

# 基于最小二乘法的超短基线水声定位系统校准方法

余白石, 王占勇

(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** 超短基线水声定位系统是海洋工程及水下无人系统中应用较广泛的精密仪器设备, 为了提高对水下目标的定位精度, 在使用前需对其进行校准。描述了一种基于最小二乘法迭代修正的超短基线水声定位系统校准方法, 该方法以最小二乘法为基本原理, 通过多次迭代修正的方式, 修正基阵与 GPS 天线之间的平移偏差以及基阵与罗经之间的旋转偏差, 从而提高系统的测量精度, 最终通过湖上试验验证了该方法的有效性。

**关键词** 最小二乘法; 超短基线; 水声定位; 校准方法

**中图分类号** TB565      **文献标识码** A      **文章编号** 2096-5753(2020)05-0408-08

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.05.008

## A Calibration Method of USBL Acoustic Positioning System Based on Least Square Method

YU Baishi, WANG Zhanyong

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

**Abstract** The USBL acoustic positioning system is a precision instrument which is widely used in marine engineering and underwater unmanned systems. In order to improve the positioning accuracy for underwater targets, the system needs to be calibrated before using. This paper describes a calibration method of USBL acoustic positioning system based on iterative correction of least square method. Through the means of multiple iterative correction, this method adopts the least square method as the basic principle to calibrate the translate deviation between the base array and the GPS antenna and the rotation deviation between the base array and the compass, thereby improving the measurement accuracy of the system. Finally, the effectiveness of the method was verified by lake trials.

**Key words** least square method; USBL; acoustic positioning; calibration method

## 0 引言

在海洋勘探、水下目标探测以及水下设备标定等科考活动中, 通常会遇到对水下目标进行精确定位的问题, 利用水声技术对水下目标进行定位是解决该问题的一项关键技术。目前较常见的水声定位技术有超短基线水声定位 (USBL)、短基线水声定

位 (SBL) 和长基线水声定位 (LBL)<sup>[1]</sup>。而超短基线定位系统由于基阵尺寸较小、安装较方便、使用灵活, 因此是目前使用最广泛的水声定位系统<sup>[2]</sup>。

超短基线定位系统一般包括超短基线定位基阵、水声信标、航向姿态测量设备和 GPS (或北斗) 定位系统。在正式使用之前, 需对 GPS (或北斗) 的天线安装位置、航向姿态测量设备的安装角度进

收稿日期: 2020-09-11

作者简介: 余白石 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事反水雷、反预置、海洋工程技术研究。

基金项目: 装备预研船舶重工联合基金项目 (6141B040302)、中船集团公司科技创新项目 (201807K) 资助。

行校准, 以提高系统测量的准确性<sup>[3]</sup>。

本文介绍了一种基于最小二乘法迭代修正的超短基线水声定位校准方法, 并通过湖上试验验证了该方法的有效性。

## 1 超短基线水声定位原理

超短基线水声定位方法是通过测量声信号在阵元和水声信标之间的往返时间及相位差, 来确定水声信标的位置<sup>[4]</sup>。在实际测量时, 需要测量声速、声信号往返时间、基阵坐标及基阵的方位和姿态角度。

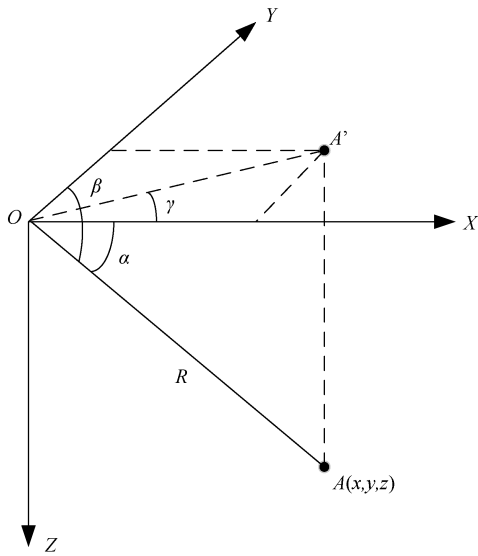


图1 超短基线水声定位原理图  
Fig. 1 Principle of USBL positioning

如图1所示, 假设O点为2个正交阵的交点, 2个阵元分别位于X轴和Y轴, A点为水声信标位置, 其坐标值为 $(x, y, z)$ ; OA与OX的夹角为 $\alpha$ , OA与OY的夹角为 $\beta$ , A'为A点在XOY平面的投影点, OA'与OX的夹角为 $\gamma$ , R为O点到A点的距离, 根据图中几何关系可得:

$$\frac{x}{R} = \cos \alpha \quad (1)$$

$$\frac{y}{R} = \cos \beta \quad (2)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (4)$$

同时, 可以确定水声信标的水平距离和深度分别为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (6)$$

设 $\rho$ 和 $\sigma$ 分别为X轴和Y轴相邻阵元接收信号的相位差, 由于基阵的尺寸较小, 因此在平面波近似条件下可得:

$$\rho = \frac{2\pi d \cos \alpha}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{2\pi d \cos \beta}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$ 为波长;  $d$ 为阵元间距。

将式(7)和式(8)分别代入式(1)和式(2), 可以得到:

$$x = \frac{\varepsilon \rho R}{2\pi d} \quad (9)$$

$$y = \frac{\varepsilon \sigma R}{2\pi d} \quad (10)$$

斜距R可通过测量信号往返的时间差和声速来计算得到, 具体计算公式如下:

$$R = \frac{c \Delta t}{2} \quad (11)$$

式中:  $c$ 为水中平均声速, 具体可使用声速剖面仪测量;  $\Delta t$ 为信号从阵元到信标的往返时间。

由式(9)和式(10)可知, 计算信标水平坐标 $(x, y)$ 的关键是提高相位差 $\rho$ 和 $\sigma$ 的测量精度, 这就需要对超短基线水声定位系统进行校准。

## 2 超短基线水声定位系统校准方法

如图2所示, 超短基线水声定位系统由声基阵、声信标、综合处理计算机、GPS接收机、罗经、声速剖面仪组成。在校准前, 由声速剖面仪测量声速梯度信息, 并载入综合处理计算机<sup>[5]</sup>。

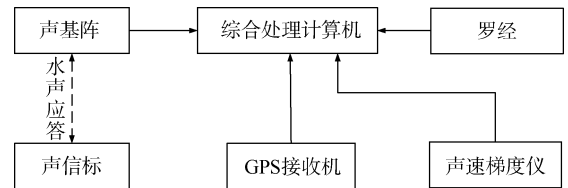


图2 超短基线水声定位系统组成图  
Fig. 2 Compositional diagram of USBL system

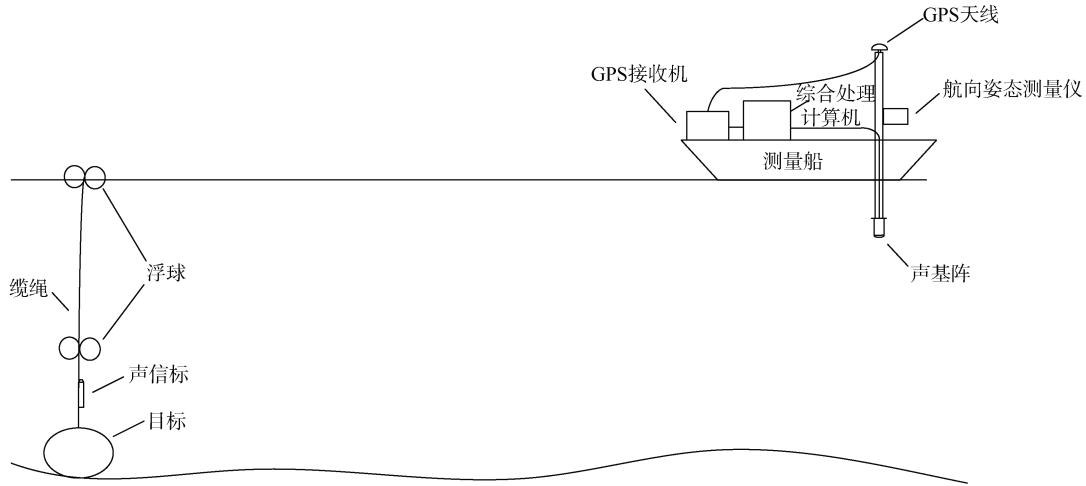


图3 超短基线定位系统测试场景示意图

Fig. 3 Schematic diagram of USBL system in test scenario

如图3所示,在校准时,将声信标固定于水底,让船绕声信标航行一周,综合处理计算机实时记录船的GPS坐标和航向姿态信息,以及对应时刻的超短基线水声定位系统解算的目标位置。由于系统尚未校准,此时测量的目标位置偏差较大,但可以通过该位置反推出目标在基阵坐标系下的坐标 $\vec{r}_{Ai}$  ( $i$ 表示船在第 $i$ 个测量点进行测量,取值为 $1 \sim n$ ),再结合船的大地位置 $\vec{r}_{Gi}$ 、船的航向姿态 $(h_i, p_i, r_i)$ ,可求解基阵安装的平移偏差和旋转偏差<sup>[6]</sup>。

假设水声定位基阵的初始安装平移偏差 $\vec{r}_{Gi} = (Dx_0, Dy_0, Dz_0)$ ,则基阵的大地坐标位置可由下式表示:

$$\vec{r}_{Gi} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R^T(h_i, p_i, r_i) \cdot \begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ Dz \end{bmatrix} + \vec{r}_{Gi} \quad (12)$$

假设声信标位置 $T = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ ,则空间测距交会定

位的观测方程为

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2 = L_i^2 \quad (13)$$

式中, $L_i$ 为系统测量的基阵到声信标的斜距。

系统的误差方程为

$$ds_i = [(u_i, v_i, w_i), (-u_i, v_i, w_i) \cdot R^T(h_i, p_i, r_i)] \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \\ dDx \\ dDy \\ dDz \end{bmatrix} \quad (14)$$

上式中:

$$u_i = \frac{X_0 - x_i}{L_i} \quad (15)$$

$$v_i = \frac{Y_0 - y_i}{L_i} \quad (16)$$

$$w_i = \frac{Z_0 - z_i}{L_i} \quad (17)$$

$$L_i = \sqrt{(X_0 - x_i)^2 + (Y_0 - y_i)^2 + (Z_0 - z_i)^2} \quad (18)$$

式(14) — (18)中, $(X_0, Y_0, Z_0)$ 为声信标的初始坐标,也称概略坐标。

将误差方程重新定义如下:

$$V = H \cdot Q - L \quad (19)$$

式中: $V$ 为实测斜距的修正值; $H$ 为状态矩阵; $Q$ 为安装误差修正值; $L$ 为测量矩阵,具体定义如下:

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_n)^T \quad (20)$$

$$H = [(u_i, v_i, w_i), (-u_i, v_i, w_i) \cdot R^T(h_i, p_i, r_i)] \quad (21)$$

$$Q = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta Dx, \Delta Dy, \Delta Dz)^T \quad (22)$$

$$\mathbf{L}=(\mathbf{L}_1-\mathbf{L}_1', \mathbf{L}_2-\mathbf{L}_2', \cdots, \mathbf{L}_n-\mathbf{L}_n')^T \quad (23)$$

根据最小二乘原理, 式(19)中的  $\mathbf{Q}$  必须满足  $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$  的要求, 其中  $\mathbf{P}$  为观测权矩阵, 即满足:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = 0 \quad (24)$$

由式(19)和式(24)可得:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{H} \mathbf{Q} - \mathbf{H}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = 0 \quad (25)$$

对所有的观测值, 一般认为都是等权观测的, 则

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{L} \quad (26)$$

将矩阵  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{L}$  代入式(26), 可求出修正值  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta D_x, \Delta D_y, \Delta D_z)$ , 进而根据下式, 可迭代计算出目标的精确坐标  $(X, Y, Z)^T$  和基阵安装平移偏差  $(D_x, D_y, D_z)^T$ 。

$$\begin{cases} X_m = X_{m-1} + \Delta X \\ Y_m = Y_{m-1} + \Delta Y \\ Z_m = Z_{m-1} + \Delta Z \\ D_{x_m} = D_{x_{m-1}} + \Delta D_x \\ D_{y_m} = D_{y_{m-1}} + \Delta D_y \\ D_{z_m} = D_{z_{m-1}} + \Delta D_z \end{cases} \quad (27)$$

式中,  $m$  为迭代次数。

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} -\cos \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha - \cos \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \sin \gamma \cos \beta & -\cos \alpha \cos \gamma \cos \beta \\ 0 & -\cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta + \cos \gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & -\cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin \alpha \sin \beta & -\sin \gamma \cos \beta \sin \alpha & -\sin \alpha \cos \gamma \cos \beta \\ 0 & -\sin \alpha \cos \gamma \sin \beta - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma \sin \beta - \cos \gamma \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \cos \beta & -\sin \beta \sin \gamma & -\cos \gamma \sin \beta \\ 0 & \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \quad (36)$$

定义误差方程为

$$\vec{\mathbf{V}}' = \mathbf{H}' \vec{\mathbf{Q}}' - \vec{\mathbf{L}}' \quad (37)$$

其中:

$$\vec{\mathbf{L}}' = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} - \mathbf{R}^T(h_i, p_i, r_i)(\vec{\mathbf{T}} - \vec{\mathbf{r}}_{Bi}) \quad (38)$$

根据最小二乘原理可得如下方程:

$$\mathbf{H}'^T \mathbf{P} \vec{\mathbf{V}}' = 0 \quad (39)$$

求解出基阵的安装平移偏差  $(D_x, D_y, D_z)^T$  后, 可进一步求解基阵的旋转偏差  $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 。设  $\vec{\mathbf{r}}_i$  为声信标位置的测量值, 则可得到:

$$\vec{\mathbf{r}}_{Ai} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}(h_i, p_i, r_i)(\vec{\mathbf{r}}_i - \vec{\mathbf{r}}_{Bi}) \quad (28)$$

定位观测方程为

$$\Delta \vec{\mathbf{r}}_{Bi} = \mathbf{R}^T(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} - \mathbf{R}(h_i, p_i, r_i)(\vec{\mathbf{T}} - \vec{\mathbf{r}}_{Bi}) \quad (29)$$

式中,  $\vec{\mathbf{T}}$  为目标的实际位置。

基阵旋转偏差的误差方程为

$$\mathbf{d} \vec{\mathbf{r}}_{Bi} = \mathbf{d}(\mathbf{R}^T(\alpha, \beta, \gamma)) \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} = (\mathbf{H}'_1, \mathbf{H}'_2, \mathbf{H}'_3) \begin{bmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{bmatrix} = \mathbf{H}' \begin{bmatrix} d\alpha \\ d\beta \\ d\gamma \end{bmatrix} \quad (30)$$

其中:

$$\mathbf{H}'_1 = \mathbf{Q}_1 \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} \quad (31)$$

$$\mathbf{H}'_2 = \mathbf{Q}_2 \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} \quad (32)$$

$$\mathbf{H}'_3 = \mathbf{Q}_3 \cdot \vec{\mathbf{r}}_{Ai} \quad (33)$$

$\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3$  定义如下:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} -\cos \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha - \cos \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha + \sin \gamma \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \sin \gamma \cos \beta & -\cos \alpha \cos \gamma \cos \beta \\ 0 & -\cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta + \cos \gamma \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & -\cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin \alpha \sin \beta & -\sin \gamma \cos \beta \sin \alpha & -\sin \alpha \cos \gamma \cos \beta \\ 0 & -\sin \alpha \cos \gamma \sin \beta - \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma \sin \beta - \cos \gamma \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (35)$$

由式(37)和式(39)可得:

$$\mathbf{H}'^T \mathbf{P} \vec{\mathbf{Q}}' - \mathbf{H}'^T \vec{\mathbf{L}}' = 0 \quad (40)$$

对所有的观测值, 一般认为都是等权观测的, 则

$$\vec{\mathbf{Q}}' = (\mathbf{H}'^T \mathbf{H}')^{-1} \mathbf{H}'^T \vec{\mathbf{L}}' \quad (41)$$

将矩阵  $\mathbf{H}'$  和  $\vec{\mathbf{L}}'$  代入式(41), 可求出修正值  $(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)^T$ , 进而根据下式, 可迭代计算出基阵的旋转偏差  $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ 。

$$\begin{cases} \alpha_m = \alpha_{m-1} + \Delta \alpha \\ \beta_m = \beta_{m-1} + \Delta \beta \\ \gamma_m = \gamma_{m-1} + \Delta \gamma \end{cases} \quad (42)$$

式中,  $m$  为迭代次数。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验总体方案

为验证本文的超短基线水声定位系统校准方法,项目组开展了湖上试验验证,试验系统组成及试验场景如图2和图3所示,试验水深约40 m。

试验时,试验船绕声信标缓慢绕圈航行,航速保持在2~3 kn范围内,绕圈半径控制在20 m左右。在试验船绕圈的过程中,声基阵向声信标发送声信号,声基阵收到应答信号后将声信号的往返时间反馈给综合处理计算机,综合处理计算机再结合声速剖面仪测量的声速数据计算声信标与声基阵之间的斜距。在声基阵每次发送声信号时,综合处理计算机同步采集该时刻声基阵的GPS位置及姿态。

最终将试验数据按第2章所描述的方法进行5次最小二乘法迭代修正。

#### 3.2 试验设备介绍

如图4所示,本次试验选用了英国Sonardyne公司研制的Scout+超短基线水声定位系统,其基阵内部带有5个声基元,其水声定位处理计算机在系统校准过程中可实时记录询问、应答信号以及试验船的轨迹和姿态信息<sup>[7]</sup>。



图4 Scout+超短基线水声定位系统

Fig. 4 Scout + USBL system

如图5所示,本次试验选用了法国iXSea公司研制的Octans光纤罗经。

如图6所示,本次试验选用NAVCOM公司的SF-3050星基差分GPS接收机。



图5 Octans 光纤罗经

Fig. 5 Octans fiber compass



图6 SF-3050 GPS 接收机

Fig. 6 SF-3050 GPS Receiver

如图7所示,本次试验所使用的声速剖面仪为海鹰加科公司的HY1200A型声速剖面仪。



图7 HY1200A 型声速剖面仪

Fig. 7 HY1200A Sound velocity profiler

#### 3.3 试验数据坐标转换方法<sup>[8]</sup>

校准过程中需采集声基阵的GPS坐标及艏向、横滚和俯仰角度,以及系统对声信标单次定位的GPS坐标。使用本方法进行校准时,需将WGS84格式的GPS坐标转换为UTM网格坐标,具体转换方法如下:

假设 $f$ 为地球扁率,其计算公式为

$$f = (a - b) / a \quad (43)$$

式中: $a$ 为地球赤道半径(长半轴长),计算时取6 378 137 m; $b$ 为地球极半径(短半轴长),计算

时取 6 356 752 m。

地球偏心率  $e$  的计算方法见下式:

$$e = \sqrt{2f - f^2} \quad (44)$$

坐标转换过程中的中间参数计算方法见式

(45) – (50):

$$T = \tan^2 \varphi \quad (45)$$

$$C = e^2 \cos^2 \varphi / (1 - e^2) \quad (46)$$

$$A = (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi \quad (47)$$

$$v = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \quad (48)$$

$$e' = \sqrt{e^2 (1 - e^2)} \quad (49)$$

$$M = a[(1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256)\varphi - (3e^2/8 + 3e^4/32 + 45e^6/1024)\sin 2\varphi + (15e^4/256 + 45e^6/1024)\sin 4\varphi - (35e^6/3072)\sin 6\varphi]$$

(50)

式中:  $\lambda$  为 WGS84 坐标经度值;  $\lambda_0$  为待转换坐标所在经度区带的中央子午线经度值;  $\varphi$  为 WGS84 坐标纬度值。 $\lambda$ 、 $\lambda_0$  和  $\varphi$  在计算时单位均为弧度, 在北半球时,  $\varphi$  为正; 在南半球时,  $\varphi$  为负。在东半球时,  $\lambda$  和  $\lambda_0$  为正, 在西半球时,  $\lambda$  和  $\lambda_0$  为负。

UTM 东向坐标计算方法见式 (51):

$$E = FE + k_0 v [A + (1 - T + C)A^3 / 6 + (5 - 18T + T^2 + 72C - 58e'^2)A^5 / 120] \quad (51)$$

式中:  $E$  为 UTM 东向坐标, m;  $FE$  为东向坐标偏移量, 500 000 m;  $k_0$  为地球子午线比例系数, 取值为 0.999 6;  $T$ 、 $C$ 、 $A$ 、 $v$  和  $e'$  的计算方法见式 (45) –

(49)。

UTM 北向坐标计算方法见式 (52):

$$N = FN + k_0 \{M + v \tan \varphi [A^2 / 2 + (5 - T + 9C + 4C^2)A^4 / 24 + (61 - 58T + T^2 + 600C - 330e'^2)A^6 / 720]\}$$

(52)

式中:  $N$  为 UTM 北向坐标, m;  $FN$  为北向坐标偏移量, 北半球为 0, 南半球为 10 000 000 m;  $M$  的计算方法见式 (50)。

通过以上变换, 即可将 WGS84 坐标转换为 UTM 网格坐标, 转换后东向坐标  $E$  和北向坐标  $N$  等同于第 2 章中所描述的  $X$  和  $Y$ 。

### 3.4 试验数据分析

本次试验在绕圈 1 周的过程中一共记录了 273 组数据, 表 1 为在一个圆周内均匀抽样的 20 组抽样数据。

表 2 为对 273 组数据进行最小二乘法迭代修正的结果, 迭代次数为 5 次,  $\Delta X$  为 GPS 天线与声基阵沿船体坐标系船正横方向的偏移修正值,  $\Delta Y$  为 GPS 天线与声基阵沿船体坐标系船轴线方向的偏移修正值,  $\Delta \alpha$  为航向姿态测量仪与基阵的艏向偏移修正值,  $\Delta \beta$  为航向姿态测量仪与基阵的横滚偏移修正值,  $\Delta \gamma$  为航向姿态测量仪与基阵的俯仰偏移修正值。

采用圆概率误差分析法对试验数据进行分析<sup>[9]</sup>, 表 3 为本次试验结果的统计分析, 对同一统计项, 校准后圆概率误差半径比校准前有明显减小, 这说明校准后的信标测量位置越来越收敛。

表 1 试验抽样数据  
Table 1 Test sample data

| 序号 | 试验船位置     |             | 声基阵姿态  |        |        | 基阵与信标<br>斜距/m | 单次测量声信标位置 |             |      |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|---------------|-----------|-------------|------|
|    | 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 艏向/(°) | 横滚/(°) | 俯仰/(°) |               | 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 深度/m |
| 1  | 594 197.2 | 3 432 107.9 | 0.6    | -2.3   | 1.9    | 42.5          | 594 205.3 | 3 432 102.2 | 41.3 |
| 2  | 594 190.6 | 3 432 094.4 | 18.7   | 3.5    | 1.6    | 44.5          | 594 205.4 | 3 432 102.1 | 41.3 |
| 3  | 594 194.0 | 3 432 085.4 | 37.1   | 2.8    | -0.8   | 46.1          | 594 205.6 | 3 432 102.3 | 41.3 |
| 4  | 594 210.3 | 3 432 077.9 | 54.3   | -1.7   | -2.5   | 48.4          | 594 205.3 | 3 432 102.8 | 41.2 |
| 5  | 594 227.7 | 3 432 101.3 | 73.1   | 3.7    | -3.0   | 47.0          | 594 204.8 | 3 432 102.1 | 41.1 |
| 6  | 594 220.8 | 3 432 115.7 | 91.5   | -4.2   | 1.7    | 46.1          | 594 205.0 | 3 432 102.0 | 41.1 |
| 7  | 594 212.3 | 3 432 121.2 | 109.8  | -1.4   | 1.3    | 45.9          | 594 205.4 | 3 432 101.9 | 41.1 |

表 1 (续)

| 序号 | 试验船位置     |             | 声基阵姿态  |        |        | 基阵与信标<br>斜距/m | 单次测量声信标位置 |             |      |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|---------------|-----------|-------------|------|
|    | 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 艏向/(°) | 横滚/(°) | 俯仰/(°) |               | 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 深度/m |
| 8  | 594 199.9 | 3 432 117.9 | 127.6  | -2.5   | -0.9   | 44.4          | 594 205.6 | 3 432 102.2 | 41.1 |
| 9  | 594 192.4 | 3 432 108.0 | 145.7  | 2.5    | -0.3   | 43.5          | 594 205.5 | 3 432 102.5 | 41.1 |
| 10 | 594 195.3 | 3 432 097.0 | 163.4  | 2.1    | 0.5    | 42.7          | 594 205.2 | 3 432 102.6 | 41.1 |
| 11 | 594 203.7 | 3 432 088.5 | 181.2  | 0.3    | 2.9    | 43.5          | 594 205.2 | 3 432 102.5 | 41.1 |
| 12 | 594 212.9 | 3 432 089.2 | 199.9  | -0.4   | 3.6    | 44.0          | 594 204.9 | 3 432 102.5 | 41.2 |
| 13 | 594 217.9 | 3 432 103.6 | 217.0  | -2.6   | 4.2    | 43.2          | 594 204.9 | 3 432 102.2 | 41.2 |
| 14 | 594 213.2 | 3 432 114.0 | 235.6  | 0.9    | -2.7   | 43.6          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |
| 15 | 594 200.6 | 3 432 115.2 | 253.8  | 1.1    | -1.3   | 43.4          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |
| 16 | 594 218.2 | 3 432 106.9 | 271.2  | -1.7   | 3.8    | 43.5          | 594 205.0 | 3 432 102.2 | 41.2 |
| 17 | 594 193.0 | 3 432 085.6 | 289.4  | 2.5    | 2.1    | 46.0          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |
| 18 | 594 208.2 | 3 432 115.9 | 307.5  | 2.6    | -2.8   | 43.5          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |
| 19 | 594 209.4 | 3 432 115.7 | 325.9  | -3.8   | 3.5    | 43.6          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |
| 20 | 594 214.9 | 3 432 112.8 | 343.8  | -1.2   | -1.0   | 43.6          | 594 205.1 | 3 432 102.1 | 41.2 |

表 2 最小二乘法迭代修正结果

Table 2 Results of least squares iterative correction

| 信标初始位置    |             |      | 迭代<br>次数 |                     |                     |                         |                        |                         | 信标位置修正值   |             |      |
|-----------|-------------|------|----------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-----------|-------------|------|
| 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 深度/m |          | $\Delta X/\text{m}$ | $\Delta Y/\text{m}$ | $\Delta\alpha/(^\circ)$ | $\Delta\beta/(^\circ)$ | $\Delta\gamma/(^\circ)$ | 东向坐标/m    | 北向坐标/m      | 深度/m |
| 594 205.3 | 3 432 102.2 | 41.3 | 5        | 0.06                | -0.03               | -1.07                   | 0.85                   | -0.33                   | 594 205.1 | 3 432 102.0 | 41.2 |

表 3 试验数据圆概率误差统计分析

Table 3 Statistical analysis of circle probability error of test data

| 统计项                             | 校准前圆概率<br>误差半径/m | 校准后圆概率<br>误差半径/m |
|---------------------------------|------------------|------------------|
| 偏离圆心概率 39.4% ( $1\sigma$ )      | 0.9              | 0.2              |
| 偏离圆心概率 50% (CEP)                | 1.0              | 0.2              |
| 偏离圆心概率 63.2% ( $1\text{Drms}$ ) | 1.1              | 0.3              |
| 偏离圆心概率 86.5% ( $2\sigma$ )      | 1.2              | 0.4              |
| 偏离圆心概率 98.2% ( $2\text{Drms}$ ) | 1.5              | 0.8              |

图 8 为试验船的轨迹图,图 9 为校准前信标测量位置的分布情况。以校准后  $2\sigma$  圆心偏离概率误差半径 0.4 m 为统计区间,来计算校准前的信标测量位置分布密度(如图 10 所示),可见校准前在该区域的信标测量位置分布密度较低,最高不超过 9%。图 11 为校准后信标测量位置的分布情况。以校准后  $2\sigma$  圆心偏离概率误差半径 0.4 m 为统计区

间,来计算校准后的信标测量位置分布密度(如图 12 所示)。可见校准后在该区域的信标测量位置分布密度较高,最高可超过 40%,这也同样说明校准后的信标测量位置越来越收敛。

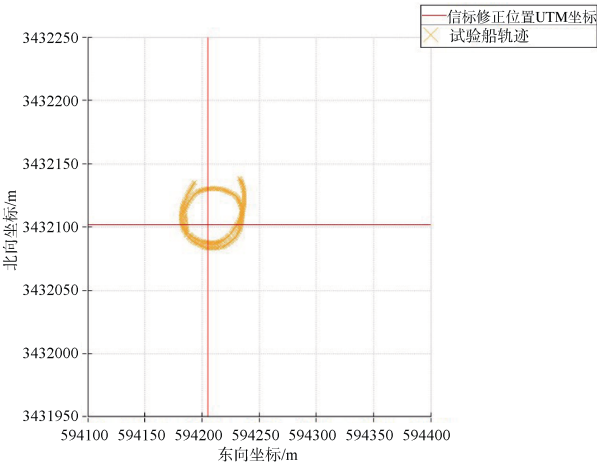


图 8 试验船轨迹

Fig. 8 Trajectory of test boat



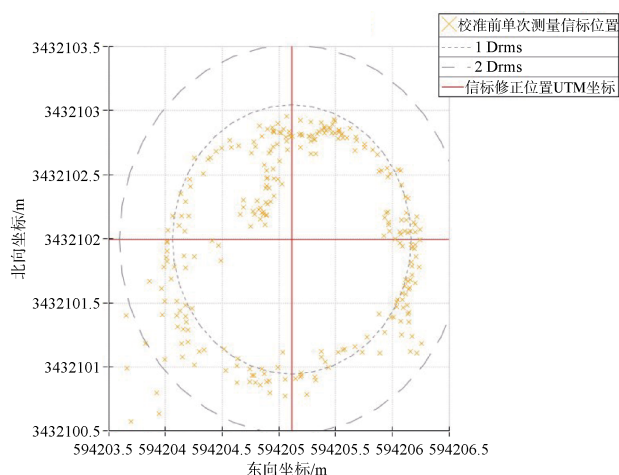


图9 校准前信标测量位置分布

Fig. 9 Distribution of measured beacon positions before calibration

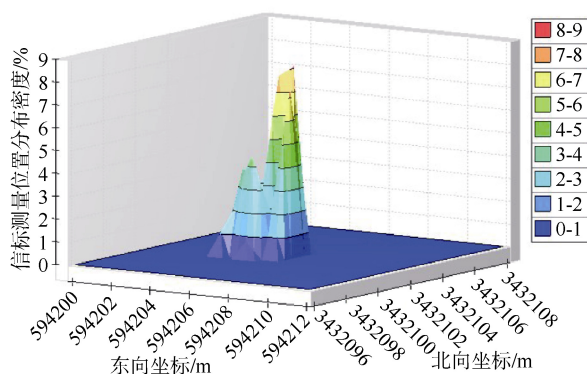


图10 校准前信标测量位置分布密度

Fig. 10 Distribution density of measured beacon positions before calibration

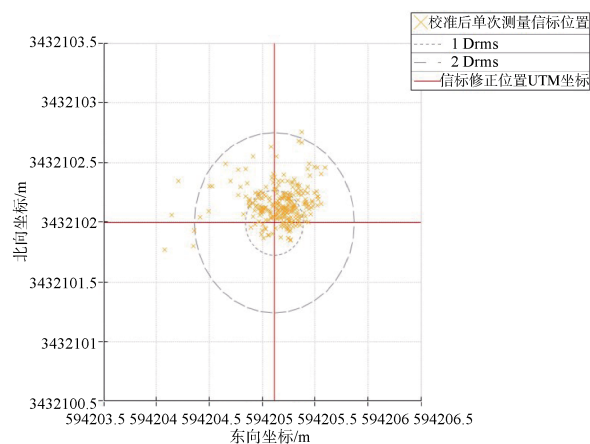


图11 校准后信标测量位置分布

Fig. 11 Distribution of measured beacon positions after calibration

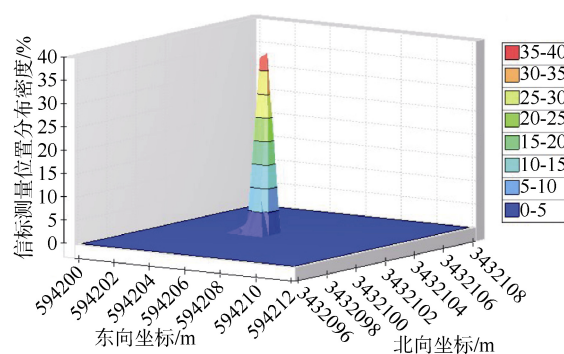


图12 校准后信标测量位置分布密度

Fig. 12 Distribution density of measured beacon positions after calibration

## 4 结束语

本文以水声定位原理为基础, 重点介绍了基于最小二乘法迭代修正的超短基线水声定位系统校准方法, 该方法以最小二乘法为基本原理, 通过多次迭代修正的方式, 修正基阵与 GPS 天线之间的平移偏差以及基阵与航向姿态测量仪之间的旋转偏差。通过湖上试验, 验证了该方法可显著提高系统的定位精度。

## 参考文献

- [1] 钱洪宝, 孙大军. 水声定位系统现状[J]. 声学技术, 2016, 30 (3): 389-391.
- [2] 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.
- [3] OPDERBECKE. At-sea calibration of a USBL underwater vehicle positioning system[C]// OCEAN'97 MTS/IEEE Conference Proceedings. Europe: IEEE, 1997.
- [4] 冯守珍, 吴永亭, 唐秋华. 超短基线声学定位原理及其应用[J]. 海洋工程, 2002, 21 (4): 13-18.
- [5] 范赞. 一种改进型声线修正算法在超短基线定位系统上的应用[J]. 声学与电子工程, 2015 (2): 22-24.
- [6] 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, 25 (4): 281-287.
- [7] 张志博, 陈新华, 孙长瑜, 等. Sonardyne 浅水声学定位系统概述[C]// 中国科学院声学研究所纪念建所 50 周年暨第五届学术交流会. 北京: 中国科学院, 2014.
- [8] GUIDANCE G. Surveying and positioning coordinate conversions and transformations including formulas[M]. London: International Association of Oil & Gas Producers, 2009.
- [9] 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.

(责任编辑: 肖楚楚)