

一种考虑洋流影响的 AUV 组合导航算法

张福斌, 鲍鸿杰, 段小伟, 沈俊元

(西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对由捷联惯导 (SINS)、多普勒测速仪 (DVL) 以及深度传感器组成的自主水下航行器 (AUV) 组合导航系统, 当 DVL 测量距离无法达到海底的情况下, 洋流是该系统主要误差源之一的问题, 在 SINS/DVL 组合导航算法的基础上, 提出了一种在原算法中加入洋流信息提高系统导航定位精度的方法, 并将以上两种导航算法解算出的 AUV 位置信息进行仿真对比, 仿真结果表明: 与未考虑洋流信息的算法相比, 加入洋流信息的算法能够有效提高 AUV 的定位精度。

关键词: 自主水下航行器; 捷联惯导系统; 多普勒测速仪; 洋流

A AUV Integrated Navigation Algorithm
Considering the Effect of Ocean Current

Zhang Fubin, Bao Hongjie, Duan Xiaowei, Shen Junyuan

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A navigation system of autonomous underwater vehicle (AUV) built up by strapdown inertial navigation system (SINS), Doppler velocity log (DVL) and depth sensor is investigated. To solve the problem that when the measurement distance of DVL cannot reach the seafloor, ocean current is a main error source in the localization process of the navigation system, the ocean current is taken into account in the arithmetic of the SINS/DVL navigation system. The AUV position of simulation about the arithmetic with and without considering the ocean current is carried out to make comparison. The results of simulation show that localization precision can be raised by considering the ocean current.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV); strapdown inertial navigation system (SINS); Doppler velocity log (DVL); ocean current

0 引言

AUV 是执行海洋军事任务和进行海洋开发的重要工具, 受体积、能源、航行环境条件的限制, 远距离、长时间、高精度的导航定位能力仍是 AUV 重要技术挑战之一。在 AUV 众多的导航系统中, SINS/DVL 组合导航系统是一种真正意义上的自主式的导航系统, 它自主地提供运载体的加速度、速度、位置和角速度、姿态等信息, 不需要向外界发射任何信息, 完全依靠机载设备自主地完成导航任务, 和外界不发生任何光电联系。这对应用于军事目的的各种航行器显得尤为重要^[1]。

多普勒测速仪 (DVL) 是根据声波在水中的多普勒效应制造的一种精密测速仪器。利用多普勒效应能够测量其相对水底的速度, 叫做底跟踪; 根据测流原理能够得到航行体相对洋流的速度, 该功能叫做水跟踪。受到 DVL 测量距离的限制, 并不是任意情况下都能进行底跟踪^[2]。以 Seatronics 公司的 RDI Workhouse 导航 DVL 为例, 该型号 DVL 能够发出三种频率的声波: 1200kHz, 600kHz 和 300kHz。其分别工作在底跟踪和水跟踪模式下的各种参数如表 1 所示。

从表 1 中可以看出该型号 DVL 能够进行底跟踪的条件是距离海底小于 200 m。当 AUV 距水底高度超过 200 m 时, DVL 将无法进行底跟踪, 通常采用 AUV 相对海水的速度进行导航计算, 此时如果不考虑洋流影响, 将产生很大的定位误差。针对该问题, 在 SINS/DVL 组合导航系统位置解算算法中加入洋流信息, 仿真结果表明该方法明显减小了 DVL 跟踪情况下 AUV 的导航定位误差。

表 1 RDI Workhouse 导航 DVL 底跟踪和水跟踪工作模式下的参数

底跟踪模式			
	最小深度	最大深度	测量误差
1200kHz	0.5m	30m	+/-0.2%
600kHz	0.7m	90m	+/-0.2%
300kHz	1.0m	200m	+/-0.4%
水跟踪模式			
1200kHz	0.25m	18m	+/-0.2%
600kHz	0.7m	50m	+/-0.3%
300kHz	1.0m	110m	+/-0.2%

1 状态误差方程

选用激光陀螺捷联惯导系统三波束多普勒测速仪以及电位计式深度传感器构成 AUV 组合导航系统。但是由于深度传感器能够精确测得绝对深度, 并且其测量值具有相当高的更新频率, 因此在这里不考虑深度传感器产生的误差。

收稿日期:2011-10-30; 修回日期:2011-12-14。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61040055);西北工业大学基础研究基金资助项目(JC20100225)。

作者简介:张福斌(1972-),男,副教授,主要从事水下航行器导航与控制技术研究。

1.1 SINS 状态误差方程

捷联惯导系统数字算法表现为递推迭代形式, 数字算法是捷联惯导系统微分方程组的离散化描述形式, 它以过去时刻的导航信息和最近时刻的惯性器件采样值为输入, 递推计算得当前时刻的导航信息。选择地理坐标系为误差模型的参考坐标系, 当失准角为小角度且不考虑重力模型误差时, 可近似得出矩阵形式 SINS 误差状态方程:

$$\dot{X}_{SINS} = F_{SINS} X_{SINS} + G_{SINS} w_{SINS} \quad (1)$$

$$X_{SINS} = [\varphi_N \quad \varphi_U \quad \varphi_E \quad \delta V_N \quad \delta V_U \quad \delta V_E \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \varepsilon_{bx} \quad \varepsilon_{by} \quad \varepsilon_{bz} \quad \Delta b_x \quad \Delta b_y \quad \Delta b_z]^T \quad (2)$$

式 2 中各状态分别为北、天、东向失准角和速度误差, 纬度、经度、高度误差, 陀螺在载体系下 x, y, z 轴向的常值漂移和加速度计在载体系下 x, y, z 轴向的零偏。

1.2 DVL 状态误差方程

DVL 的测速误差与发射信号波长的稳定性、波速的水平偏角 β 和水平倾角 α 的安装精度有关, 基于这些因素引起的误差在实际产品中已经经过补偿, 故实际应用中可以只考虑由地形变化引起的测速误差。测速误差可以用一阶马尔科夫过程描述为:

$$\begin{cases} \delta \dot{V}_{dx} = -\frac{1}{\tau_{dx}} \delta V_{dx} + w_{dx} \\ \delta \dot{V}_{dy} = -\frac{1}{\tau_{dy}} \delta V_{dy} + w_{dy} \\ \delta \dot{V}_{dz} = -\frac{1}{\tau_{dz}} \delta V_{dz} + w_{dz} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\delta V_{di} (i = x, y, z)$ 为测速误差, $\tau_{di} (i = x, y, z)$ 为相关时间, $w_{di} (i = x, y, z)$ 为零均值高斯白噪声。

DVL 误差方程如下:

$$\dot{X}_{DVL} = F_{DVL} X_{DVL} + G_{DVL} w_{DVL} \quad (4)$$

$$F_{DVL} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_{dx}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_{dy}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{dz}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $X_{DVL} = [\delta V_{dx} \quad \delta V_{dy} \quad \delta V_{dz}]^T$, $G_{DVL} = I_{3 \times 3}$, $w_{DVL} = [w_{dx} \quad w_{dy} \quad w_{dz}]^T$ 。

2 SINS/DVL 组合导航算法

AUV 导航系统以捷联惯导信息为主, 结合多普勒测速仪等采集到的信号, 采用卡尔曼滤波技术实现信息的最优综合, 以获得精确的导航参数。

2.1 未考虑洋流信息的导航算法

在不考虑洋流情况下, SINS/DVL 组合导航系统误差状态方程如下:

$$\dot{X} = FX + Gw \quad (6)$$

式中, $X = [X_{SINS}^T \quad X_{DVL}^T]^T$, $w = [w_{SINS}^T \quad w_{DVL}^T]^T$

$$F = \begin{bmatrix} F_{SINS} & 0 \\ 0 & F_{DVL} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_{SINS} & 0 \\ 0 & G_{DVL} \end{bmatrix}。$$

SINS/DVL 组合导航系统量测方程为:

$$Z = \begin{bmatrix} V_N - V_{DN} \\ V_U - V_{DU} \\ V_E - V_{DE} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 V_N 、 V_U 、 V_E 为捷联惯导解算的速度, V_{DN} 、 V_{DU} 、 V_{DE} 为 DVL 测得的速度转换到导航坐标下的值。

2.2 加入洋流信息的导航算法

假设洋流为常值的情况下, 洋流在北天东三个方向的大小分别为 u_n 、 u_u 、 u_e 。

$$X_{current} = [u_n \quad u_u \quad u_e]^T \quad (8)$$

SINS/DVL 组合导航系统误差状态方程如下:

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

式中,

$$X = [X_{SINS}^T \quad X_{DVL}^T \quad X_{current}^T]^T$$

$$w = [w_{SINS}^T \quad w_{DVL}^T \quad w_{current}^T]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{SINS} & 0 & 0 \\ 0 & F_{DVL} & 0 \\ 0 & 0 & F_{current} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{SINS} & 0 & 0 \\ 0 & G_{DVL} & 0 \\ 0 & 0 & G_{current} \end{bmatrix}$$

SINS/DVL 组合导航系统量测方程为:

$$Z = \begin{bmatrix} V_N - V_{DN} - u_n \\ V_U - V_{DU} - u_u \\ V_E - V_{DE} - u_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

分别对上述两种情况进行离散型卡尔曼滤波, 方程如下^[5]:

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (11)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}) \quad (12)$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (13)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (14)$$

综合上述方程, 分别建立了不考虑洋流和考虑洋流两种情况下的 AUV 导航解算程序。

3 仿真研究

为了检验洋流对 AUV 捷联惯导定位的影响, 分别在不考虑洋流和考虑洋流影响情况下进行了 AUV 的 SINS/DVL 组合导航仿真分析研究。

SINS/DVL 仿真初始化数据为:

1) 初始位置: 纬度 $L(0) = 18^\circ 30'$, 经度 $\lambda(0) = 109^\circ 30'$, 深度 $h(0) = -20\text{m}$;

2) 初始速度: 8m/s ;

3) 初始姿态角: 横滚角 $\varphi = 0^\circ$, 航向角 $\psi = 0^\circ$, 俯仰角 $\theta = 0^\circ$;

4) 仿真参数初始误差如表 2 所示。

表 2 仿真参数初始误差

参数	意义	数值
$\delta L(0)$, $\delta \lambda(0)$, $\delta h(0)$	初始位置误差	10m, 10m, 0.1m
$\delta V_N(0)$, $\delta V_U(0)$, $\delta V_E(0)$	初始速度误差	0.1m/s, 0.1m/s, 0.1m/s
$\delta \varphi_N(0)$, $\delta \varphi_U(0)$, $\delta \varphi_E(0)$	初始姿态误差	5', 10', 5'

5) SINS 的误差源参数如表 3 所示。

表 3 SINS 误差源参数

误差源参数	均方根
陀螺常值漂移	0.02°/h, 0.02°/h, 0.02°/h
陀螺随机漂移	0.01°/h, 0.01°/h, 0.01°/h
加速度计零偏	100μg, 100μg, 100μg
加速度计随机漂移	50μg, 50μg, 50μg

6) DVL 仿真参数如表 4 所示, 输出数据频率为 2Hz。

表 4 DVL 仿真参数

参数	均方根	相关时间
测速误差 $\delta V_{dx}, \delta V_{dy}, \delta V_{dz}$	0.02m/s, 0.02m/s, 0.02m/s	300s, 300s, 300s

7) 选取地球参数长半轴 $R_e = 6378160\text{m}$, 椭圆度 $e = 1/298.3$, 海水深度大于 300 m, 地球自转角速度 $\omega_e = 7.2921151467 \times 10^{-5}\text{rad/s}$, 仿真时间为 3600 s。

由以上初始设置可知, 海洋深度大于 RDI Workhouse 导航 DVL 工作在底跟踪模式的最大距离, 因此该 DVL 在仿真过程中一直处于流跟踪工作模式。

在不考虑洋流的情况下, SINS/DVL 组合导航算法解算出的位置与实际位置的误差如图 1, 速度误差如图 2。

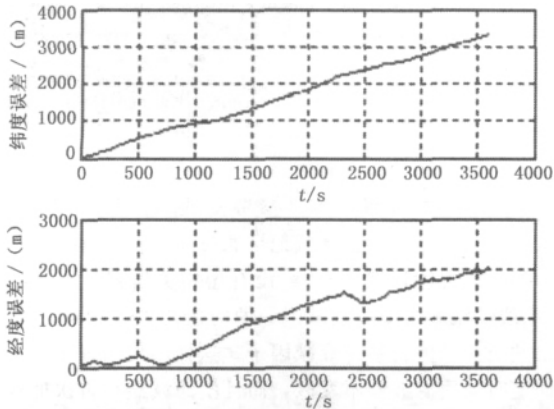


图 1 未考虑洋流情况下的导航定位误差

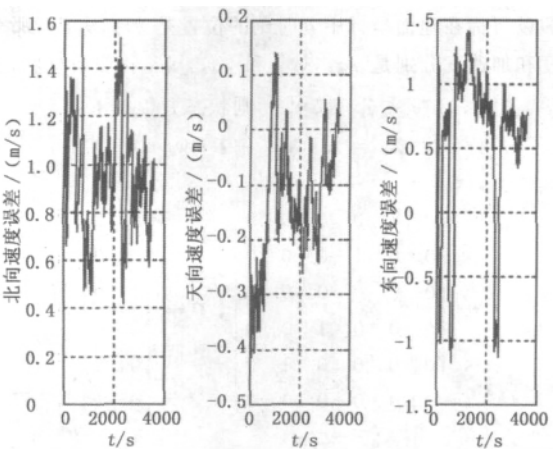


图 2 未考虑洋流情况下的速度误差

在考虑洋流的情况下, SINS/DVL 组合导航算法解算出的

位置与实际位置的误差如图 3, 速度误差如图 4。

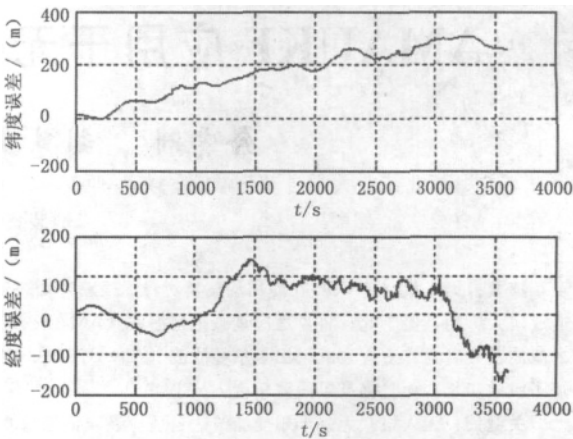


图 3 考虑洋流情况下的导航定位误差

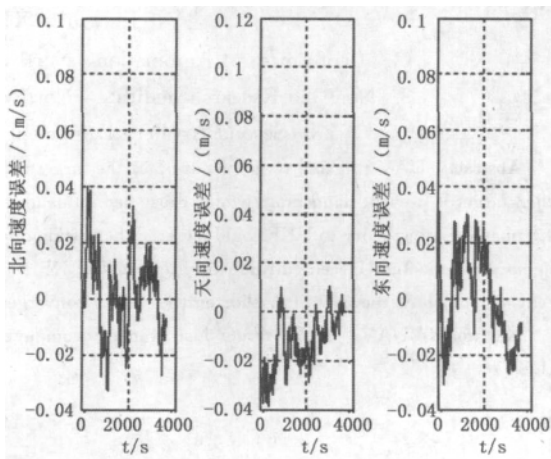


图 4 考虑洋流情况下的速度误差

对比图 2 和图 4, 可知考虑洋流情况下 DVL 测得的速度误差最大不超过 0.03 m/s, 实验中 AUV 速度大于 8 m/s, 因而速度误差是在 DVL 测量误差 $\pm 0.4\%$ 范围内, 而未考虑洋流速度使得 SINS/DVL 组合导航算法中采用 DVL 测得的速度与真实速度差别较大, 导致解算出的位置信息存在如下状况: 图 1 中, 解算出的位置与实际位置误差越来越大。而图 3 中, AUV 自身解算出的位置虽然与实际位置存在一定的误差, 但是随时间的增加误差的增长变慢。

4 结论

由于测量距离和测量精度的限制, DVL 大部分时间工作在水跟踪状态下, 在此条件下对比两组数据图, 可知 DVL 发出的速度信息是 AUV 相对于海水的速度, 如果不考虑洋流信息, 无法得到 AUV 对海底的绝对速度, 从而导致解算出的位置误差较大, 并且随着 AUV 航行时间的增加, 误差不断积累, 导致误差越来越大。在位置解算过程中加入洋流信息, 由图可知定位误差明显减小。从上述分析可知洋流是 AUV 导航定位系统进行航位推算的主要误差源之一, 因而在 AUV 导航定位解算中充分利用洋流信息, 能够有效减小洋流对其导航定位精度的影响。

(下转第 522 页)

3 实测结果和结论

实测扫频干扰器在 400~470MHz 频率范围输出功率为 16.5dBm (AT437C 射频功率计配 AT11802 功率传感器测定)。扫频信号的频谱图如图 3 所示 (使用 AT5011+ 频谱分析仪)。由于频谱分析仪扫频周期的影响,看到的谱线是分离的,而实际扫频频率间隔只有 500Hz。

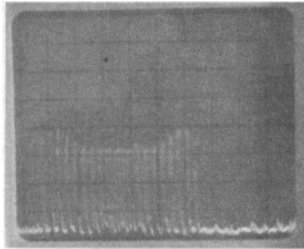


图 3 扫频信号频谱图

为增强屏蔽效果,在干扰器输出端加了 400~470MHz 输出功率为 5W 的射频功率放大器。频谱仪观察到的干扰 439.9MHz 短信橡皮信号效果如图 4 与图 5 所示。

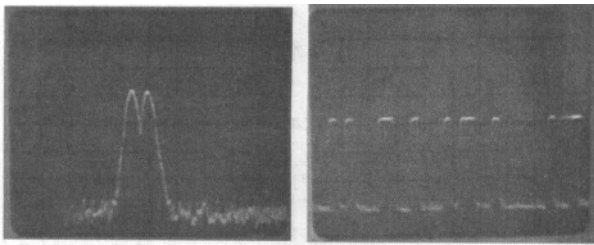


图 4 未被干扰的数传信号和解调波形

从图 4 与图 5 的对比可以看出,释放干扰后,数传信号被扫频信号覆盖,解调出来的信号中也包含了较大的噪声。经实测,该干扰器能在一定距离内有效屏蔽 400~470MHz 频段内的短信橡皮信号,使此类文字数传设备接收不到信息,同时,扫频范围控制准确、谐波少,不会影响考务用对讲机、播放听

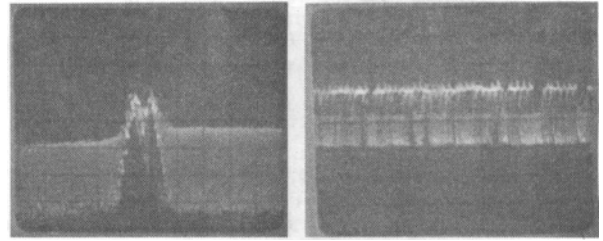


图 5 被干扰的数传信号和解调波形

力试题的校园广播等正常无线通信,适用于英语四、六级考试、高考、高校期末考试等大型考试中的防作弊干扰。

参考文献:

- [1] 王 凯. 短信发射机作弊案例分析与查处对策 [J]. 中国无线电, 2009, 06: 56—59.
- [2] 王亚莉, 孙信群. 对考试作弊数字信号干扰效果的讨论 [J]. 中国无线电, 2010, 09: 66—67.
- [3] 尚 飞, 杨仕飞, 高本庆, 等. 新型数字式扫频噪声源的实现 [J]. 无线电工程, 2005, 35 (3): 11—13.
- [4] 洪 韬, 王 超, 张学斌. 压制式毫米波干扰模拟器设计 [J]. 电子技术应用, 2008, 8: 93—99.
- [5] 赵 峰. 针对民用对讲机的扫频干扰源探讨 [J]. 科技资讯, 2009, 33: 208—209.
- [6] 曹 艳, 蔡竟业, 杨亦师, 等. ADI 常用 DDS 的线性扫频特性比较研究 [J]. 国外电子元器件, 2007, 3: 60—64.
- [7] 丘晓杰. AD9854 及其在直扩发射机中的应用 [J]. 国外电子元器件, 2002, 12: 19—21.
- [8] 徐述武, 汪海勇, 唐云峰. 基于 ADF4350 锁相频率合成器的频率源设计与实现 [J]. 电子器件, 2010, 06: 725—729.
- [9] Analog Devices. 利用 LO 二分频调制器构建宽带低 EVM 直接变频发射机 [BE/OL]. [2010—5] http://www.analog.com/static/imported-files/zh/circuit_notes/CN0144.pdf.
- [10] Yuping Toh. IQ 宽带调制器实现宽带无线电通信设计 [J]. 今日电子, 2007, 6: 62—64.

(上接第 515 页)

参考文献:

- [1] 严恭敏. 车载自主定位定向系统研究 [D]. 西安, 西北工业大学博士学位论文, 2006.
- [2] 秦 瑞, 王顺伟, 袁晓峰, 等. 多普勒测速仪/捷联惯导组合导航技术研究 [J]. 战术导弹技术, 2006, (6): 68—72.
- [3] 姚 尧. UUV 协同定位技术研究 [D]. 西安, 西北工业大学博士学位论文, 2010.
- [4] DU Xiao-xu, SONG Bao-wei, PAN Guang. Effect of ocean current to low velocity maneuvers of torpedo-like long-distance AUV [C]. 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009, 575—578.
- [5] 秦永元. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.

- [6] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于长基线的多 AUV 协同导航 [J]. 机器人, 2009, (11): 581—593.
- [7] 张立川, 刘明雍, 徐德民, 等. 基于水声传播延迟的主从式多无人水下航行器协同导航定位研究 [J]. 兵工学报, 2009, (12): 1674—1678.
- [8] 张立川, 刘明雍, 徐德民, 等. 多 UUV 协同导航与定位研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, (10): 5342—5349.
- [9] 李闻白, 刘明雍, 高俊钊, 等. 洋流影响下基于单领航者的多 AUV 协同导航 [J]. 鱼雷技术, 2010, (8): 277—281.
- [10] 张永清. 基于距离量测的多 AUV 协同导航技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2011.
- [11] 张加全. 基于运动矢径的主从式 AUVs 协同定位方法研究 [D]. 西安, 西北工业大学, 2011.
- [12] 张天光, 王秀萍, 王丽霞. 捷联惯性导航技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.