

# 一种深海拖曳系统稳健可靠的组合定位方法

杜 凯<sup>1,2</sup>, 吴永亭<sup>1,2</sup>, 梁文彪<sup>3</sup>, 李治远<sup>2</sup>, 胡 俊<sup>2</sup>, 豆虎林<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 为了解决深海拖曳系统定位异常、不连续以及误差积累的问题, 提出了一种联合惯性导航系统(INS)和超短基线定位系统(USBL)的组合定位方法, 利用在航声线跟踪实现 USBL 的高精度定位, 顾及 INS 和 USBL 系统的互补性, 并结合 Kalman 滤波构建了 INS+USBL 的组合定位模型。将该组合定位模型应用于“向阳红 01”船深海拖曳系统在南海的定位实验并与 USBL 的定位结果比对, 实验表明, 组合定位方法有效地解决了深拖系统定位异常且不连续问题。INS+USBL 组合定位方法可以满足深海拖曳系统的稳健可靠定位, 对于深远海定位具有重要意义。

**关键词:** 深海拖曳系统; 超短基线系统; 惯性导航系统; 组合定位; 一点一方位推算

**中图分类号:** P229.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)12-0015-08

**DOI:** 10.11759/hyxx20181005001

深海拖曳系统对于避免船体干扰、减少深度带来的比例误差, 提高测量成果的精度和分辨率具有重要的作用<sup>[1]</sup>。近年来, 随着相关技术的进步, 深海探测平台取得了长足的发展<sup>[2]</sup>, 如深海拖曳系统(DT, deep-towing system)、遥控水下机器人(ROV, remote operated vehicle)、自主水下航行器(AUV, autonomous underwater vehicle)等, 其中, 深海拖曳系统将多波束系统、浅地层剖面仪、侧扫声呐、惯性导航系统(INS, inertial navigation system)和温盐深仪(CTD, conductance temperature depth)等多种声学、光学仪器集成在拖体中, 通过母船信号缆拖曳的方式进行近海底的测量, 可获得高分辨率的海底地形、地貌和深海水体环境信息, 是进行海洋科学研究和海洋资源探测的重要工具。缺少位置的海洋要素信息是毫无意义的, 拖体是诸要素采集系统的载体和位置参考, 其位置精度直接影响着观测要素位置的准确性<sup>[3]</sup>。深拖系统的位置通常借助位置推算、超短基线定位系统(USBL, ultra-short baseline)、多普勒计程仪(DVL, doppler velocity log)来获得<sup>[4-7]</sup>。位置推算基于拖缆水平长度、拖体方位和母船绝对坐标推算得到拖体位置, 但易受船速和航向方位变化影响, 定位精度较差。USBL 以其结构简单、使用灵活和操作便利的特点, 成为水下目标定位常用的方法, 但受海洋环境的复杂性、拖体航向的变化等因素影响, USBL 定位常出现异常回波或无回波, 导致定位异常或中断,

不能确保定位的连续性; 此外, 在 USBL 定位中, 仅基于母船声学阵列位置的表层声速计算声线进而确定拖体的位置, 忽视了声速在水体中的变化, 导致测距精度不高, 进而影响拖体定位精度。DVL 基于声学底跟踪速度、时间和起点坐标, 一点一方位推算获取拖体的坐标; DVL 常受深海无法底跟踪获得速度、误差积累等因素影响, 走航过程中时常出现定位不连续, 定位误差随时间增加而增加, 甚至无法使用等问题。以上现有 3 种常用定位方法在拖体定位精度、连续性和稳健性等方面均存在着不足, 严重地影响了深海拖曳系统测量成果的质量<sup>[8]</sup>。为此, 本文提出一种 INS+USBL 深拖系统稳健可靠的组合定位方法, 以期解决困扰深拖系统定位精度低、不稳健和不连续问题。

## 1 顾及在航声速剖面的高精度 USBL 定位

USBL 主要是由发射换能器、应答器和声学基阵组成。换能器一般由 4 个以上的声学基元构成, 安装

收稿日期: 2018-10-05; 修回日期: 2018-10-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB051703)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFB051703]

作者简介: 杜凯(1993-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事水下定位方面的研究, E-mail: 16678643832@163.com; 吴永亭(1969-), 通信作者, 男, 山东莱西人, 博士, 工程技术带头人, 主要研究方向为海洋大地测量及深远海海洋调查技术, E-mail: ytwu@fio.org.cn

在船底集中于一个收发器中，声学基元之间的相互关系安装时已精确测定，组成声基阵坐标系。系统通过测定目标至各个声学基元的时延，即相位差来确定目标至声基阵的方位，通过测定声波传播时间计算目标到声基阵的距离，从而确定水下目标与换能器的相对位置<sup>[9]</sup>，USBL 系统组成如图 1 所示。

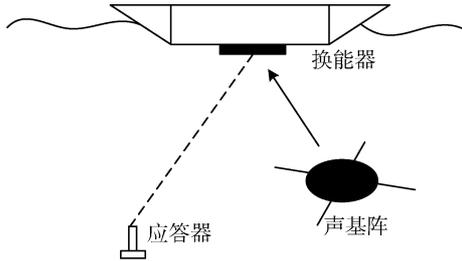


图 1 超短基线系统组成  
Fig. 1 Composition of ultra-short baseline (USBL)

假设基线长度为  $d$ ，目标探测方向与基线之间的夹角为  $\beta$ ，声波波长为  $\lambda$ ，那么相位差为：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \beta. \quad (1)$$

如图 2 给出了拖体在 USBL 坐标系下的定位原理，拖体  $P$  点坐标  $(x, y, z)$  为：

$$\begin{cases} x = \frac{\lambda R}{2\pi d} \varphi_x \\ y = \frac{\lambda R}{2\pi d} \varphi_y \\ z = R\sqrt{1 - \cos^2 \beta_x - \cos^2 \beta_y} \end{cases}, \quad (2)$$

其中， $R$  为换能器中心  $O$  点到拖体  $P$  点的距离， $\varphi_x, \varphi_y$

$$\begin{cases} y_p = \sum_{i=1}^n y_i, z_p = \sum_{i=1}^n z_i \\ y_i = \frac{\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}}{pg_i} = \frac{\sqrt{1 - (pc_i)^2} - \sqrt{1 - p(c_i + g_i \Delta z_i)^2}}{pg_i} \\ t_i = \frac{R_i(\theta_i - \theta_{i+1})}{C_{Hi}} = \frac{\arcsin[p(c_i + g_i \Delta z_i)] - \arcsin(pc_i)}{pg_i^2 \Delta z_i} \ln \left( 1 + \frac{g_i \Delta z_i}{c_i} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

式中， $y_i$  和  $t_i$  为经历厚度  $\Delta z_i$  的水平位移量和传播时间， $P$  为 snell 常数； $C_i, \theta_i$  和  $C_{i+1}, \theta_{i+1}$  为波束经历第  $i$  层上界面和下界面的声速和入射角，声速在层内以常梯度  $g_i$  变化。

$$\theta = \arctan(y_p / z_p). \quad (4)$$

利用确定的  $P$  点坐标和换能器原点坐标，利用式(4)重新计算入射角  $\theta$ ，再结合观测时间开展声线

为  $R$  与  $x$  轴和  $y$  轴上声学基元接受信号的相位差， $\beta_x, \beta_y$  分别为目标探测方向与  $x$  轴和  $y$  轴的夹角<sup>[10]</sup>。

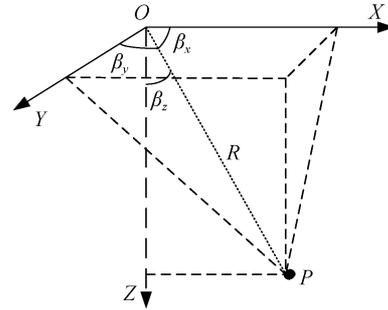


图 2 超短基线定位原理示意图  
Fig. 2 Schematic of USBL positioning

USBL 的定位模型是通过定向和测距确定目标的位置，测距的过程中通常假定声速为一常值，通过测定声波从目标到基阵的传播时间计算目标至声基阵的距离。由于压力、盐度和温度等环境因素影响，声波在海水中传播速度并不是一成不变的，因此假定声速不变会给测距带来较大的误差，且随着测量距离的增大误差愈加显著，进而导致定位精度显著降低。为了解决该问题，下面给出基于走航声速剖面(SVP, sound velocity profile)的距离或拖体位置迭代计算方法，以期提高测距精度，进而改善 USBL 定位精度<sup>[11-12]</sup>。

首先根据载体吃水深度将声基阵至目标的深度划分为  $n$  层，利用实测的声速剖面和观测时间，给定一初始入射角  $\theta$ ，基于层内常梯度声线跟踪方法获得  $P$  点在换能器坐标系下坐标  $(y_p, z_p)$ ：

跟踪确定  $P$  点新的坐标。重复上述过程，直到相邻两次确定的拖体坐标小于给定的限差  $\varepsilon$ 。

$$\begin{cases} y_p^{i+1} - y_p^i \leq \varepsilon_y \\ z_p^{i+1} - z_p^i \leq \varepsilon_z \end{cases}, \quad (5)$$

式中， $(y, z)_p^i$  和  $(y, z)_p^{i+1}$  为第  $i$  次和  $i+1$  次  $P$  点定位结果， $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$  为迭代终止坐标阈值<sup>[13]</sup>。

迭代坐标计算的流程图 3 所示。

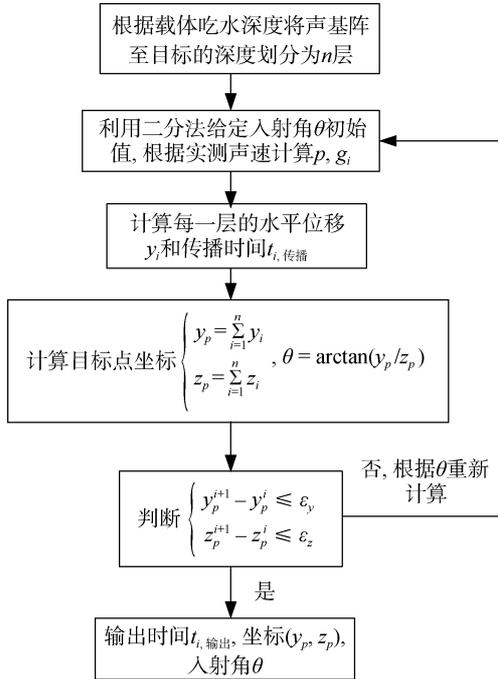


图3 定位点坐标迭代算法流程图

Fig. 3 Flowchart of iterative algorithm of the coordinate of locating point

## 2 INS+USBL 组合定位

受海洋环境、拖体方位变化等因素影响, USBL 定位精度不高, 且时常出现信号中断的情况。当母船直线航行时, USBL 对于水下目标具有较好的定位捕捉, 定位精度较高; 当母船转弯时, 拖体在水下摇摆, 加上 USBL 利用相位差定向的方式, 致使 USBL 对拖体测向不准导致定位误差偏大甚至定位结果不可靠。为此本文将 INS 引入拖体的定位中。INS 是建立在牛顿力学基础上, 利用惯性元件(加速度计和陀螺仪)来测量载体的加速度和角速率, 经过积分运算得到载体的瞬时姿态、速度和位置的导航设备, 它完全依靠自身的敏感器件完成导航任务, 是一种完全自主的导航系统, 无需依赖任何外界信息, 也不向外辐射任何能量, 因此具有隐蔽性好、抗干扰、不受外界条件限制的优点。INS 可以提供拖体的加速度、速度信息, 且能够借助一点一方位推算(图 4)获得拖

体位置<sup>[14-16]</sup>。

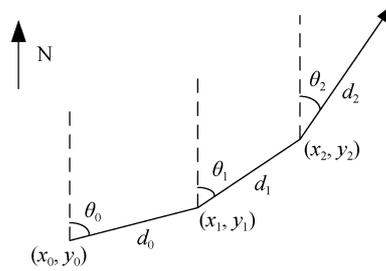


图4 一点一方位推算原理图

Fig. 4 Schematic of one-point and one-direction projection

利用罗经测得的航向值计算相邻两位置的坐标方位角  $\alpha_i$ , INS 输出的加速度  $a_i$  计算两位置的间距, 那么在时间间隔  $t$  内拖体的速度和行进的距离为:

$$\begin{cases} v_i = a_i t \\ d_i = v_i t + \frac{1}{2} a_i t^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $d_i$  为拖体在  $t_{i-1}$  到  $t_i$  时间段内运行的距离;  $t$  是采样间隔,  $t = t_i - t_{i-1}$ ;  $a_i$  为拖体在  $t_{i-1}$  到  $t_i$  时间段内的加速度<sup>[17]</sup>。

那么, 拖体在  $t_i$  时刻的位置可表示为:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + \sum_{i=0}^{i-1} d_i \sin \alpha_i \\ y_i = y_0 + \sum_{i=0}^{i-1} d_i \cos \alpha_i \end{cases} \quad (7)$$

受原理所致, INS 定位存在积累误差。USBL 每次定位为独立定位, 历元间不存在相关性, 是解决 INS 积累误差的很好途径; USBL 无法提供载体的速度、加速度和航向信息, 而 INS 可以提供, 且短时间内提供的历元间航行距离、速度和加速度信息非常准确。因此, INS 和 USBL 具有很强的互补性, 可以借助 Kalman 滤波对二者信息融合, 为拖体提供高精度、连续和稳健的定位信息<sup>[18-21]</sup>。

采用东北天坐标系作为导航坐标系, INS+USBL 组合导航系统选取 INS 位置误差  $(\Delta L_{INS}, \Delta \lambda_{INS}, \Delta h_{INS})$ 、东北天方向上的速度误差  $(\Delta v_E, \Delta v_N, \Delta v_U)$ 、平台角误差  $(\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U)$ 、陀螺仪的随机漂移  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$  和加速度计的零偏  $(\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z)$  作为状态量, 那么状态量  $X$  为:

$$X = [\Delta L_{INS}, \Delta \lambda_{INS}, \Delta h_{INS}, \Delta v_E, \Delta v_N, \Delta v_U, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T \quad (8)$$

组合系统的状态方程为:

$$\dot{X} = FX + GW, \quad (9)$$

其中,  $F$  为 INS 的系统矩阵,  $G$  和  $W$  为 INS 的系统相关噪声矩阵项。

则 INS+USBL 组合系统的量测方程可写为:

$$Z_C = H_C X + V_C, \quad (10)$$

其中,  $H_C$  为量测矩阵,  $V_C$  为量测噪声。  $Z_C$  为观测量, 由 INS 与 USBL 位置之差组成

$$\mathbf{Z}_C = [L_{INS} - L_{USBL}, \lambda_{INS} - \lambda_{USBL}, h_{INS} - h_{USBL}]^T,$$

其中,  $L_{INS}, \lambda_{INS}, h_{INS}$  为 INS 输出的经度、纬度、深度位置信息,  $L_{USBL}, \lambda_{USBL}, h_{USBL}$  为 USBL 输出的经度、纬度、深度位置信息。 $\mathbf{Z}_C$  具体形式为:

$$\mathbf{Z}_C = \begin{bmatrix} L_{INS} - L_{USBL} \\ \lambda_{INS} - \lambda_{USBL} \\ h_{INS} - h_{USBL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L + \Delta L_{INS}) - (L + \Delta L_{USBL}) \\ (\lambda + \Delta \lambda_{INS}) - (\lambda + \Delta \lambda_{USBL}) \\ (h + \Delta h_{INS}) - (h + \Delta h_{USBL}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L_{INS} \\ \Delta \lambda_{INS} \\ \Delta h_{INS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta L_{USBL} \\ \Delta \lambda_{USBL} \\ \Delta h_{USBL} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中,  $\Delta L_{USBL}, \Delta \lambda_{USBL}, \Delta h_{USBL}$  分别为 USBL 的经度、纬度和深度的位置误差。

状态方程和观测方差组成 Kalman 解算方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{(k-1)/k} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases}, \quad (12)$$

其中,  $\Phi_{(k-1)/k}$  为第  $k-1$  时刻到第  $k$  时刻的一步状态转移矩阵,  $\Gamma_{k-1}$  为系统噪声驱动阵,  $\mathbf{W}_{k-1}$  为状态方程噪声, 方差阵为  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{H}_k$  为量测矩阵,  $\mathbf{V}_k$  为观测方程噪声, 方差阵为  $\mathbf{P}$ 。

状态参数可借助如下过程计算得到:

状态一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_{(k-1)/k} = \Phi_{(k-1)/k} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}. \quad (13)$$

状态估计:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{(k-1)/k} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{(k-1)/k}). \quad (14)$$

滤波增益:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{(k-1)/k} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{(k-1)/k} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}. \quad (15)$$

一步预测均方误差:

$$\mathbf{P}_{(k-1)/k} = \Phi_{(k-1)/k} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{(k-1)/k}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_k \Gamma_{k-1}^T. \quad (16)$$

估计均方误差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{(k-1)/k}. \quad (17)$$

### 3 实验及分析

为了检验本文给出的组合定位方法的有效性, 2017 年 6 月在中国南海某水域进行了深海拖曳系统海上定位实验, 实验中使用 INS+USBL 定位系统对水下拖体定位, 并在入水前进行姿态、航向和位置等信息的初始化和精确对准。走航过程中, 借助自动收放式声速剖面仪获取在航声速剖面, 用于 USBL 高精度定位。整个实验分为直线航行和拖体转弯测试两个部分, 拖体入水后实验开始, 母船沿直线航行,

通过地质绞车控制匀速放缆直至拖体达到预设深度, 然后停止放缆母船拖曳拖体前行一段距离后进行转弯测试。

在航行过程中, USBL 连续测量定位。在每个历元的 USBL 定位中, 利用在航实测声速剖面、USBL 观测的时间信息、INS 提供的拖体概略坐标, 借助图 3 所示的迭代计算过程获得母船换能器到拖体之间准确的空间直线距离信息; 再结合母船上 GNSS 提供的绝对位置、GNSS 中心和绞车拖点在船体坐标系下的坐标、船体的方位等信息, 获得拖体在地理坐标系下的坐标。为了验证利用在航声速剖面进行声线跟踪的 USBL 定位具有较好的定位精度, 利用拖体实际的深度  $h$ , 根据拖体位置迭代方法和实测的声速进行声线跟踪计算水下目标至换能器的距离  $S_2$ , 同时利用表层声速计算水下目标至换能器的距离  $S_1$ , 两种计算方法的传播距离和距离误差  $\Delta S = S_1 - S_2$  如表 1 所示, 误差曲线如图 5 所示。

表 1 两种计算方法的传播距离和距离误差  
Tab. 1 Propagation distance and distance error of two calculation methods

$h/m$	$S_1/m$	$S_2/m$	$\Delta S/m$
50.25	66.12	65.98	0.14
153.91	202.05	201.28	0.77
246.36	323.55	322.42	1.13
352.86	465.62	461.29	4.33
456.35	605.38	596.75	8.63
548.51	729.04	717.03	12.01
651.38	868.19	851.45	16.74
747.64	998.13	976.99	21.14
850.73	1 135.75	1 111.57	24.18
949.12	1 271.22	1 240.37	30.85
1 051.18	1 408.68	1 373.59	35.09

海水为非单一介质, 声速在穿透水体中速度是变化的, 忽视这种变化, 认为声波在水体中传播与表层声速一致的传统距离计算方法势必会带来较大的测距误差, 进而给 USBL 定位带来较大影响。从表 1 和图 5 可以看出, 随着水深的增加, 由此带来的影响近似呈线性递增, 当拖体深度为 1 051.18 m 时其影响已经达到了 35.09 m。本文顾及了这种影响, 利用在航声速剖面进行严密的声线跟踪, 大大提高 USBL 测距和定位精度。图 6 展示了在航 USBL 及组合定位系统的定位结果。其中, 定位点展示了

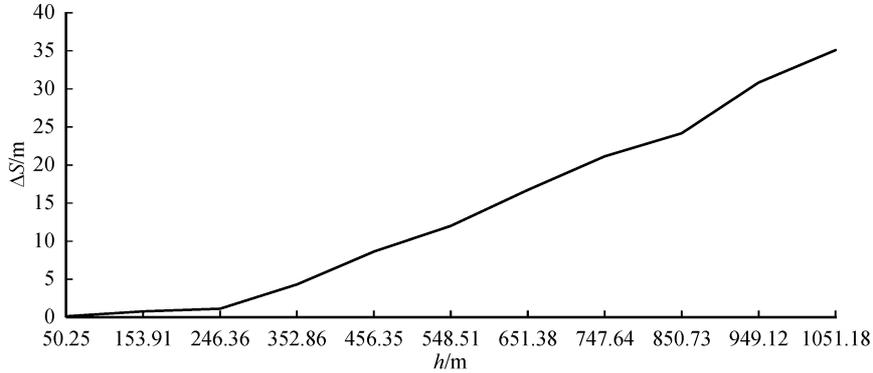


图 5 距离误差随深度变化曲线  
Fig. 5 Changing curve of range error with depth

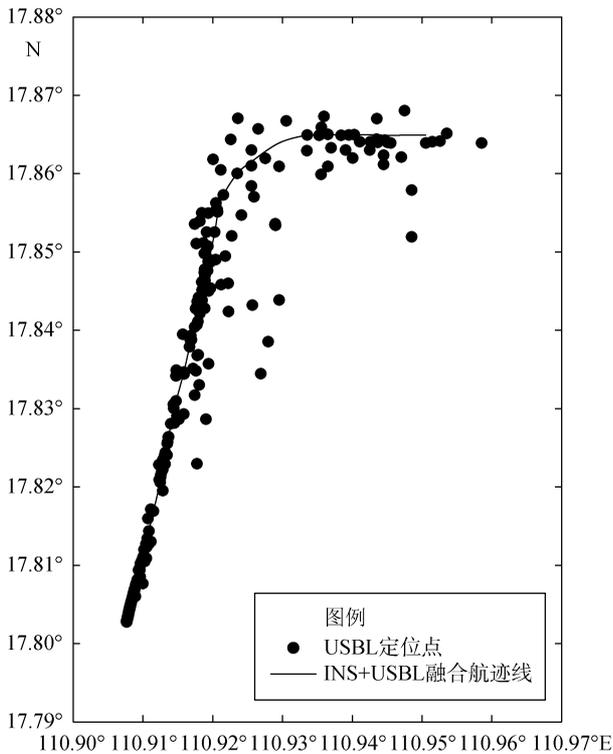


图 6 USBL 定位点与组合定位输出的拖体航迹  
Fig. 6 Track of towed body output by USBL locating point and integrated positioning

USBL 连续走航定位结果。可以看出：当拖体离开母船，由于拖体距离母船较近，USBL 的定位的精度和连续性均较好；随着拖体深度的增加，一次定位时间随之增加，所得拖体轨迹点离散度增加，定位误差增大，且伴有定位失败现象；母船在转弯时，USBL 出现定向不准，定位结果的离散度进一步加剧，误差显著增大，定位失败问题进一步加剧，已无法满足深海拖曳系统高精度定位的要求。以上问题表明，严密的声线跟踪尽管提高了 USBL 测距精度和定位精

度，但仍无法解决拖体转弯时测距信号不稳定导致的定位精度偏低甚至无法定位问题。

利用 USBL 的定位信息和拖体 INS 上提供速度、加速度、方位和推算位置信息，借助 Kalman 滤波对所有信息融合，得到拖体的定位结果如图 6 曲线所示。可以看出：采用组合定位，很好的克服了单一 USBL 在船体转弯时出现的定位精度低甚至定位失败问题，确保了拖体定位的精度、连续性和稳健性。

表 2 展示了定量评估 INS+USBL 组合定位性能列出的实验前 200 秒 USBL 的定位结果( $x_1, y_1$ )与 INS+USBL 的定位结果( $x_2, y_2$ )，图 7 绘制了 USBL 相对于 INS+USBL 定位结果偏差曲线图。

从表 2 和图 7 中可以看出，前 200 秒，USBL 与 INS+USBL 定位结果最小偏差 0.02 m，最大偏差 1.34 m。因此 USBL 与 INS+USBL 在定位开始具有较好的定位一致性。因为前 200 秒 USBL 和 INS 均具有较好的工作性能，两套定位结果的一致表明了基于 INS+USBL 组合定位是可行的。

为了验证本文组合定位方法的有效性，使用 USBL 定位数据和 INS+USBL 组合定位数据对深海系统采集的多波束数据进行融合处理，图 8 展示了使用两种不同定位方法融合生成的三维点云图，可以看出：使用 USBL 定位数据融合生成的多波束点云 ping 与 ping 之间存在较大的缝隙且精度较差；而使用 INS+USBL 组合定位数据融合生成的三维点云图具有较好的精度和连续性。

## 4 结论及建议

本文提出的深拖系统稳健可靠的组合定位方法，借助在航声速剖面 and 严密的声线跟踪算法，实现了

表 2 前 200 秒 USBL 与 INS+USBL 定位结果对比

Tab. 2 Comparison of positioning results of USBL and INS+USBL before 200 seconds

$t/s$	$x_1/m$	$y_1/m$	$x_2/m$	$y_2/m$	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta/m$
1	1 968 861.63	490 141.58	1 968 861.63	490 141.56	0.00	-0.02	0.02
10	1 968 874.76	490 144.84	1 968 874.72	490 144.93	-0.04	0.09	0.10
20	1 968 892.37	490 148.86	1 968 892.43	490 148.82	0.06	-0.04	0.07
30	1 968 910.08	490 152.81	1 968 910.14	490 152.72	0.06	-0.09	0.10
40	1 968 927.77	490 156.97	1 968 927.84	490 156.97	0.07	0.00	0.07
50	1 968 941.77	490 160.10	1 968 941.68	490 160.16	-0.09	0.05	0.11
60	1 968 960.19	490 164.12	1 968 960.12	490 164.05	-0.07	-0.07	0.10
70	1 968 976.31	490 167.67	1 968 976.35	490 167.77	0.04	0.10	0.11
80	1 968 995.48	490 172.02	1 968 995.53	490 172.02	0.06	0.00	0.06
90	1 969 011.82	490 175.71	1 969 011.76	490 175.74	-0.06	0.04	0.07
100	1 969 030.58	490 180.06	1 969 030.39	490 180.52	-0.18	0.46	0.50
110	1 969 049.11	490 184.52	1 969 049.21	490 184.42	0.09	-0.11	0.14
120	1 969 065.79	490 188.54	1 969 066.17	490 188.67	0.39	0.12	0.41
130	1 969 087.03	490 193.29	1 969 087.57	490 192.92	0.54	-0.37	0.65
140	1 969 101.55	490 196.60	1 969 101.40	490 196.11	-0.15	-0.49	0.52
150	1 969 118.33	490 200.50	1 969 119.66	490 200.71	1.33	0.21	1.34
160	1 969 137.06	490 205.14	1 969 136.45	490 205.14	-0.61	0.00	0.61
170	1 969 154.39	490 209.67	1 969 155.08	490 210.09	0.68	0.42	0.80
180	1 969 172.36	490 214.13	1 969 172.41	490 214.87	0.06	0.74	0.74
190	1 969 192.13	490 219.62	1 969 191.78	490 220.18	-0.35	0.57	0.67
200	1 969 209.50	490 223.81	1 969 209.85	490 224.96	0.35	1.15	1.20

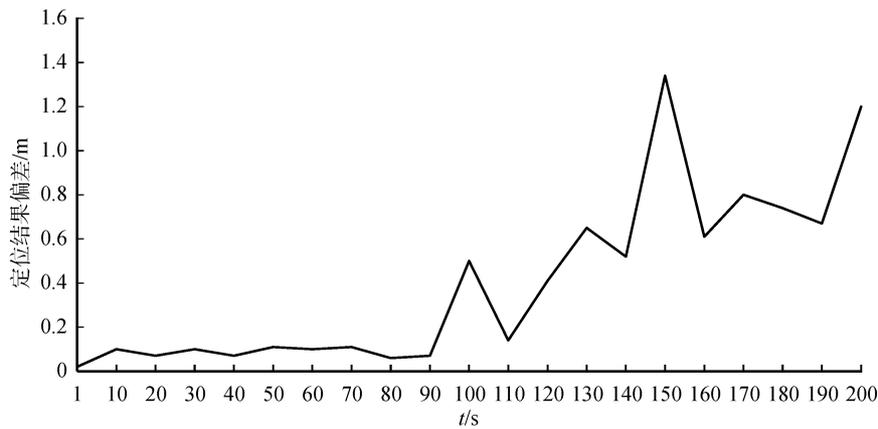


图 7 USBL 与 INS+USBL 定位结果偏差分布曲线

Fig. 7 Distribution curve of deviation of positioning results of USBL and INS+USBL

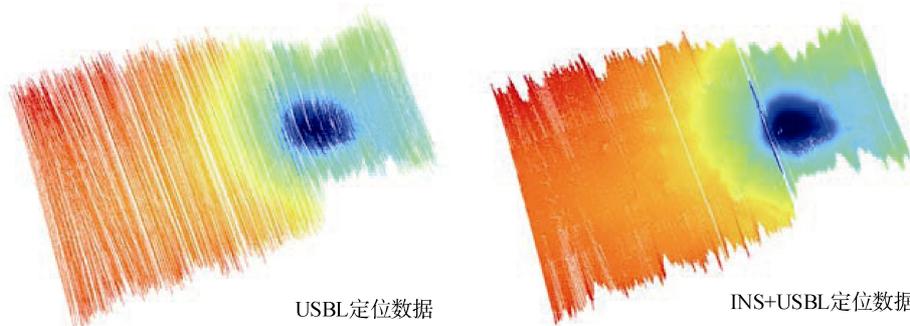


图 8 USBL 定位数据、INS+ USBL 组合定位数据融合生成的多波束三维点云图

Fig. 8 Multi-beam 3D point cloud image generated by USBL positioning data and INS+ USBL combined positioning data

USBL 高精度测距和定位, 显著提高了传统 USBL 的定位精度; 借助 INS+USBL 组合定位算法, 解决了单一 USBL 在深海和航迹发生变化时出现的定位精度偏低甚至失败问题, 以及单一 INS 出现的误差积累问题, 实现了 INS 和 USBL 信息的融合, 为深海拖体提供了可靠、连续、稳健导航定位解。本文提出的组合定位方法和系统在“向阳红 01”号科考船的深拖系统中得到了成功应用, 建议在类似深拖定位系统研发中进一步开展软件和硬件的深度组合, 提高深拖系统的定位性能。

#### 参考文献:

- [1] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.  
Zhao Jianhu, Ouyang Yongzhong, Wang Aixue. Status and development tendency for seafloor terrain measurement technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1786-1794.
- [2] 单瑞, 赵铁虎, 梅赛, 等. 深海拖曳系统定位技术及其应用与展望[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(7): 66-70.  
Shan Rui, Zhao Tiehu, Mei Sai, et al. Position technology for deep tow system: application and perspective[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(7): 66-70.
- [3] 吴永亭. LBL 精密定位理论方法研究与软件系统研制[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
Wu Yongting. Study on theory and method of precise LBL positioning and development of positioning software system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [4] 迟凤阳. 水下航行器组合导航定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.  
Chi Fengyang. Research on AUV integrated navigation position technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [5] 王淑炜, 张延顺. 基于罗经/DVL/水声定位系统的水下组合导航方法研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(1): 19-23.  
Wang Shuwei, Zhang Yanshun. Research on the underwater integrated navigation method based on Compass/DVL/Hydroacoustic Positioning System[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(1): 19-23.
- [6] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: A review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [7] 赵建虎, 陆振波, 王爱学. 海洋测绘技术发展现状[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(6): 1-10.  
Zhao Jianhu, Lu Zhenbo, Wang Aixue. Development status of marine surveying and mapping technology[J]. Journal of Geomatics, 2017, 42(6): 1-10.
- [8] 赵建虎, 李娟娟, 李萌. 海洋测量的进展及发展趋势[J]. 测绘地理信息, 2009, 34(4): 25-27.  
Zhao Jianhu, Li Juanjuan, Li Meng. Progress and future of hydrographic surveying and charting[J]. Journal of Geomatics, 2009, 34(4): 25-27.
- [9] 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 position system and its application[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(4): 18-21.
- [10] 阳凡林, 暴景阳, 胡兴树. 水下地形测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016: 286-305.  
Yang Fanlin, Bao Jingyang, Hu Xingshu. Oceanic Surveying and Mapping[M]. Wuhan: Wuhan University, 2016: 286-305.
- [11] 何林帮, 赵建虎, 张红梅, 等. 顾及姿态角的多波束声线精确跟踪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 46-50.  
He Linbang, Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, et al. A precise multibeam sound ray tracking method taking into account the attitude angle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(1): 46-50.
- [12] 郭雅静, 李春雨, 张东升, 等. 基于航位推算/水声定位系统的水下拖体组合导航方法[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(6): 63-67.  
Guo Yajing, Li Chunyu, Zhang Dongsheng, et al. The integrated navigation method by underwater towing body based on dead reckoning/hydroacoustic position system[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(6): 63-67.
- [13] 赵建虎, 陈鑫华, 吴永亭, 等. 顾及波浪影响和深度约束的水下控制网点绝对坐标的精确确定[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 413-421.  
Zhao Jianhu, Chen Xinhua, Wu Yongting, et al. Determination of absolute coordinate of underwater control point taking waves and depths constraint into account[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(3): 413-421.
- [14] 徐博, 郝芮, 王超, 等. 基于倒置声学基阵的 INS/USBL 组合导航算法研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(5): 46-54.  
Xu Bo, Hao Rui, Wang Chao, et al. Research on INS/USBL integrated navigation algorithm based on the inverted acoustic array[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(5): 46-54.
- [15] 高兵兵. 水下运载器 SINS/USBL/DVL 组合导航系统设计与高性能算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.  
Gao Bingbing. Research on SINS/USBL/DVL integrated navigation system and high performance algorithm for underwater vehicles[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [16] 张亚文, 莫明岗, 马小艳, 等. 一种基于集中滤波的 SING/SVL/USBL 水下组合导航算法[J]. 导航定位

- 与授时, 2017, 4(1): 25-31.
- Zhang Yawen, Mo Minggang, Ma Xiaoyan, et al. An algorithm of underwater SINS/DVL/USBL integrated navigation based on concentrated filtering[J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(1): 25-31.
- [17] 李守军, 陶春辉, 包更生. 基于卡尔曼滤波的 INS/USBL 水下导航系统模型研究[J]. 海洋技术, 2008, 27(3): 47-50.
- Li Shoujun, Tao Chunhui, Bao Gengsheng. INS/USBL underwater navigation system based on kalman filter[J]. Ocean Technology, 2008, 27(3): 47-50.
- [18] Allotta B, Caiti A, Costanzi R, et al. A new AUV navigation system exploitation unscented Kalman filter[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 121-132.
- [19] 赖修尉. 水下组合导航定位系统及其 Kalman 数据融合技术应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015.
- Lai Xiuwei. The applied research of underwater integrated navigation and kalman data fusion technique[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015.
- [20] 于浩, 王彦国, 胡小毛, 等. 水下载体 SINS/USBL 组合导航滤波方法研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 20-24.
- Yu Hao, Wang Yanguo, Hu Xiaomao, et al. Research on SINS/USBL integrated navigation filtering method for underwater vehicles[J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(1): 20-24.
- [21] Miller P A, Farrell J A, Zhao Y, et al. Autonomous underwater vehicle navigation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35: 663-678.

## Stable and credible combined position method for deep towing systems

DU Kai<sup>1, 2</sup>, WU Yong-ting<sup>1, 2</sup>, LIANG Wen-biao<sup>3</sup>, LI Zhi-yuan<sup>2</sup>, HU Jun<sup>2</sup>, DOU Hu-lin<sup>2</sup>

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Received:** Oct.5, 2018

**Key words:** deep towing system; ultra-short baseline; inertial navigation system; integrated position; one-point and one azimuth positioning estimation

**Abstract:** To solve the problem of abnormal positioning, discontinuity, and error accumulation in deep towing systems, this paper proposes a combined positioning method of inertial navigation system (INS) and ultra-short baseline (USBL) positioning system, which realizes USBL high-precision positioning through the tracking method of the navigation sound line. This paper takes into account the complementarity of the INS and USBL systems, combined with Kalman filtering to construct a combined positioning model of INS+USBL. The model is applied to the positioning experiment of the “Xiangyanghong 01” deep towing system in the South China Sea and compared with the positioning results of USBL. The experiment shows the combined positioning method effectively solves the problem of abnormal positioning and discontinuity of the deep towing system. The combined INS+USBL positioning method can achieve stable and reliable positioning of deep-sea towing systems and is of great significance for deep-sea positioning.

(本文编辑: 刘珊珊)