

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311764

# 基于无人艇载侧扫声呐的水下目标定位方法研究

左震, 黄泓赫, 孙备, 吴鹏  
(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

**摘要:**水下目标高精度定位是无人艇开展海底测绘、航道清理、沉船打捞等任务的重要前提。然而,现有的基线式定位方法无法对未知水域内的目标进行精确定位。实际任务中,无人艇往往需要搭载侧扫声呐并辅以其他手段来确定水下目标的准确位置。针对无人艇水下目标定位难题,首先对侧扫声呐水下目标定位过程进行建模,然后分析姿态误差对水下目标定位造成的影响,利用姿态矫正矩阵消除姿态误差,最后利用离散卡尔曼滤波算法对多点测量数据进行最优估计,得到水下目标的精确位置。仿真实验和无人艇集成实验结果表明,该定位方法能够有效的减小测量过程中的误差,平均定位精度达到0.334 m。

**关键词:**水下目标定位;离散卡尔曼滤波;侧扫声呐;无人艇

**中图分类号:** TP391.4 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

## Research on underwater target location based on side-scan sonar carried by unmanned surface vehicle

Zuo Zhen, Huang Honghe, Sun Bei, Wu Peng

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** High-precision positioning of underwater targets is an important prerequisite for unmanned surface vehicle (USV) to carry out tasks, such as seabed mapping, channel cleaning, and wreck salvage. However, the existing baseline positioning methods cannot accurately locate the targets in unknown waters. In practical tasks, USV needs to be equipped with side-scan sonar and supplemented by other means to determine the accurate position of underwater targets. In this article, aiming at the underwater target localization problem of the unmanned boat, we first model the underwater target localization process of side-scan sonar. Then, the influence of attitude error on underwater target positioning is analyzed, and the attitude error is eliminated by using an attitude correction matrix. Finally, the discrete Kalman filter algorithm is used to optimally estimate the multi-point measurement data and get the accurate position of the underwater target. The results of simulation experiments and USV integration tests show that the proposed method can effectively reduce the systematic errors in the measurement process and the average positioning accuracy reaches 0.334 m

**Keywords:** underwater target location; discrete kalman filter; side-scan sonar; unmanned surface vehicle

## 0 引言

无人艇是一种具备自主导航、自主避障和自主探测目标区域环境信息等功能的特殊水面无人平台<sup>[1]</sup>。作为海上无人系统的代表性装备,无人艇在海底测绘、航道清理、沉船打捞和反潜排雷等军民领域发挥巨大的应用价值<sup>[2-4]</sup>。在这些任务中,无人艇往往需要对目标水域进行工前扫海测量、水下目标的探测,为后期的施工展布、目标打捞及清除提供准确的位置信息<sup>[5]</sup>。

水下目标定位的精准定位是无人艇水下目标探测的重要环节。目前较为成熟的水下定位系统主要依托提前铺设基线的方法展开<sup>[6-8]</sup>。但是,基线式定位方法无法满足未知水域内的水下目标定位要求。因此,在实际任务中,无人艇通常搭载侧扫声呐来完成水下目标定位。侧扫声呐按其固定方式可分为拖曳式和固定式两种<sup>[9]</sup>。拖曳式侧扫声呐会受到船速、风浪、海水流速及流向的影响,其在水中的位置和姿态信息难以实时获取,无法满足水下目标精确定位的要求<sup>[10]</sup>;固定式侧扫声呐往往与测量船体固定,艇体的姿态变化会直接导致侧扫声呐发射

信号角度的变化,导致目标在声纳图像中的位置出现一定的偏差。因此,如何利用侧扫声纳精确定位水下目标是水下目标探测技术的关键。杨立文等<sup>[11]</sup>对拖曳式侧扫声纳水下目标定位方法进行了优化,将侧扫声纳和超短基线定位设备同时安装在测量船上,超短基线的水下定位信标固定在侧扫声纳上,为侧扫声纳提供更加准确的定位信息。马国军等<sup>[12]</sup>构建了一套基于侧扫声纳的海底目标定位系统,该系统将侧扫声纳固定安装于测量船体外侧,利用侧扫声纳成像原理解算物体相对于侧扫声纳的位置,并结合声纳源 GPS 坐标、水深距离、船体姿态等参数,计算海底目标与声纳的相对位置,从而得到海底目标的位置信息。潘树文等<sup>[13]</sup>在使用侧扫声纳和超短基线定位方法的基础上,利用图像降噪技术对侧扫声纳图像质量进行优化,减小成像误差,提高定位精度。

综上所述,为提高侧扫声纳对水下目标的定位精度,通常需要联合 GPS、姿态传感器等传感器或超短基线定位系统。但是,由于海底的不平整,水下目标定位过程中侧扫声纳测得的海底深度与目标所在海底深度并不一致,所以单一位置的测量结果往往存在较大的误差。因此,本文从侧扫声纳的成像原理出发,分析侧扫声纳姿态变化对水下目标定位的影响,利用姿态修正矩阵减小姿态变化影响。然后,采用多方向探测的方法对同一目标进行多次位置计算。最后,利用离散卡尔曼滤波算法对多次计算值进行最优估计。仿真实验和无人艇集成实验结果表明,离散卡尔曼滤波算法能够有效的减小测量过程中的误差,大幅提高定位精度。

## 1 侧扫声纳水下目标定位模型

### 1.1 水下目标位置计算

在航道清理、沉船打捞等绝大多数水下目标探测任务中,水下目标都处于海底位置,因此在本文的水下目标仅为海底目标。侧扫声纳对海底目标进行定位的原理示意图如图 1 所示。

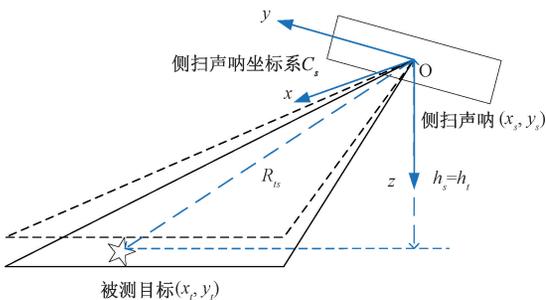


图 1 侧扫声纳定位水下目标原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of side-scan sonar positioning underwater target

设侧扫声纳在世界坐标系的位置信息为  $X_s = [x_s, y_s, h_s]$ 。其中,世界坐标系选取北东地坐标系,则  $x_s$  和  $y_s$  分别代表侧扫声纳的纬度和经度,  $h_s$  为声纳距海底平面的高度。以侧扫声纳中心为原点,水平面上航行方向为  $y$  轴,与航行方向垂直的方向左侧为  $x$  轴,  $z$  轴与  $x$  轴和  $y$  轴成右手定则关系,建立声纳坐标系  $C_s$ 。则目标相对于声纳的位置信息  $X_{st} = [x_{st}, y_{st}, z_{st}]^T$  为:

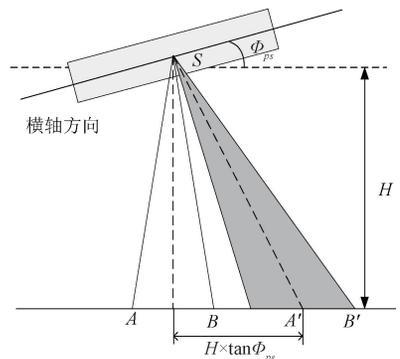
$$X_{st} = \begin{bmatrix} x_{st} \\ y_{st} \\ h_{st} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{R_{st}^2 - h_{st}^2} \\ 0 \\ h_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $x_{st}, y_{st}$  代表目标在声纳坐标系中的坐标信息;  $R_{st}$  为侧扫声纳发射声波的倾斜距离,可从侧扫声纳图像中直接获取。由于侧扫声纳在航行方向上发射的信号较窄,因此目标在声纳坐标系  $y$  轴上的坐标  $y_{st}$  近似等于 0,即  $y_{st} \approx 0$ 。  $h_{st}$  代表目标距侧扫声纳的垂直距离,本文可近似等于侧扫声纳距海底平面的高度  $h_s$ ,即  $h_{st} = h_s$ 。

### 1.2 声纳坐标系修正

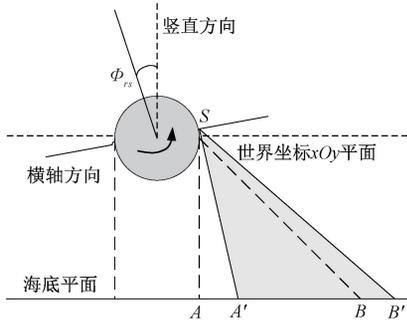
在水下目标定位测量过程中,无人艇作为侧扫声纳的载体,其容易受到浪涌的影响而出现复杂的姿态变化。艇体的姿态变化可分解为无人艇在世界坐标系  $C_n$  下的俯仰角  $\Phi_{ps}$ 、横滚角  $\Phi_{rs}$  和偏航角  $\Phi_{ys}$ <sup>[14]</sup>。其中,  $\Phi_{ps}$  为声纳坐标系  $y$  轴与世界坐标系  $xOy$  平面的夹角,向上为正;  $\Phi_{rs}$  为声纳坐标系  $x$  轴与世界坐标系  $xOy$  平面的夹角,向上为正;  $\Phi_{ys}$  为声纳坐标系  $y$  轴与世界坐标系  $yOz$  平面的夹角,向右为正。如图 2 所示,俯仰角、横滚角和偏航角均会导致声纳坐标系  $C_s$  和声纳的成像范围出现一定的变化。因此,仅根据声纳在世界坐标系下的坐标信息和目标与声纳之间的相对位置解算海底目标的实际坐标必然存在一定的偏差。

为了消除姿态变化对定位精度的影响,本文利用姿态校正矩阵对声纳坐标系进行修正。姿态校正的原理如图 3 所示,当坐标系  $X_1OY_1$  逆时针旋转  $\alpha$  得到坐标系  $X_2OY_2$  时,



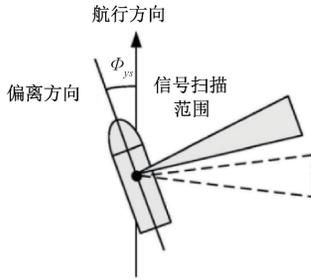
(a) 俯仰角对侧扫声纳扫描范围的影响

(a) Influence of pitch angle on scanning range of side-scan sonar



(b) 横滚角对侧扫声呐扫描范围的影响

(b) Influence of roll angle on scanning range of side-scan sonar



(c) 偏航角对侧扫声呐扫描范围的影响

(c) Influence of yaw angle on scanning range of side-scan sonar

图2 姿态变化对侧扫声呐扫描范围的影响

Fig. 2 Influence of attitude change on scanning range of side-scan sonar

$$T_s = T_y \cdot T_p \cdot T_r = \begin{bmatrix} \cos \Phi_{ys} & \sin \Phi_{ys} & 0 \\ -\sin \Phi_{ys} & \cos \Phi_{ys} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi_{ps} & \sin \Phi_{ps} \\ 0 & -\sin \Phi_{ps} & \cos \Phi_{ps} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Phi_{rs} & 0 & -\sin \Phi_{rs} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Phi_{rs} & 0 & \cos \Phi_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Phi_{ys} \cos \Phi_{rs} & \sin \Phi_{ys} \cos \Phi_{rs} & \sin \Phi_{ys} \sin \Phi_{rs} \cos \Phi_{ps} - \sin \Phi_{rs} \cos \Phi_{ps} \\ -\sin \Phi_{ys} \cos \Phi_{rs} & \cos \Phi_{ys} \cos \Phi_{rs} & \cos \Phi_{ys} \sin \Phi_{rs} \cos \Phi_{ps} + \sin \Phi_{rs} \sin \Phi_{ps} \\ \cos \Phi_{ps} \sin \Phi_{rs} & -\sin \Phi_{ps} & \cos \Phi_{ps} \cos \Phi_{rs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用校正矩阵  $T_s$  对声呐坐标系  $C_s$  进行校正后,水下目标在声呐坐标系中的位置  $X'_{st} = [x'_{st}, y'_{st}, h'_{st}]^T$  为:

$$X'_{st} = \begin{bmatrix} x'_{st} \\ y'_{st} \\ h'_{st} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_{st} \\ y_{st} \\ h_{st} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $x'_{st}$ 、 $y'_{st}$  代表姿态矩阵修正后目标在声呐坐标系中的坐标信息;  $h'_{st}$  代表姿态矩阵修正后目标至声呐的垂直距离。

### 1.3 坐标系转换

在对声呐坐标系修正后,声呐坐标系的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴分别与世界坐标系的北轴、东轴和地轴平行。此时,水下目标在世界坐标系  $C_n$  中的位置  $X_t = [x_t, y_t, h_t]^T$  为:

$$X_t = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ h_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{st} \\ y'_{st} \\ h'_{st} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

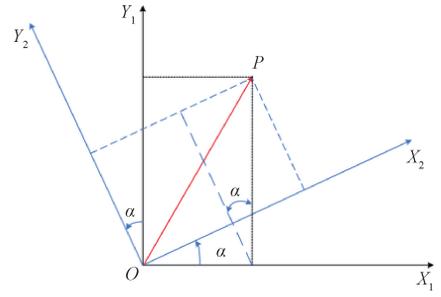
图3 坐标系偏转时目标的坐标变化  $z$ 

Fig. 3 Change of coordinate when coordinate system deflects

目标  $P(x_1, y_1)$  在新的坐标系下的坐标  $(x_2, y_2)$  为:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $T$  为坐标变换矩阵。

在侧扫声呐水下目标定位过程中,侧扫声呐坐标系  $C_s$  的变化可分解为3个方向的坐标系旋转,其中俯仰角  $\Phi_{ps}$  是  $C_s$  绕自身  $x$  轴旋转而得,横滚角  $\Phi_{rs}$  是  $C_s$  绕自身  $y$  轴旋转而得,偏航角  $\Phi_{ys}$  是  $C_s$  绕自身  $z$  轴旋转而得。因此姿态校正矩阵由偏航修正矩阵  $T_y$ 、俯仰修正矩阵  $T_p$  和横滚修正矩阵  $T_r$  3部分相乘得到。为确保姿态校正矩阵的唯一性,按照偏航修正、俯仰修正和横滚修正的顺序进行变换,则校正矩阵  $T_s$  的计算方法为:

式中:  $x_t$  和  $y_t$  代表水下目标的经纬度信息;  $h_t$  为目标至侧扫声呐的高度。

## 2 基于离散卡尔曼滤波的多点定位

尽管姿态校正矩阵有效地消除了无人艇姿态变化对水下目标定位的影响,但是在实际测量过程中,仍存在许多随机误差无法消除。因此,本文采用多点定位的方法来减小随机误差,并利用离散卡尔曼滤波对多点测量数据进行处理。

### 2.1 离散卡尔曼滤波状态方程的建立

侧扫声呐水下目标定位过程中,通过在不同位置对目标进行定位,获取多组测量数据。每组数据包括侧扫声呐的位置信息  $X_s = [x_s, y_s, h_s]^T$ ,经姿态校正矩阵修正后水下目标在声呐坐标系的坐标向量  $X'_{st} = [x'_{st}, y'_{st}, h'_{st}]^T$ ,侧扫声呐姿态变化所造成的  $\Phi_{ps}$ 、

$\Phi_{rs}$ 、 $\Phi_{ys}$ 。离散卡尔曼滤波处理多点测量值时的状态方程为:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{X} = [x_T, y_T]^T$  为被估计状态变量, 表示被测水下目标在世界坐标系下的经纬度信息;  $\Phi_{k,k-1}$  表示  $t_{k-1}$  时刻至  $t_k$  的一步预测矩阵;  $\Gamma_{k-1}$  为噪声驱动矩阵;  $\mathbf{W}_{k-1}$  为激励噪声。由于被测水下目标的位置不变, 因此

$\Phi_{k,k-1}$  为:

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.2 离散卡尔曼滤波状态方程的更新

在水下目标多点定位的过程中, 侧扫声呐在不同位置测得新的测量之后, 离散卡尔曼滤波算法的状态方程

都会进行更新。系统的量测方程如下:

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu} \\ \boldsymbol{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{X}_k, \boldsymbol{\Theta}_k) \\ h_2(\mathbf{X}_k, \boldsymbol{\Theta}_k) \end{bmatrix} + \mathbf{V}_k \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{Z}_k = [\boldsymbol{\mu} \ \boldsymbol{\nu}]^T$  为量测向量,  $\boldsymbol{\mu}$  和  $\boldsymbol{\nu}$  表示被测目标在世界坐标系下相对于侧扫声呐的方位和俯仰向量;  $h(\mathbf{X}_k, \boldsymbol{\Theta}_k)$  可由姿态传感器传感器测量得到,  $\boldsymbol{\Theta}_k = [x_s, y_s, h_s, \Phi_{ps}, \Phi_{rs}, \Phi_{ys}]^T$ ;  $\mathbf{V}_k$  是量测误差, 服从正态分布。

观测矩阵  $\mathbf{H}$  的计算方法如下:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_p} & \frac{\partial h_1}{\partial y_p} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_p} & \frac{\partial h_2}{\partial y_p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

基于上述量测方程和状态方程, 根据给定的状态变量的初值和  $k$  时刻的量测值  $\mathbf{Z}_k$ , 就可以计算出  $k$  时刻的状态估计  $\mathbf{X}_k$ 。整个算法流程如图 4 所示。

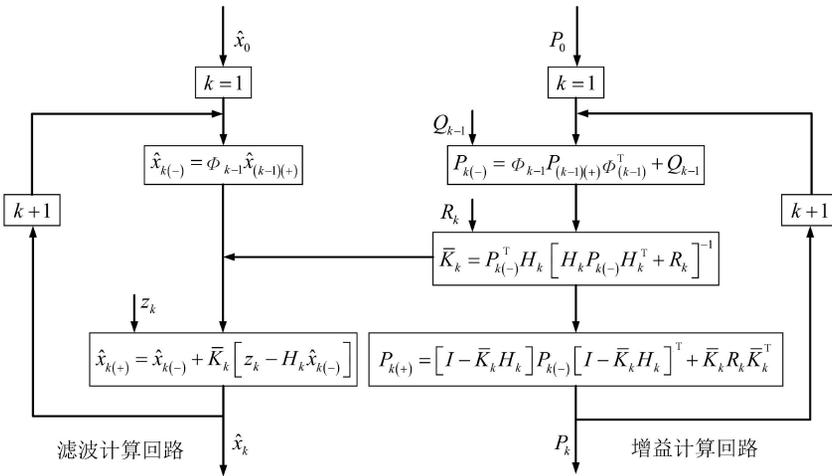


图 4 离散卡尔曼滤波算法流程

Fig. 4 Flow chart of discrete Kalman filter algorithm

## 3 仿真实验

### 3.1 蒙特卡洛仿真实验设置

蒙特卡洛方法又称随机模拟法, 通过计算机产生符合条件的随机数据, 用于模拟实际的实验数据<sup>[15]</sup>。基于蒙特卡洛方法的侧扫声呐水下目标定位误差仿真过程如下。

1) 参数初始化设置。如图 5 所示, 设待测目标在世界坐标系下的坐标为(0,0,200), 且保持不变。无人艇以被测目标为中心, 以正方形轨迹绕目标观测, 其测量数据的位置点为正方形每一边的中点。

2) 利用蒙特卡洛方法生成正态分布随机误差序列。根据侧扫声呐水下目标定位存在的实际误差, 利用蒙特卡洛方法生成侧扫声呐经度误差、纬度误差、距海底平

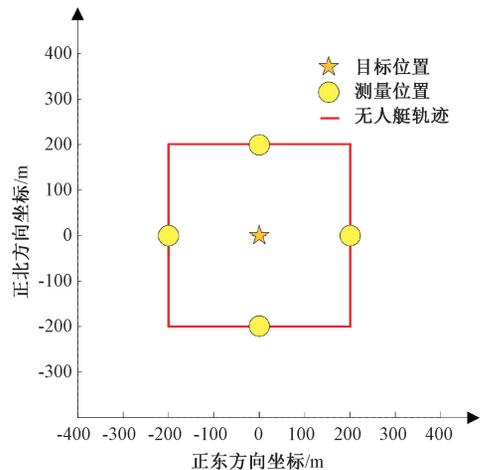


图 5 仿真实验初始化设置

Fig. 5 Initialization setting of simulation experiment

面的高度误差和无人艇俯仰角误差、横滚角误差、偏航角误差,所引入的误差序列大小如表1所示。

表1 误差序列分布大小

Table 1 Magnitude of error sequence

误差类型	误差分布	误差大小
侧扫声呐经度	正态分布	0.000 005°
侧扫声呐纬度	正态分布	0.000 005°
侧扫声呐距海底的高度	正态分布	0.05 m
无人艇俯仰角	正态分布	0.3°
无人艇横滚角	正态分布	0.3°
无人艇偏航角	正态分布	0.3°

3) 结合产生的误差分布序列求解得到目标点的位置。

4) 进行多次循环仿真,得到多组测量数据,求解目标位置的最优估计值。

实验共进行20次循环,得到80个测量值,利用离散卡尔曼滤波算法对80个测量值进行处理,以减小单点测量的误差,得到目标位置的估计值。多点定位仿真实验结果如图6所示。仿真结果表明,与单点定位结果的散布特征相比,利用离散卡尔曼滤波算法得到的水下目标位置估计值大幅接近真值。

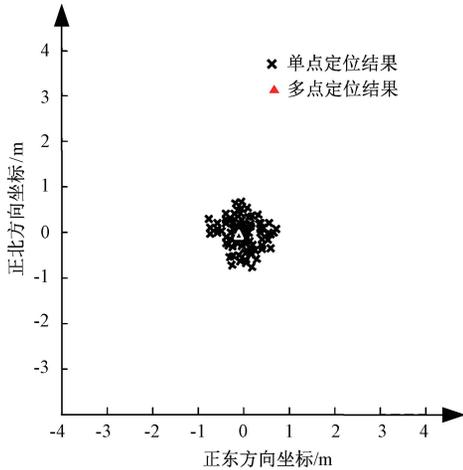


图6 仿真实验结果

Fig. 6 Results of simulation experiment

### 3.2 实验结果分析

为了定量分析离散卡尔曼滤波算法的有效性,本文使用最小二乘估计、极大似然估计、维纳滤波3种最优估计方法与离散卡尔曼滤波进行对比。从两个角度对实验结果进行分析,多点定位结果与真实坐标间的差值大小以及误差收敛过程。

#### 1) 多点定位结果对比

在仿真实验中,目标的真实坐标设为(0,0,200),4种方法对仿真数据的处理结果如图7所示。

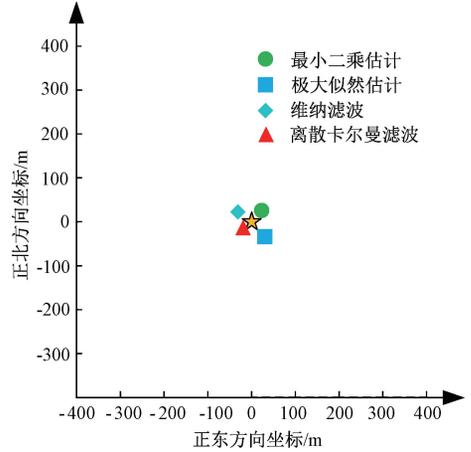


图7 不同方法对仿真数据的处理结果

Fig. 7 Results of simulation data processing by different methods

由图7可知,离散卡尔曼滤波算法对目标位置的估计值与目标的真实坐标最为接近,其定量实验结果如表2所示。

表2 仿真实验定量结果

Table 2 Quantitative results of simulation experiment

	m			
所使用方法	经度估计值	纬度估计值	深度估计值	误差 $\Delta$
最小二乘估计	0.13	0.18	200.4	0.457 5
极大似然估计	0.16	-0.21	200.2	0.331 2
维纳滤波	-0.22	0.12	199.99	0.250 8
离散卡尔曼滤波	<b>-0.09</b>	<b>-0.05</b>	<b>200.1</b>	<b>0.143 5</b>

其中,误差 $\Delta$ 的计算方法如式(10)所示。由表2可知,在4种最优估计算法中,离散卡尔曼滤波算法对多点信息进行处理得到的目标位置估计值与目标真实位置之间的误差最小,优于其他3种估计方法。

$$\Delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (10)$$

#### 2) 误差收敛过程对比

为定量分析误差收敛的过程,进一步对位置估计值在向东和北向两个方向上的收敛特征进行仿真分析,收敛过程如图8和9所示。

由图8和9可知,在离散卡尔曼滤波算法中,目标估计点的正东方向坐标和正北方向坐标在第20个观测点左右就开始收敛,其收敛速度最快;且当整个观测过程结束时,离散卡尔曼滤波的收敛值最小,这意味着离散卡尔曼滤波处理多点信息时的误差最小。

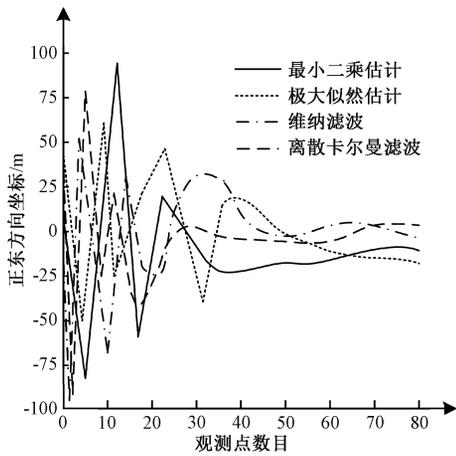


图 8 东向误差收敛过程

Fig. 8 Error convergence course on east coordinate

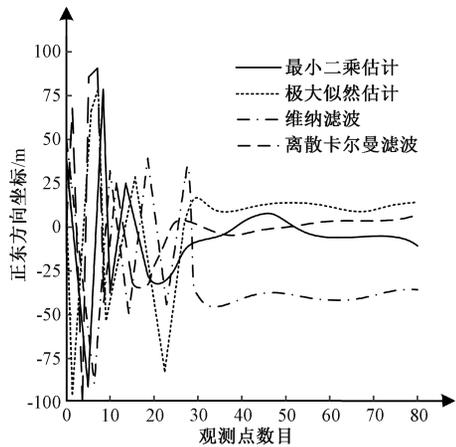


图 9 北向误差收敛过程

Fig. 9 Error convergence course on north coordinate

### 4 无人艇集成实验

为验证本文提出方法的合理性,搭建了一套以无人艇为载体的水下目标定位系统,并在长沙月湖水域进行了实验验证。

#### 4.1 实验平台搭建

水下目标定位系统主要由无人艇平台、艇载传感器和岸上平台 3 部分组成。

##### 1) 无人艇平台

为完成水下目标探测任务,将所用传感器高效集成,本文设计了一款小型双体无人艇,其主要结构如图 10 所示。无人艇平台主要由艇载电源、主控系统、推进系统、艇载传感器、感知平台和通信系统 6 部分组成。其中艇载电源对外提供 48 V 20 A、24 V 10 A 和 12 V 5 A 3 种不同的供电接口,以便为不同的艇载传感器供电;主控系统

由 USVCSV 控制板实现,用于接收艇载传感器回传的数据;推进系统由两个 KOY-20T 的水下推进器组成,通过双桨差分的方法实现对无人艇的控制;艇载传感器用于采集无人艇周围环境信息;感知平台用于对传感器采集的数据进行分析处理;通信电台用于实现无人艇与上位机之间的信息通信。

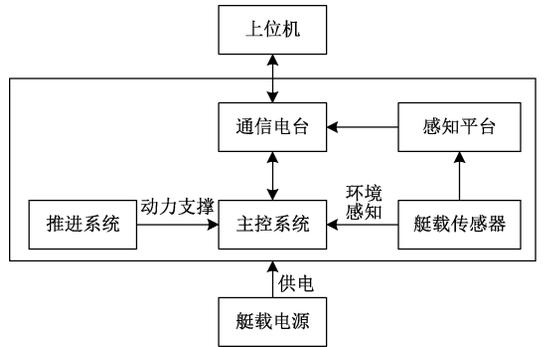


图 10 无人艇平台结构

Fig. 10 The composition of USV platform

无人艇可通过遥控器进行控制,也可通过上位机利用无人艇控制软件进行控制。如图 11 所示,无人艇控制软件利用 LabVIEW 编译,可随时获取无人艇的控制权,调节左右电机的正反转速度。此外软件右侧还可以实时显示无人艇航行过程中的 GPS 信息以及姿态变化。

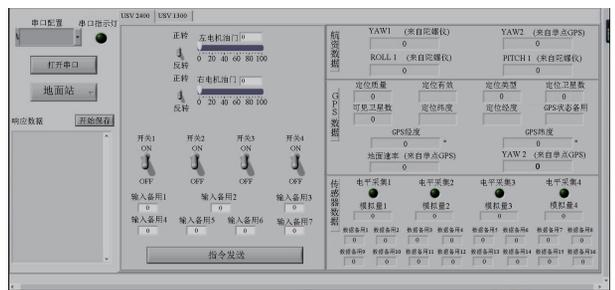


图 11 无人艇控制软件

Fig. 11 Control software of USV

##### 2) 艇载传感器集成

如图 12 所示,艇载传感器主要由侧扫声纳、差分卫星定位天线和姿态传感器组成。其中,侧扫声纳用于获取目标与声纳之间的相对位置以及深度信息。本文的艇载声纳选用 GeoSide500 型固定式侧扫声纳,其主要由湿端声纳、数据接口盒和显控终端 3 部分组成。其中湿端声纳的工作频率为 500 kHz,最大工作距离为 150 m,测距不确定度为 0.1 m,换能器的垂直开角为 50°,水平开角为 0.4°;声纳数据接口盒负责为湿端提供 24 VDC 电源,将湿端声纳数据转发给显控终端。差分卫星定位天线为 Harxon GPS500 高性能全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS) 天线,其兼容了北斗、

GPS、GLONASS 和伽利略 4 种卫星系统,定位精度可达到厘米级,其可与侧扫声呐的数据接口盒兼容,测得的数据可由数据接口盒一并发送给显控终端。



图 12 舰载传感器的主要组成部分

Fig. 12 Main components of ship-borne sensor

如图 13 所示,显控终端可实时显示侧扫声呐采集到高分辨率等比例声呐图像、侧扫声呐距海底的高度信息和卫星定位信息等。其可针对不同海域调整声呐发射声波的相关参数。

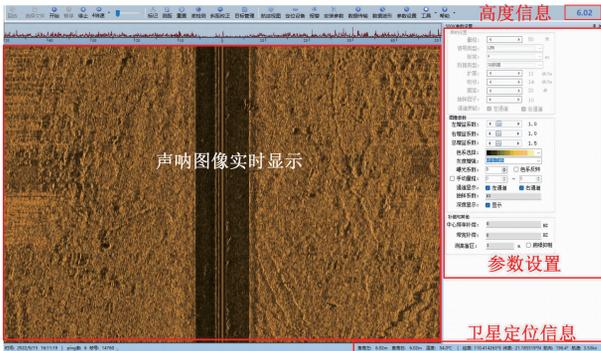


图 13 声呐显控模块

Fig. 13 Sonar display and control module

姿态传感器为 SEC345 高精度三维电子罗盘,其可在载体倾斜 $\pm 40^\circ$ 下依然可以提供准确的航向数据。其航偏角分辨力为  $0.1^\circ$ ,俯仰角和横滚角的分辨力为  $0.15^\circ$ ,最大采样频率为 50 Hz。其采集的姿态数据通过串口回传至数据计算终端,用于求解姿态校正矩阵。

如图 14 所示,为完成水下目标探测任务,无人艇除了要搭载侧扫声呐、差分卫星定位天线和姿态传感器外,还需搭载光电吊舱、航海雷达和通信天线等设备以辅助决策。

3) 岸上平台

如图 15 所示,岸上平台主要由后端服务器、无人艇控制平台和无线通信平台组成。其中,后端服务器可以

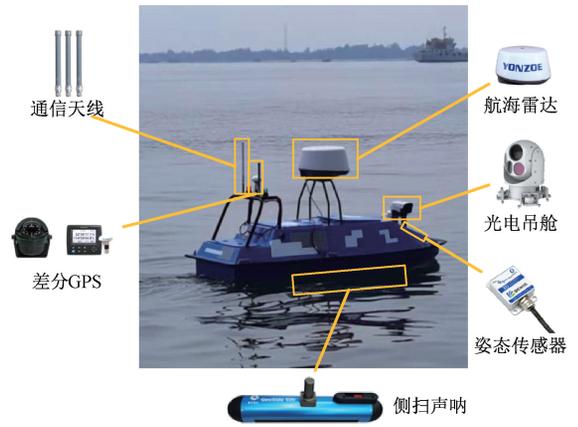


图 14 舰载传感器组成

Fig. 14 Composition of ship-borne sensor

同步声呐显控模块的图像,用于标记采集到的水下目标,方便定位方法的实施;无人艇控制平台可以实时显示无人艇的艏向角、航速、实时位置等信息;无线通信平台用于接收无人艇的实时信息并在上位机上显示。



图 15 岸上平台组成

Fig. 15 Composition of onshore platform

4.2 水下目标定位实验

在长沙月湖水域对无人艇水下目标定位系统和基于离散卡尔曼滤波的水下目标定位算法进行了实验验证。由于湖水中没有适于验证的目标,因此自制了两个目标如图 16 所示。目标由带孔的不锈钢板制成,以保证其能够沉入水底且具有良好的声反射性。

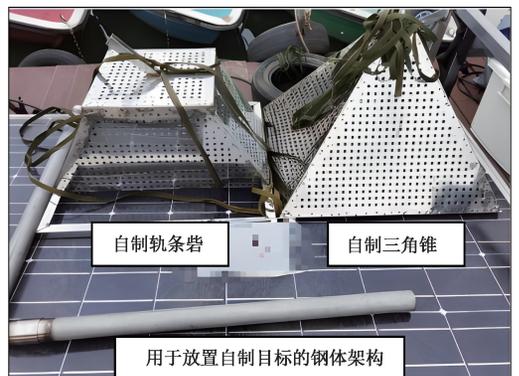


图 16 自制目标

Fig. 16 Self-made targets

为了能够较为准确的获取目标的真实位置信息,在投放目标的过程中,使用不锈钢管将目标垂直投放固定至湖底,并记录投放点的经纬度信息和深度信息。其中,经纬度信息由差分卫星定位系统测量的得到,深度信息由侧扫声纳的测深系统测得。在确定两个目标的真实位置后,无人艇对两个目标的位置进行测量。其轨迹如图 17 所示,其中 A、B 两个五角星标注了目标的真实地理位置。

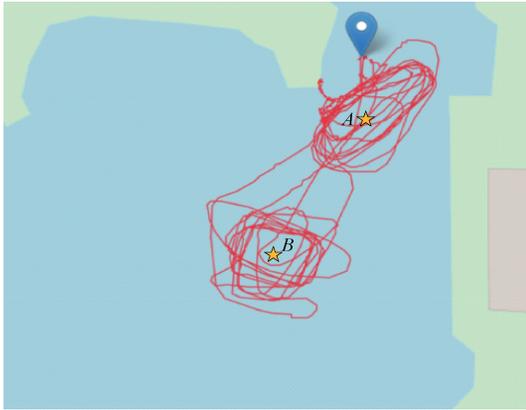
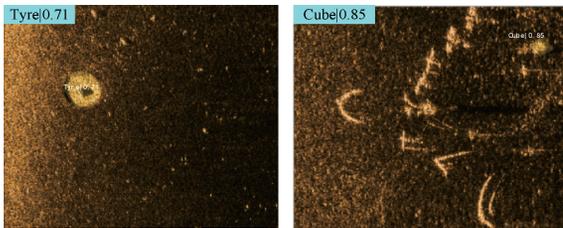
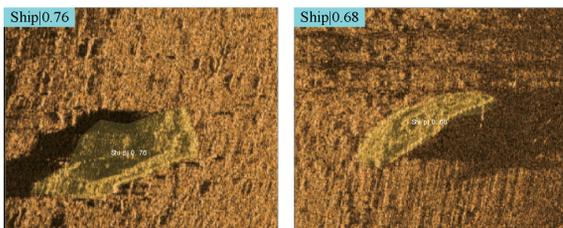


图 17 湖试过程中无人艇航迹  
Fig. 17 Track of USV during lake trial

水下目标精确定位的前提是能够通过侧扫声纳图像识别到水下目标。在实验过程中,使用门控金字塔模块对 SOLOv2 实例分割算法进行改进<sup>[16]</sup>,以准确识别水下目标。改进的 SOLOv2 算法的识别结果如图 18 所示,其中图 18(a)为在月湖水域采集的自制目标识别结果,图 18(b)为在湛江近岸海域下采集的海底沉船识别结果。由图 18 可知,改进的 SOLOv2 算法能够准确地识别水下目标的类别,为水下目标定位提供先决条件。



(a) 月湖水域自制目标识别结果  
(a) Recognition results of self-made targets in Yuehu waters



(b) 湛江近岸海域海底沉船识别结果  
(b) Recognition results of shipwreck in nearshore waters of Zhanjiang

图 18 改进的 SOLOv2 算法识别结果

Fig. 18 Recognition results of the improved SOLOv2 algorithm

表 3 和 4 为实验过程中两个目标的真实地理位置、每个测量点的测量结果以及离散卡尔曼滤波计算求得的目标位置最优估计值。其中,由于湖底较为平整且深度大致一致,因此 10 个量测值的深度信息较为准确。

表 3 点 A 实验数据记录

Table 3 Test data record of point A

数据类型	经度/(°)	纬度/(°)	深度/m	$\Delta$ /m
真实位置	28.143 773 756	113.019 199 917	2.3	0
量测值 1	28.143 773 703	113.019 199 899	2.3	0.559 7
量测值 2	28.143 773 698	113.019 199 936	2.3	0.610 3
量测值 3	28.143 773 795	113.019 199 839	2.3	0.872 1
量测值 4	28.143 773 799	113.019 199 933	2.3	0.458 8
量测值 5	28.143 773 695	113.019 199 939	2.3	0.648 5
量测值 6	28.143 773 693	113.019 199 943	2.3	0.681 5
量测值 7	28.143 773 688	113.019 199 882	2.3	0.764 8
量测值 8	28.143 773 718	113.019 199 898	2.3	0.424 9
量测值 9	28.143 773 672	113.019 199 949	2.3	0.898 9
量测值 10	28.143 773 698	113.019 199 934	2.3	0.604 4
离散卡尔曼滤波估计值	28.143 773 747	113.019 199 928	2.3	0.310 2

表 4 点 B 实验数据记录

Table 4 Test data record of point B

数据类型	经度/(°)	纬度/(°)	深度/m	$\Delta$ /m
真实位置	28.143 772 756	113.019 197 917	2.2	0
量测值 1	28.143 772 703	113.019 197 887	2.2	0.609 0
量测值 2	28.143 772 744	113.019 197 864	2.2	0.259 4
量测值 3	28.143 772 784	113.019 197 940	2.2	0.362 4
量测值 4	28.143 772 723	113.019 197 957	2.2	0.518 6
量测值 5	28.143 772 735	113.019 197 871	2.2	0.505 7
量测值 6	28.143 772 727	113.019 197 953	2.2	0.462 3
量测值 7	28.143 772 780	113.019 197 961	2.2	0.501 2
量测值 8	28.143 772 775	113.019 197 874	2.2	0.470 1
量测值 9	28.143 772 695	113.019 197 943	2.2	0.663 1
量测值 10	28.143 772 794	113.019 197 936	2.2	0.424 9
离散卡尔曼滤波估计值	28.143 772 725	113.019 197 899	2.2	0.358 5

由表 3、4 可知,利用离散卡尔曼滤波算法对多点量测数据进行最优估计可以有效地减小测量过程中的系统误差,大幅提高定位精度。

## 5 结 论

水下目标的精准定位是无人艇水下环境探测的重要问题之一。本文对基于侧扫声纳的水下目标定位过程进行建模,分析了艇体姿态变化对水下目标定位的影响,引入蒙特卡罗方法对离散卡尔曼滤波算法的定位误差收敛过程进行仿真分析;搭建了一套无人艇水下目标定位系统,联合使用侧扫声纳、姿态传感器、GPS等多种传感器,实现对真实水域中的目标精准定位。

仿真实验结果表明,基于离散卡尔曼滤波的多点定位方法能够很好的消除单次定位结果中的随机误差,且相较于其他几种最优估计方法,离散卡尔曼滤波方法的收敛速度更快,收敛值最小。无人艇集成实验结果表明,本文提出的无人艇水下目标定位方法能够对未知水域内的目标进行精准定位,基本达到无人艇水下目标定位的要求。虽然,本方法的定位精度较高,但是由于多点测量的原因,测量效率较低。后续工作将围绕如何平衡测量精度和测量效率进行,在基本不影响定位精度的前提下,提高定位效率。

## 参考文献

- [ 1 ] 张磊, 庄佳园, 王博. 水面无人艇技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.  
ZHANG L, ZHUANG J Y, WANG B. Technology of unmanned surface vehicle [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2018.
- [ 2 ] 金霄, 郑开原, 王得朝, 等. 国外军用无人水面艇发展综述[J]. 中国造船, 2020, 61(S01): 221-227.  
JIN X, ZHENG K Y, WANG D CH, et al. Overview of development of foreign military unmanned surface vehicle[J]. Ship Building of China, 2020, 61(S01): 221-227.
- [ 3 ] 朱健楠, 虞梦苓, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述[J]. 船舶经济贸易, 2022(8): 36-41.  
ZHU J N, YU M L, YANG Y X. Review on the development of sensing technology for unmanned surface vehicle[J]. Ship Economy and Trade, 2022(8): 36-41.
- [ 4 ] 杨文韬. 世界无人水面艇发展综述[J]. 现代军事, 2014(10): 58-60.  
YANG W T. Overview of the development of unmanned surface craft in the world[J]. Conmlit, 2014(10): 58-60.
- [ 5 ] 庄杰枣, 王绍智, 郑铁民, 等. 侧扫声纳探测的若干问

题[J]. 海洋测绘, 1996(4): 11-17.

ZHUANG J Z, WANG SH ZH, ZHENG T M, et al. Several problems of side-scan sonar detection [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 1996(4): 11-17.

- [ 6 ] KILFOYLE D B, BAGGEROER A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 25(1): 4-27.
- [ 7 ] 吕文红, 苑娇娇, 侯佳辰, 等. 水声定位方法研究进展[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(1): 11-16.  
LYU W H, YUAN J J, HUO J CH, et al. Research progress of underwater acoustic positioning methods[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(1): 11-16.
- [ 8 ] 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.  
SUN D J, ZHENG C E, ZHANG J CH, et al. Development and prospect of underwater acoustic positioning and navigation technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 331-338.
- [ 9 ] 李庆武, 霍冠英, 周妍. 声纳图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
LI Q W, HUO G Y, ZHOU Y. Sonar image processing [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [ 10 ] 王化人, 李春风, 林康力. 海流对声纳目标定位精度影响分析[J]. 水道港口, 2007, 28(4): 297-299.  
WANG H R, LI CH F, LIN K L. Analysis on influence of sea current on target location accuracy [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(4): 297-299.
- [ 11 ] 杨立文, 焦永强, 徐健. 基于超短基线的侧扫声纳水下目标定位技术[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(3): 6-9.  
YANG L W, JIAO Y Q, XU J. Underwater target positioning technology if side scan sonar based on ultra short baseline [J]. China Harbor Engineering, 2017, 37(3): 6-9.
- [ 12 ] 马国军, 王冬青, 朱璘, 等. 一种基于侧扫声纳的海底目标定位方法和定位系统: CN201911051493.0 [P]. 2020-02-25.  
MA G J, WANG D Q, ZHU J, et al. Submarine target positioning method and system based on side scanning sonar: CN201911051493.0 [P]. 2020-02-25.
- [ 13 ] 潘树文, 刘艳, 李艳君, 等. 一种基于侧扫声纳的海底目标定位装置: CN202010416984.7. [P]. 2020-08-11.

PAN SH W, LIU Y, LI Y J, et al. Submarine target positioning device based on side scanning sonar; CN202010416984.7. [P]. 2020-08-11.

- [14] 文元桥,肖长诗,朱曼,等. 水面无人艇的体系结构与运动控制[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2019.
- WEN Y Q, XIAO CH SH, ZHU M, et al. Architecture and motion control of unmanned surface vessels [M]. Wuhan:Wuhan University of Technology Press, 2019.
- [15] 鲁亚飞,吴岸平,陈清阳. 无人机对地目标多帧融合定位与误差收敛特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2021,43(2): 66-73.
- LU Y F, WU AN P, CHEN Q Y. Analysis of UAV multi-frame fusion location and error convergence characteristic for ground target [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021,43(2): 66-73.
- [16] 黄泓赫. 近岸水下目标无人艇声呐智能探测方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2022.
- HUANG H H. Research on intelligent detection method of nearshore underwater target by unmanned surface vehicle equipped with sonar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.

## 作者简介



左震,分别在2002年、2004年和2012年于国防科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为国防科技大学副研究员,主要研究方向为智能侦测与对抗。

E-mail:z.zuo@nudt.edu.cn

**Zuo Zhen** received his B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from National University of Defense Technology in 2002, 2004 and 2012, respectively. He is currently an associate researcher at National University of Defense Technology. His main research interest includes intelligent detection and countermeasure.



黄泓赫(通信作者),分别在2020年和2022年于国防科技大学获得学士学位和硕士学位,现为国防科技大学博士研究生,主要研究方向为智能侦测与对抗。

E-mail:huanghonghe16@nudt.edu.cn

**Huang Honghe** (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from National University of Defense Technology in 2020 and 2022. He is currently a Ph.D. candidate at National University of Defense Technology. His main research interest includes intelligent detection and countermeasure.