

## 一种基于相对测量信息的 SINS/USBL 组合导航算法

张亚文, 莫明岗, 马小艳, 邓继权

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:** 针对使用传统位置匹配算法解决 SINS/USBL 组合导航的问题, 需要先利用 USBL 输出信息实时求解出载体的绝对位置, 设计了一种基于相对测量信息的 SINS/USBL 组合导航算法。该算法无需求解绝对位置, 直接利用超短基线系统原始输出的高度角、方位角和斜距等相对测量信息进行卡尔曼滤波组合导航, 且在滤波器设计时能够根据传感器测量精度对滤波参数进行设计, 更有针对性。通过理论数据仿真和湖面试验数据处理, 证明了该组合导航算法能够在一定程度上提高导航精度, 具有可行性。

**关键词:** 组合导航; 相对测量信息; 直接输出

**中图分类号:** V249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2095-8110(2016)02-0007-07

### An Algorithm Used in Underwater SINS/USBL Integrated Navigation

ZHANG Ya-wen, MO Ming-gang, MA Xiao-yan, DENG Ji-quan

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** For the problem that the traditional position integrated navigation must be working after the absolute position of the USBL (Ultra Short Base Line) was evaluated, design a new integrated navigation algorithm which observes the relative measurement information. The algorithm no longer needs to evaluate the absolute position, and it can do the KF integrated navigation by means of observing the immediate data of USBL outputs, the relative measurement information (depression, bearing and range), and design the KF parameter based on the USBL sensor measurement precision. Besides, a theory simulation and a lake test data analysis prove the improvement and the practicability of the new integrated navigation algorithm.

**Key words:** Integrated navigation; Relative measurement information; Immediate output

## 0 引言

捷联惯导系统 (SINS) 能够在较短的时间内为水中载体提供精确的位置信息, 但随着时间推移, 误差累积会严重影响导航精度, 需要额外的信息对该误差进行修正<sup>[1]</sup>。超短基线 (USBL) 定位系统能够测量应答器相对于基阵的高精度位置信息<sup>[2-3]</sup>, 可以用来抑制惯导系统误差的发散。此外, 超短基线定位系统以其成本低、便携性强、灵活性高和操作简单等特点, 在海洋工程、海洋

矿产资源、水下考古、海洋国防建设等领域中得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。因此, SINS/USBL 组合导航成为了水下导航技术研究的热点。

传统的 SINS/USBL 组合导航方法, 主要是参考通用位置匹配算法, 即以惯性导航系统给出的经度、纬度和高度与辅助导航定位设备给出的相应信息的差值作为位置观测量。然而, 由于 USBL 直接输出的是应答器相对于基阵的距离和方位信息, 即高度角  $\alpha$ 、方位角  $\beta$  和斜距  $R$ <sup>[5]</sup>。若利用传统位置匹配算法, 则需要先利用 USBL 输出的相对

收稿日期: 2014 - 11 - 18; 修订日期: 2015 - 03 - 02。

作者简介: 张亚文 (1990 - ), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事惯性/水声组合导航技术研究。

E-mail: zhangyawen0927@126.com

距离和方位、应答器的绝对位置、姿态矩阵和 USBL 与姿态传感器之间的标定矩阵等信息, 求解出载体的绝对位置信息(经纬高), 然后才能进行组合导航。由于受到标定误差、姿态误差等影响, 直接解算的位置存在一定的误差, 会影响精度。此外, 在滤波器设计时, 无法根据 USBL 传感器精度, 合理选取部分滤波参数。针对以上问题, 结合 USBL 自身输出特点, 提出并设计一种直接利用 USBL 输出的高度角、方位角和斜距等相对测量信息的 SINS/USBL 组合导航算法。在模型中考虑姿态误差和安装误差等因素, 能够在一定程度上提高定位精度。

### 1 超短基线定位方式及定位误差分析

超短基线定位系统主要由水声收发基阵和应答器构成。通过测量声波传回基阵各基元之间的相位差, 实现对应答器的测向, 获得应答器相对于基阵的高度角  $\alpha$  和方位角  $\beta$ ; 通过测量接收时刻和发射时刻的时间延迟, 实现对应答器的测距, 获得应答器相对于基阵的斜距  $R$ <sup>[6]</sup>。最终利用高度角  $\alpha$  和方位角  $\beta$  将斜距  $R$  投影到基阵坐标系中, 可得基阵坐标系中应答器相对于基阵中心的位置信息  $(x, y, z)$

$$\begin{cases} x = R \cos \alpha \cos \beta \\ y = R \sin \alpha \\ z = R \cos \alpha \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

这便是 USBL 相对定位的基本原理。USBL 绝对定位工作原理如图 1 所示。

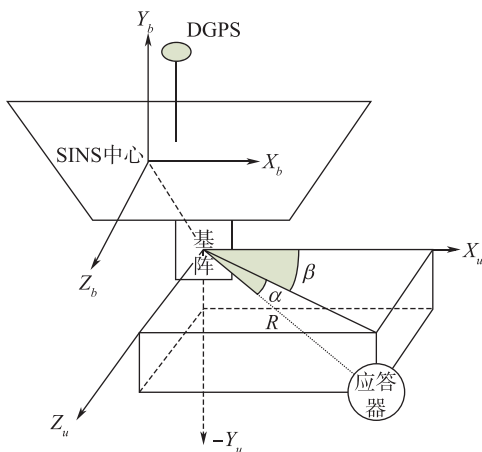


图 1 USBL 定位原理图

Fig. 1 The scheme of USBL positioning theory

USBL 基阵与载体和惯导刚性固连, 将已知位置的应答器固定在水下, 并对其位置  $P_r^e$  进行事先标定, 结合惯导的航向姿态转换矩阵  $C_b^n$  和 USBL 提供的基阵系中应答器相对基阵的位置信息, 以及 USBL 与 SINS 之间的安装误差标定矩阵  $C_u^b$ , 利用式(2)求取 USBL 基阵的绝对位置。再补偿 USBL 基阵中心相对 SINS 中心的位置杆臂  $\Delta P_{bu}^b$ , 便可得到与 USBL 基阵的刚性固连的载体 SINS 中心的绝对位置。

$$\begin{aligned} P_{SINS}^e &= P_r^e - C_n^e C_b^n \Delta P_{bu}^b - C_n^e C_b^n (C_u^b P_{ur}^u) \\ &= P_r^e - C_n^e C_b^n (\Delta P_{bu}^b + C_u^b P_{ur}^u) \end{aligned} \quad (2)$$

超短基线系统的定位误差源可分为以下两类:

1) 传感器误差: USBL 基阵测距误差、USBL 测角误差、测距交会求解造成的误差、超短基线基阵阵元相位差引起的误差、声传播引起的误差、声学噪声引起的误差等, 此类误差大都受制于超短基线设备本身的性能指标。

2) 系统误差: 此类误差常存在于使用过程中, 包括: 外部航向姿态误差、基阵坐标系和姿态传感器坐标系之间的安装角误差和应答器的绝对位置误差等。后两种误差源常通过事先高精度的标定校准来减小。

本文提出并设计的 SINS/USBL 组合导航算法在惯导误差建模的基础上, 将对测距误差、测角误差和两坐标系间的安装角误差等三项误差源进行建模补偿。

## 2 组合导航模型及滤波方程

### 2.1 组合导航系统状态模型

组合导航系统误差状态模型包括 SINS 的误差状态模型和 USBL 的误差状态模型。

#### 2.1.1 SINS 的误差状态模型

选取惯导载体坐标系  $b$  为前上右坐标系, 导航坐标系  $n$  为北天东坐标系。选取传统 15 维惯导系统误差状态量<sup>[7]</sup>, 即速度误差  $\delta V_n = [\delta V_N \ \delta V_U \ \delta V_E]^T$ , 姿态误差  $\varphi_n = [\varphi_N \ \varphi_U \ \varphi_E]^T$ , 位置误差  $\delta P_n = [\delta \varphi \ \delta h \ \delta \lambda]^T$ , 陀螺漂移  $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$ , 加表零位  $\nabla = [\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$ 。即相应 SINS 误差状态量为

$$X_{SINS} = [\delta V_n \ \varphi_n \ \delta P_n \ \varepsilon \ \nabla]^T \quad (3)$$

捷联惯性导航误差状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{SINS}} = \mathbf{F}_{\text{SINS}} \mathbf{X}_{\text{SINS}} + \mathbf{G}_{\text{SINS}} \mathbf{W}_{\text{SINS}} \quad (4)$$

### 2.1.2 USBL 的误差状态模型

通过实验数据处理发现, USBL 自身测角精度以及 USBL 基阵坐标系到 SINS 载体坐标系的安装角标定精度对定位精度影响很大。从数值角度粗略分析: 如果 USBL 测量的方位角  $\beta$  或者航向安装误差角  $\theta_y$  有  $1^\circ$  误差, 则会引入约  $1.7\%R$  的水平位置误差, 而且随着斜距  $R$  变大误差会进一步增大。USBL 的测角精度和噪声受 USBL 设备的限制, 但测角误差在工作范围内都为小角度。此外, 安装角误差可以通过事先标定使其减小为一个小角度误差, 因此, 本文将 USBL 到 SINS 的安装误差角  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T$  和高度角  $\alpha$  和方位角  $\beta$  的误差  $[\delta\alpha \ \delta\beta]$  设计为卡尔曼滤波组合导航的误差状态量。

由于海洋环境并不安静, 波浪、船只和波浪所形成的空气气泡及温度、盐度等水文气象要素都对超短基线水声定位系统起着不可忽视的作用<sup>[8]</sup>, 主要影响声波的传播, 即对 USBL 的测距精度产生影响。故也将 USBL 测距精度误差  $\delta Kd$  设计为卡尔曼滤波组合导航的误差状态量。

综上所述, USBL 的误差状态量为

$$\mathbf{X}_{\text{USBL}} = [\theta_x \ \theta_y \ \theta_z \ \delta\alpha \ \delta\beta \ \delta Kd]^T \quad (5)$$

由于安装误差角、测角误差和 USBL 测距精度误差等均为小量, 因此视为随机常数。对应的卡尔曼滤波状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{USBL}} = \mathbf{F}_{\text{USBL}} \mathbf{X}_{\text{USBL}} + \mathbf{G}_{\text{USBL}} \mathbf{W}_{\text{USBL}} \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{F}_{\text{USBL}} = [\mathbf{0}_{6 \times 6}]$ 。

### 2.1.3 组合导航系统误差状态模型

结合 2.1.1 和 2.1.2 可得, 21 维的组合导航系统误差状态量为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_{\text{SINS}} \ \mathbf{X}_{\text{USBL}}]^T \quad (7)$$

则组合导航系统误差状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_{\text{SINS}} \\ \dot{\mathbf{X}}_{\text{USBL}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{SINS}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_{\text{USBL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{SINS}} \\ \mathbf{X}_{\text{USBL}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\text{SINS}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_{\text{USBL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{SINS}} \\ \mathbf{W}_{\text{USBL}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

简化误差状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (9)$$

### 2.2 组合导航系统观测模型

本文以解算位置已知的应答器相对于惯导在基阵坐标系  $u$  中的高度角  $\alpha_s^u$ 、方位角  $\beta_s^u$  和斜距  $R_s^u$ , 与 USBL 直接输出的高度角  $\alpha_v^u$ 、方位角  $\beta_v^u$  和斜距  $R_v^u$  的相应量的差值作为观测量。

基阵坐标系中应答器相对于惯导的高度角、方位角和斜距为

$$\begin{bmatrix} \alpha_s^u \\ \beta_s^u \\ R_s^u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan(Y_s^u / \sqrt{(X_s^u)^2 + (Z_s^u)^2}) \\ \arctan(Z_s^u / X_s^u) \\ \sqrt{(X_s^u)^2 + (Y_s^u)^2 + (Z_s^u)^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对其求偏微分可得

$$\begin{bmatrix} \delta\alpha_s^u \\ \delta\beta_s^u \\ \delta R_s^u \end{bmatrix} = \mathbf{A}_s \begin{bmatrix} \delta X_s^u \\ \delta Y_s^u \\ \delta Z_s^u \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} -X_s^u Y_s^u / R_s^{u2} & R_{\text{level}} / R_s^{u2} & -Z_s^u Y_s^u / R_s^{u2} \\ R_s^{u2} / R_{\text{level}} & R_s^{u2} & R_s^{u2} / R_{\text{level}} \\ -Z_s^u / R_{\text{level}}^2 & 0 & -X_s^u / R_{\text{level}}^2 \\ X_s^u / R_s^u & Y_s^u / R_s^u & Z_s^u / R_s^u \end{bmatrix}。$$

为了求得更加精准的位置信息, 避免球面坐标系中小角度近似误差, 因此本文选取在模型更加精准的地球直角坐标系中进行位置求解。地球直角坐标系的原点  $o$  位于旋转椭球体中心,  $z$  轴与地球自转轴重合, 正向沿地球自转方向,  $x$  轴和  $y$  轴位于赤道平面内,  $x$  轴穿过本初子午线,  $y$  轴穿过东经  $90^\circ$  子午线。

应答器的位置为  $\mathbf{P}_r = [\varphi_r \ h_r \ \lambda_r]$ , 惯导解算的位置为  $\mathbf{P}_s = [\varphi_s \ h_s \ \lambda_s]$ , 通过地球定位中球面坐标系到直角坐标系的转换公式<sup>[9]</sup>, 则二者在地球直角坐标系的相对位置为  $\mathbf{r}_e$

$$\mathbf{r}_e = \begin{bmatrix} (R_N + h_r) \cos\varphi_r \cos\lambda_r - (R_N + h_s) \cos\varphi_s \cos\lambda_s \\ (R_N + h_r) \cos\varphi_r \sin\lambda_r - (R_N + h_s) \cos\varphi_s \sin\lambda_s \\ [R_N(1 - e^2) + h_r] \sin\varphi_r - [R_N(1 - e^2) + h_s] \sin\varphi_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过坐标变化并补偿杆臂误差, 得到基阵坐标系  $u$  中应答器相对惯导的位置

$$[X_S^u \ Y_S^u \ Z_S^u]^T = C_b^u C_n^b C_e^n r_e - C_b^u \Delta P_{bu}^b \quad (13)$$

引入误差量可得

$$\begin{aligned} & [X_S^u + \delta X_S^u \ Y_S^u + \delta Y_S^u \ Z_S^u + \delta Z_S^u]^T \\ &= C_b^u (1 - \theta \times) C_n^b (1 + \varphi \times) (C_e^n + \delta C_e^n) (r_e + \delta r_e) - \\ & C_b^u \Delta P_{bu}^b = C_b^u C_n^b C_e^n r_e - C_b^u (\theta \times) C_n^b C_e^n r_e + \\ & C_b^u C_n^b (\varphi \times) C_e^n r_e + C_b^u C_n^b \delta C_e^n r_e + \\ & C_b^u C_n^b C_e^n \delta r_e - C_b^u \Delta P_{bu}^b \end{aligned} \quad (14)$$

则有

$$\begin{aligned} & [\delta X_S^u \ \delta Y_S^u \ \delta Z_S^u]^T \\ &= C_b^u C_n^b (\varphi \times) C_e^n r_e + C_b^u C_n^b \delta C_e^n r_e + \\ & C_b^u C_n^b C_e^n \delta r_e - C_b^u (\theta \times) C_n^b C_e^n r_e \end{aligned} \quad (15)$$

综合式 (10) ~ 式 (15) 可得

$$\begin{bmatrix} \delta \alpha_S^u \\ \delta \beta_S^u \\ \delta R_S^u \end{bmatrix} = A_S ([ - C_b^u C_n^b (r_n \times) ] \varphi + [ C_b^u (r_b \times) ] \theta) + A_S ([ C_b^u C_n^b B_S + C_b^u C_n^b C_e^n C_S ] \delta P_n) \quad (16)$$

其中:

$$\begin{aligned} r_n &= C_e^n r_e, r_b = C_n^b C_e^n r_e, \\ B_S &= \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\lambda_x + \cos\varphi \sin\lambda_y + \sin\varphi z_e & 0 & -\sin\varphi \sin\lambda_x + \sin\varphi \cos\lambda_y \\ \sin\varphi \cos\lambda_x + \sin\varphi \sin\lambda_y - \cos\varphi z_e & 0 & \cos\varphi \sin\lambda_x - \cos\varphi \cos\lambda_y \\ 0 & 0 & \cos\lambda_x + \sin\lambda_y \end{bmatrix}, \\ C_S &= \begin{bmatrix} (R_N + h) \sin\varphi \cos\lambda & -\cos\varphi \cos\lambda & (R_N + h) \cos\varphi \sin\lambda \\ (R_N + h) \sin\varphi \sin\lambda & -\cos\varphi \sin\lambda & -(R_N + h) \cos\varphi \cos\lambda \\ R_N (1 - e^2) h \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

令高度角、方位角和斜距的真值依次为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R$ ，则有

$$\begin{bmatrix} \alpha_S^u \\ \beta_S^u \\ R_S^u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha + \delta \alpha_S^u \\ \beta + \delta \beta_S^u \\ R + \delta R_S^u \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \alpha_U^u \\ \beta_U^u \\ R_U^u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha + \delta \alpha_U^u \\ \beta + \delta \beta_U^u \\ R + \delta R_U^u \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中:  $R + \delta R_U^u = R(1 + \delta Kd) = R + R\delta Kd$ 。

故观测方程为

$$\begin{aligned} Z &= \begin{bmatrix} \alpha_S^u - \alpha_U^u \\ \beta_S^u - \beta_U^u \\ R_S^u - R_U^u \end{bmatrix} = A_S [ - C_b^u C_n^b (r_n \times) ] \varphi + \\ & A_S [ C_b^u C_n^b B_S + C_b^u C_n^b C_e^n C_S ] \delta P_n + \\ & A_S [ C_b^u (r_b \times) ] \theta - \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \alpha_U^u \\ \delta \beta_U^u \\ \delta Kd \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{令 } H_\varphi = A_S [ - C_b^u C_n^b (r_n \times) ],$$

$$H_{\delta P} = A_S [ C_b^u C_n^b B_S + C_b^u C_n^b C_e^n C_S ],$$

$$H_\theta = A_S [ C_b^u (r_b \times) ], \quad H_U = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}.$$

则观测矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & (H_\varphi)_{3 \times 3} & (H_{\delta P})_{3 \times 3} & 0_{6 \times 3} \\ (H_\theta)_{3 \times 3} & (H_U)_{3 \times 3} & & \end{bmatrix} \quad (19)$$

简化观测方程为

$$Z = HX + v \quad (20)$$

### 2.3 卡尔曼滤波模型

对式 (9) 和式 (20) 进行离散化处理可得 SINS/USBL 组合导航的卡尔曼滤波模型为

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_{k+1/k} X_k + \Gamma_k W_k \\ Z_{k+1} = H_{k+1} X_{k+1} + V_{k+1} \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $W_k$  和  $V_{k+1}$  均为白噪声, 且方差阵依次为  $Q$ 、 $R$ 。

本方法采用标准卡尔曼滤波算法基本方程<sup>[10]</sup>, 选择合适的滤波初值 (状态初始值、初始估计均方误差阵、系统噪声初始方差阵以及量测噪声方差阵), 进行滤波估计, 并实时修正速度、姿态和位置信息。

### 3 理论数据仿真分析

惯导初始地理位置北纬 39.8° 东经 116.2° 高度为 0, 以 3m/s (约 6 节) 的前向速度环绕应答器 (北纬 39.8000235° 东经 116.199167°, 高度 -50m) 行驶 1000s, 理想初始航向姿态角都为 0°。惯导采样周期为 5ms, USBL 数据更新周期为 2s, 组合导航周期为 2s。各传感器误差源和初始误差设置如表 1 所示。

表 1 传感器误差源和导航初始误差设置

Tab. 1 Error of the sensor and initial navigation

陀螺漂移	加表零偏	航向误差	俯仰横滚误差	安装角误差	USBL 测角误差	测距精度误差
0.02(°)/h	5×10 <sup>-4</sup> g	0.2°	0.02°	0.2°	1°	0.5

按照本文设计的基于相对测量信息组合导航算法进行仿真, 并与纯惯性导航和 USBL 定位进行对比, 如表 2 所示, 本方法 1σ 定位精度 2 倍优于 USBL 定位。误差曲线如图 2~图 7。

表 2 1σ 定位精度对比

Tab. 2 The comparison of positioning precision

	纯惯性导航	本方法	USBL 定位
定位精度 (1σ)	916.5m	1.53m	3.44m

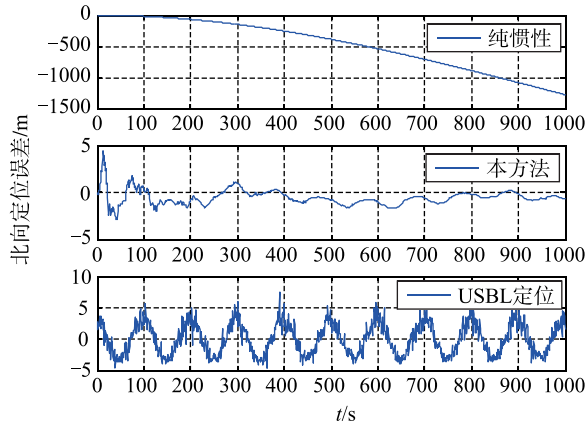


图 2 北向位置误差图

Fig. 2 North position error

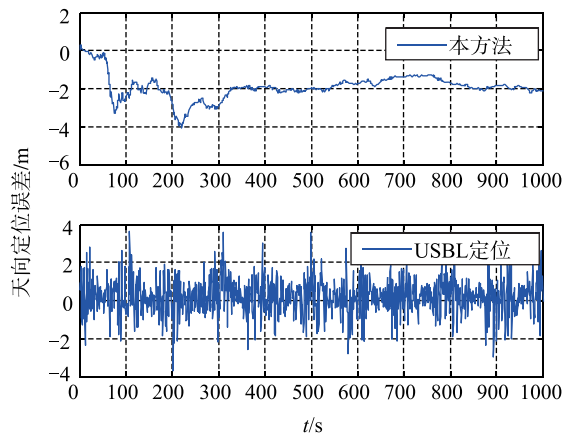


图 3 天向位置误差

Fig. 3 Up position error

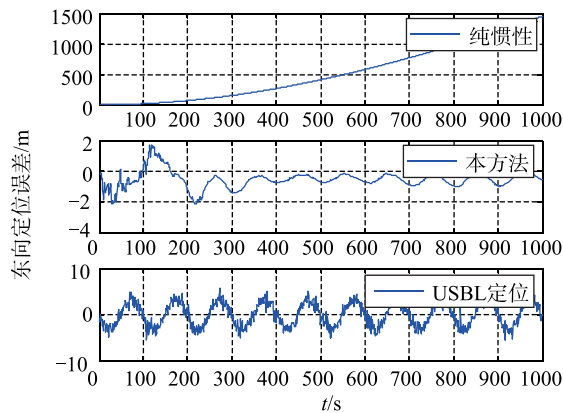


图 4 东向位置误差

Fig. 4 East position error

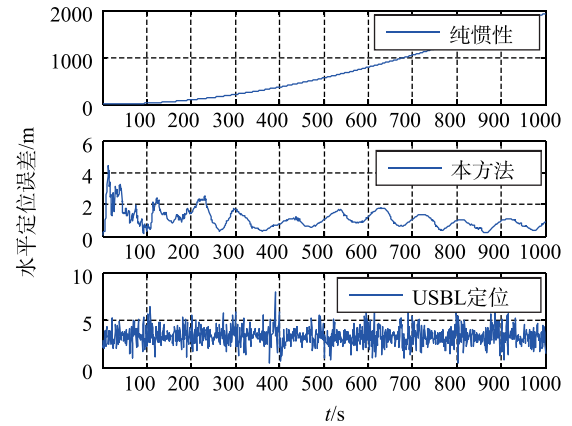


图 5 水平定位误差

Fig. 5 Horizontal position error

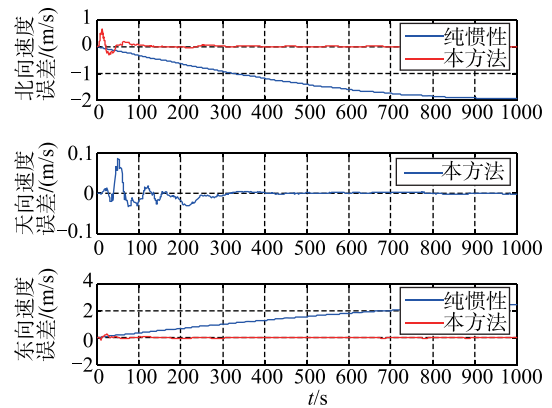


图 6 北天东速度误差

Fig. 6 The comparison of velocity error

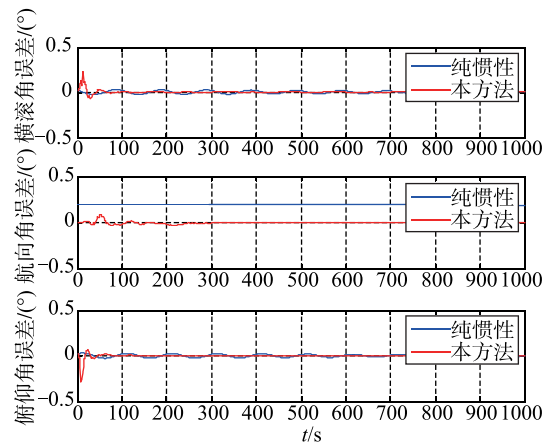


图 7 横滚角、航向角、俯仰角误差

Fig. 7 The comparison of attitude error

从图 2~图 5 定位误差曲线可以看出, 本算法能够有效地抑制位置误差发散, 且位置误差不随时间增长; 图 6 速度误差曲线显示出本方法能够有效地抑制速度误差发散; 从图 7 航向姿态误差曲线



可以看出, 本方法能够比较有效地抑制航向角误差和水平姿态角误差。综上所述, 在理论仿真情况下, 本文设计的基于相对测量信息的 SINS/USBL 水下组合导航算法, 不仅能有效地抑制速度误差和位置误差, 还能够估计惯导的航向姿态误差, 验证了理论仿真情况下的本算法的可行性。

#### 4 湖面实验数据处理分析

湖面试验系统主要包括: 光纤捷联惯导系统 (SINS)、USBL 系统和 DGPS 系统。光纤陀螺漂移优于  $0.02 (^{\circ})/h$ , 加表零偏优于  $30\mu g (1\sigma)$ 。USBL 系统采用 NavQuest 公司的 Track Link 1500HA 水下基阵和应答器, 其原始输出为高度角、方位角和斜距, 其测角精度优于  $1^{\circ}$ , 定位精度为  $0.5\%$ , 数据更新周期为  $2s$ 。

利用本文设计的基于相对测量信息的 SINS/USBL 组合导航算法对湖面试验采集的一组约为  $5000s$  导航原始数据进行处理分析, 并以 DGPS 的位置为基准信息, 考核组合导航算法的定位精度, 并与传统位置匹配算法进行对比。组合导航初始时刻, 先用 DGPS 对惯导的解算的位置速度进行重置, 以避免原始积累的误差对组合导航精度考核产生影响<sup>[11]</sup>。

从表 3 湖面试验定位精度可以看出, 本方法定位精度 ( $1\sigma$ ) 相比传统位置匹配算法有一定的提高。从图 8~图 10 湖面试验定位误差曲线可以看出, 相比传统算法, 本算法不仅能够有效抑制惯导位置的发散, 且定位误差更小、更加平滑。结合图 11 USBL 数据有效性判定结果可以看出, 位置误差噪声主要由于 USBL 数据判定无效, 导致组合导航不再进行量测更新, 只进行时间更新引起。综上所述, 本文设计的基于相对测量信息的 SINS/USBL 水下组合导航算法能有效地抑制速度误差, 且能一定程度上提高组合导航定位精度, 即验证了湖面试验数据情况下本算法的可行性。

表 3 湖面试验定位精度

Tab. 3 The comparison of lake test position precision

	本方法	传统方法
定位精度 ( $1\sigma$ )	3.30m	4.78m

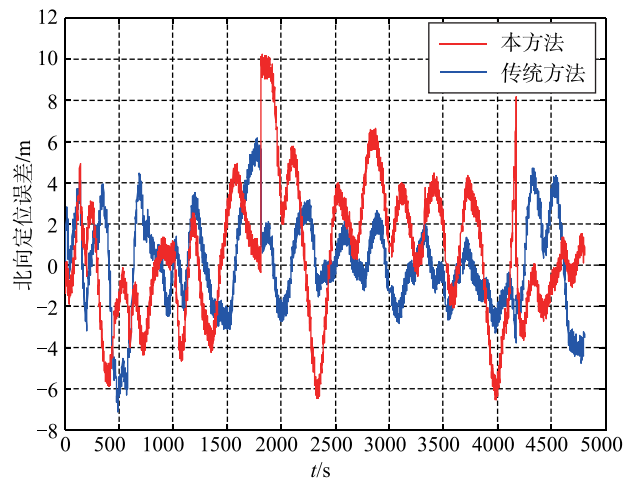


图 8 北向位置误差曲线

Fig. 8 North position error

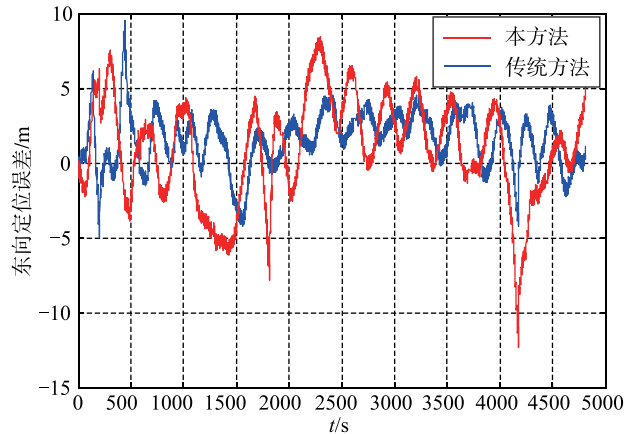


图 9 东向位置误差曲线

Fig. 9 East position error

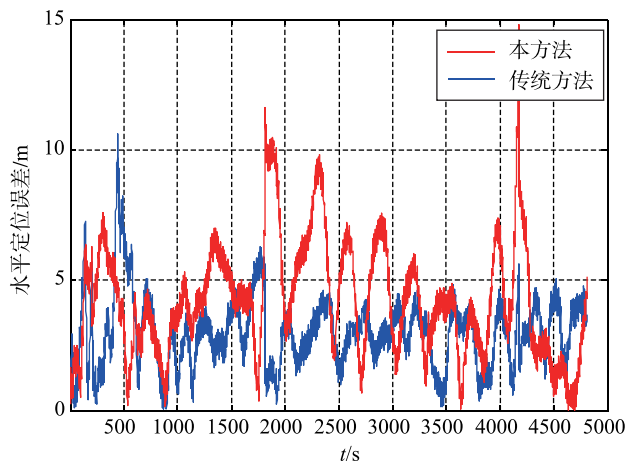


图 10 水平定位误差曲线

Fig. 10 Horizontal position error

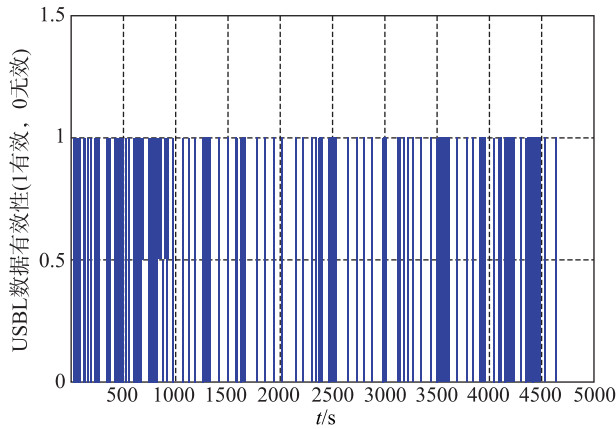


图 11 USBL 数据有效性判定结果

Fig. 11 USBL data valid judge result

## 5 结论

本文设计的基于相对测量信息的 SINS/USBL 组合导航算法, 利用了工程使用中 USBL 设备实际输出为高度角、方位角和斜距的特点, 摒弃了传统算法中绝对位置的解算, 且在滤波器设计时能够根据传感器测量精度对量测噪声进行设计, 更有针对性地解决了 SINS/USBL 组合导航的问题。理论仿真和湖面试验数据处理表明, 本算法能够实现高精度的水下导航定位, 且能够一定程度上提高组合导航定位精度, 具有可行性。

## 参考文献

- [1] 兰华林, 孙大军, 张殿伦, 李想. 单应答器导航深海实验[J]. 海洋工程, 2007, 25 (2): 110-113.
- [2] 隋海琛, 田春和, 韩德忠, 王崇明. 水下定位系统误差分析[J]. 水道港口, 2010, 31 (1): 69-72.
- [3] LinkQuestInc. TrackLink 1500 USBL Tracking System, User's Guide Version 1500.7.2.
- [4] 王德刚, 韩富江, 来向华, 苟诤慷, 傅晓明. 国家海洋局第二海洋研究所研究报告[J]. 海洋科学, 2011, 35 (2): 77-78.
- [5] LinkQuestInc. TrackLink 1500 USBL Tracking System, User's Guide Version 1500.7.2
- [6] 王德刚, 韩富江, 来向华, 苟诤慷, 傅晓明. 超短基线定位原理及校正方法研究[J]. 海洋科学, 2011, 35 (2): 77-80.
- [7] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 冯守珍, 吴永亭, 唐秋华. 超短基线声学定位原理及其应用[J]. 海岸工程, 2002, 21 (4): 13-18.
- [9] 史海锋, 张卫斌. 空间直角坐标与大地坐标转换算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32 (5): 78-81.
- [10] 秦永元, 张洪钺, 汪淑华. 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.
- [11] 唐康华, 江明明, 翁炬. 基于自适应滤波的水下 SINS/相控阵 DVL 组合导航算法设计[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21 (1): 66-70.