

超短基线水声定位系统校准方法研究

刘焱雄¹ 彭琳¹ 吴永亭¹ 周兴华¹

(1 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛市高科技工业园区仙霞岭路6号, 266061)

摘要: 提出了超短基线水声定位系统(USBL)的校准方法, 并用模拟数据进行了验证。同商业超短基线定位系统相比, 该方法具有精度高、结果可靠、对校准环境要求不高等特点。

关键词: 系统校准; 换能器; 应答器

中图分类号: P225.8; P229.1

超短基线水声定位系统由换能器与应答器共同实现对水下目标的定位, 换能器固定在测量船上。为了得到水下目标的地理位置, 需要外接GPS定位系统。由于换能器在水下, GPS天线在船上, 换能器与GPS天线之间存在位置差。另外, 换能器的定向系统与船心坐标系之间不可能完全重合, 存在系统性定向偏差。因此, 超短基线水声定位系统工作之前, 必须对这些系统性差异进行校准, 否则, 会出现很大的系统性位置偏差。本文主要研究换能器的偏心误差和应答器位置的校准方案和方法。

1 校准方案设计

在超短基线水声定位系统中, 确定应答器的地理位置和换能器的偏心误差涉及到地理坐标系和船心坐标系。地理坐标系可以是WGS84坐标系或国家54坐标系。在海洋测绘中, 通常采用通用横轴墨卡托投影(UTM)^[1]。船心坐标系的原点定义在船的质心, X 轴指向船艏, Y 轴指向船右舷, Z 轴指向上方, 并与 X 轴和 Y 轴构成左手系。两个坐标系之间的旋转角分别为方位角 A 、纵摇角 κ 和横摇角 φ 。

一个完整的超短基线水声定位系统包括:

GPS测量系统(DGPS接收设备或RTK设备): 实时测量天线在WGS84下的UTM坐标(N, E, U), 记为 X/c ; IMU惯性测量系统: 测量船的纵摇角 κ 和横摇角 φ ; 电罗经或GPS: 测

量船艏向的方位角 A ; 换能器: 发射并回收声波, 计算应答器在换能器坐标系中的位置(x, y, z); 应答器: 接收并反射声波; 声速剖面仪: 测定测量区域的声速场, 改正声波测量资料; 压力计: 测量应答器的水深值 z 。

借助GPS中几何精度因子的概念, 并结合实际工作经验, 设计船只校准测量路线如图1所示。

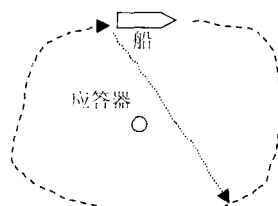


图1 船只行进路线

Fig. 1 Route of Ship

将应答器放置在水下某点不动, 船只以应答器为中心绕行一周, 然后从应答器的上面横穿。根据经验, 应答器与船之间的水平距离一般为水深值的2~3倍。船只在行进时, 同时采集GPS天线的位置(N, E, U)、船只的姿态角(A, κ, φ)和应答器在换能器坐标系中的位置(x, y, z)。如果系统没有压力计, 应答器的水深值 z 的精度很差, 这样在校准时, 只能使用应答器的平面坐标(x, y)。

2 位置校准的方法

确定应答器的地理位置通常有两种方法: 坐

标旋转法和距离交会法。坐标旋转需要已知换能器的定向角,但这 3 个定向角是未知的,因此,超短基线水声定位系统的测距精度高,测角精度低。为了避免测角误差的影响,这里采用距离交会法。将应答器在换能器坐标系中的坐标转化为对应的距离,即

$$S = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \text{ 或 } \delta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

式中, δ 为水平距离。

假定换能器的偏心误差(相对于 GPS 天线相位中心)为 $\Delta X_T = (\Delta F, \Delta S, \Delta H)$ (ΔX_T 为船心坐标系内的偏差量, ΔF 为船艏向偏差, ΔS 为右舷向偏差, ΔH 为高程偏差), 应答器的地理位置为 $X_R = (N_R, E_R, H_R)$, 采用如下步骤确定 ΔX_T 和 ΔX_R 。

1) 确定换能器的位置 $X_T = (N_T, E_T, H_T)$:

$$X_T = X_G + R_U^T \cdot \Delta X_G \quad (2)$$

式中, R_U 为船心坐标系至地理坐标系的旋转矩阵。

2) 建立观测方程:

$$V = \rho - S \quad (3)$$

式中, S 为式(1)计算的距离; ρ 为换能器至应答器的几何距离, 即

$$\rho = |X_R - X_T| = \sqrt{(N_R - N_T)^2 + (E_R - E_T)^2 + (H_R - H_T)^2} \quad (4)$$

3) 确定系数矩阵并解算法方程。将式(4)代入式(3)并线性化后得误差方程:

$$V = A \cdot x - L$$

式中, x 为改正数向量, 包括换能器的偏心值和应答器的位置; A 为系数矩阵; L 为常数项。这是典型的最小二乘问题, 由最小二乘准则得解算结果为:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P L, Q = (A^T P A)^{-1} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{V^T P V / (N - M)}$$

式中, P 为观测值的权阵; N 为观测值的个数; M 为未知数的个数。如果应答器和换能器的位置都未知, 且式(1)中的距离为斜距, 则 $M = 6$ 。

3 模拟计算分析

为了检验方法是否可行以及程序是否可靠, 根据上述方法编制了计算程序。换能器的实际偏心位置为 $(-2.0, -10.0, -3.0)$, 应答器的实际位置为 $(100, 100, 100)$, 对应的观测序列见表 1。

表 1 中, 观测值的采样顺序采用图 1 设计的方案, 选取的点位为正方形的 4 个角、4 条边的中

表 1 设计的观测序列

Tab. 1 Simulative Observations

| 观测序号 | GPS 天线位置/m | | | 姿态角/(°) | | | 斜距/m |
|------|------------|-----|---|---------|---|----|---------|
| | N | E | H | A | K | φ | |
| 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 180.289 |
| 2 | 100 | 0 | 4 | 0 | 3 | 5 | 148.477 |
| 3 | 200 | 0 | 2 | 0 | 4 | 8 | 176.521 |
| 4 | 200 | 100 | 3 | 90 | 3 | 10 | 146.972 |
| 5 | 200 | 200 | 4 | 90 | 4 | 15 | 176.68 |
| 6 | 100 | 200 | 1 | 180 | 5 | 6 | 146.268 |
| 7 | 0 | 200 | 2 | 180 | 3 | 20 | 174.827 |
| 8 | 0 | 100 | 3 | 270 | 4 | 10 | 146.951 |
| 9 | 100 | 100 | 1 | 0 | 3 | 6 | 97.366 |

点和正方形的中心, 一共 9 组观测值。假定换能器的近似位置为 $(-2.1, -10.2, -3.1)$, 应答器的近似位置为 $(99.8, 100.3, 99.5)$, 经程序运行后, 对应的计算结果为 $(-2.000, -10.001, -3.002)$ 和 $(99.999, 100.001, 100.004)$ 。很明显, 计算结果与真值的差异很小, 可以认为计算结果可信。

另外, 对应答器的二维位置也进行了类似的计算, 计算结果也收敛于真值。由此可见, 本文提出的方法是可行的, 计算程序也是可靠的。

4 实测数据比较

利用现有的商用超短基线定位系统于 2003 年 8 月和 2004 年 8 月分别在渤海湾和胶州湾进行了海上试验, 商用系统包含了自用的校准程序和校准方案。试验时, 按照商用系统的要求, 在应答器的东南西北四个方位各测 100 组数据。在渤海湾的试验中, 地理位置的测定采用了无线电信标/DGPS 设备, 而在胶州湾采用了 RTK 设备。

商用系统需要假定船心为参考点, 表 2 中列出的换能器的偏心误差是相对于船心的。另外, 商用软件不能校准换能器高程方向的偏心误差, 因此, 这项指标无法进行比对和评估, 这里只比较应答器和换能器水平方向的差异。

表 2 渤海湾试验结果比较/m

Tab. 2 Comparison of Results in Bohai Bay/m

| | 商用软件结果 | 本方法结果 | 差异 |
|----------|--------------|--------------|------|
| 应答器 N 值 | 4 217 042.02 | 4 217 043.13 | 1.13 |
| 应答器 E 值 | 670 730.05 | 670 730.25 | 0.20 |
| 换能器船艏向偏心 | -0.93 | -0.92 | 0.01 |
| 换能器右舷向偏心 | 0.24 | 1.74 | 1.50 |

经分析后发现, 第一个观测历元对应的船艏方向的方位角约为 83° , 纵摇角和横摇角都很小; 将右舷方向 1.5 m 的差值分别投影到北方向和

东方向,北方向分量为 1.48 m,东方向分量为 0.18 m。如果从本方法的结果中减去上述两个分量,得到应答器的位置与商用软件结果几乎一致。由此推断,应答器位置的互差主要是由右舷方向的偏心误差引起的。

商用软件结果与本文方法的计算结果在右舷方向的互差很大。由于右舷方向的偏心误差为船心至换能器的位置差,换能器一般安装在船的侧边,所以,两倍的位置差应等于船的宽度。如果按照这样的推算,商用软件计算出的船宽只有 0.5 m,而实际的船宽有 3 m 多,所以商用软件给出的这项结果并不可靠。相反,本文方法推算出的船宽约为 3.5 m,与实际情况吻合。

另外,表 2 显示的本文方法的结果均大于商用软件的结果,呈现系统性差异。船艏方向的偏心互差仅为 0.01 m,这里不予讨论;应答器位置的互差是由右舷方向的偏心误差引起的,所以,核心的问题是右舷方向的 1.5 m 的系统性差异。根据商用软件的计算方案,可以首先推测出商用软件平均各观测点的 100 组观测值,然后计算换能器的偏心误差。分析原始数据后发现,同一地点的 100 组观测值之间的坐标分量互差很大,如果换算成倾斜距离,100 组斜距互差很小。所以,如果采用坐标分量的平均值计算换能器的偏心误差,会产生系统性的差异,这可能是导致右舷方向偏心差变小的原因。

由于商用软件无法处理胶州湾的试验数据,所以无法进行结果比较。商用系统校准试验时,要求船体尽量不要摇晃,而实际野外试验时,胶州湾的风浪较大;分析原始数据后发现,商用系统在同一地点测量的 100 组数据不收敛,致使计算失

败。本文方法顾及了大风浪的影响,可以处理这些数据。野外试验时, GPS 天线与换能器安装在同一铁竿上,而铁竿与甲板几乎垂直,这样, GPS 天线中心与换能器中心的水平位置几乎一致。本文的计算结果显示,船艏向的偏差为 5 cm,右舷向的偏差小于 1 cm,与实际情况吻合。

系统的校准工作还包括换能器的定向校准,在后续的研究中,需要加快这部分工作的研究。另外,上述的校准软件还需要更多的试验进行验证。

致谢:唐秋华博士和杨龙工程师为本文的计算提供了数据,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 黄谟涛,翟国君,谢锡君,等.多波束和机载激光测深位置归算及载体姿态影响研究[J].测绘学报,2000,29(1):1-7
- [2] 周忠谟,易杰军,周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M].北京:测绘出版社,1997
- [3] 冯海泓,吴永亭,篮宇,等.长程超短基线定位系统研制(2002AA613010)课题技术设计报告[R].国家海洋局第一海洋研究所,哈尔滨工程技术大学,2003
- [4] Vickery K. Acoustic Positioning Systems: a Practical Overview of Current Systems[C]. The Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, Cambridge, MA, USA, 1998
- [5] de Angelis C M, Whitney J. Adaptive Calibration of an Autonomous Underwater Vehicle Navigation System[J]. IEEE, 2000: 1 273-1 275

第一作者简介:刘焱雄,博士,岗位研究员。主要研究方向为精密定位技术和 GPS 气象学研究。

E-mail: yxliu@fio.org.cn

Calibration of Transducer and Transponder Positions

LIU Yanxiong¹ PENG Lin¹ WU Yongting¹ ZHOU Xinghua¹

(1 The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 6 Xianxialing Road, High-Tech Industrial District, Qingdao 266061, China)

Abstract: A method has been developed to calibrate the positions of the transducer and the transponder in the ultra-short baseline acoustic position system(USBL). The experimental results show that this method is more reliable and practical than that in the commercial USBL system.

Key words: system calibration; transducer; transponder