在 5 m 以内;在速度 5 kn 时有 50%的概率,其误差控制在 5 m

以内,说明其动态误差与航速关系显著。

参考文献

- [1] 单瑞,董凌宇,杜凯,等.超短基线定位系统在深拖探测中的应用[J].海洋地质前沿,2019(9):29-35.
- [2] 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.
- [3] 姜婷.超短基线定位系统定位误差的分析及仿真[J].水雷战与舰船防护,2012,20(4):14-17.
- [4] 隋海琛,田春和,韩德忠,等.水下定位系统误差分析[J].水道港口,2010,31(1):69-72.
- [5] 唐秋华,吴永亭,丁继胜,等.超短基线声学定位系统的校准技术研究[J].声学技术,2006(4):281-287.
- [6] 冯守珍,吴永亭,唐秋华.超短基线声学定位原理及其应用[J].海岸工程,2002,21(4):13-18.
- [7] 杨贵海,李兵,马锦垠.短基线水声定位精度仿真研究[J].海洋测绘,2010,30(3):34-36.
- [8] 韩瑞宁,周东辉.超短基线定位精度与误差分析[J].微计算机信息,2008,24(7):160-162.
- [9] 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.
- [10] 何海波.高精度GPS动态测量及质量控制[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2002.
- [11] 何海波,杨元喜,孙中苗.几种GPS测速方法的比较分析[J].测绘学报,2002,31(3):217-221.
- [12] 何海波,郭海荣,王爱兵.GNSS中长基线分米级快速定位研究[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集.北京:中国科学院高技术研究与发展局,2010.
- [13] 何海波,郭海荣,王爱兵.GNSS中长基线分米级快速定位研究[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集(下).北京:中国科学院光电研究院,2010.
- [14] 姚刚,刘星,张希黔.高层建筑施工GPS测量的技术设计与应用[J].四川建筑科学研究,2004,30(1):105-107,110.
- [15] 何峰,郑勇,骆亚波,等.GPS动态测量精度检测及分析[J].工程勘察,2009,37(3):77-82.
- [16] 任红飞,何峰,王若璞.基于动态检测平台的GPS接收机动态性能检测研究[J].测绘信息与工程,2008(2):43-45.
- [17] 张乐,李武周,巨养锋,等.基于圆概率误差的定位精度评定办法[J].指挥控制与仿真,2013,35(1):111-114.
- [18] 李廷杰.导弹武器系统的效能及其分析[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [19] 沙钰.弹道导弹精度分析概论[M].长沙:国防科技大学出版社,1995.
- [20] 安维廉,宋天莉,徐德坤,等.GJB6289—2008地地弹道式导弹命中精度评定办法[S].北京:国家军用标准总装备部,2008.
- [21] 李军正.动态GPS定位检定方法及误差分析[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2004.

(责任编辑:曹晓霖)