

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.015

大航程 AUV SINS/DVL 组合导航定位精度研究

钱辉¹, 丁永忠²

(1. 海军工程大学 鱼雷教研室, 湖北 武汉 430033;

2. 中国船舶重工集团公司 第 705 研究所 军代室, 陕西 西安 710075)

摘要: 为了进一步提高 AUV 的导航定位精度, 研究 SINS/DVL 组合导航系统在大航程 AUV 上的应用。首先, 建立其误差分析模型; 然后, 提出使用常规 kalman 滤波方程计算误差的思想; 最后, 在系统噪声与观测噪声已知 的情况下, 应用常规 kalman 滤波算法进行仿真分析。结果表明, 该滤波存在明显发散, 导致误差方差阵失去非负定性, 影响滤波增值。

关键词: SINS/DVL 组合导航系统; AUV 捷联惯导系统; kalman 滤波器; 系统测量方程; 仿真

中图分类号: TN965; O241.1 **文献标识码:** A

Research on Large Voyage AVU SINS/DVL Combined Navigation Orientation Precision

QIAN Hui¹, DING Yong-zhong²

(1. Staff Room of Torpedo, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Military Representatives Office, No. 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to improve the precision of AUV navigation orientation and research the application of SINS/DVL combined navigation system in the large voyage AUV. Firstly, the model of analyzing error will be established. Secondly, calculate the error by the normal kalman filter equation; lastly, use simulation to analyze the error by the normal kalman filter arithmetic with known system yawp and observation yawp. The result indicates that error array will be not non-negative definite any more because the filter is divergent obviously, it will make influence the filter increment.

Keywords: SINS/DVL combined navigation system; AUV SINS; Kalman filter; System measure equation; Simulation

0 引言

当前, 水下组合导航技术备受关注并发展迅速。惯导/多普勒 (SINS/DVL) 组合导航系统是目前高性能普遍采用的导航系统, 故对 SINS/DVL 组合导航系统在大航程自主水下航行器 Autonomous Underwater Vehicle(AUV)上的应用进行研究, 以提高 AUV 的导航定位精度。

1 SINS/DVL 误差模型建立

$$\begin{cases} \delta \dot{v}_x = (2\omega_{ie} v_y \cos L + \frac{v_x v_y}{R} \sec^2 L) \delta L + \frac{v_y}{R} \text{tg} L \delta v_x + (2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_y}{R} \text{tg} L) \delta v_y - f'_x \phi_y + f'_y \phi_z + \nabla_x \\ \delta \dot{v}_y = -(2\omega_{ie} v_x \cos L + \frac{v_x^2}{R} \sec^2 L) \delta L - (2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_x}{R} \text{tg} L) \delta v_x + f'_z \phi_x - f'_x \phi_z + \nabla_y \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi}_x = -\frac{\delta V_y}{R} + \phi_y (\omega_{ie} \sin L + \frac{V_x}{R} \text{tg} L) - \phi_z (\omega_{ie} \cos L + \frac{V_x}{R}) + \varepsilon_{gx} \\ \dot{\phi}_y = \frac{\delta V_x}{R} - \omega_{ie} \sin L \delta L - \phi_x (\omega_{ie} \sin L + \frac{V_x}{R} \text{tg} L) - \phi_z \frac{V_y}{R} + \varepsilon_{gy} \\ \dot{\phi}_z = \frac{\delta V_z}{R} \text{tg} L + \delta L (\omega_{ie} \cos L + \frac{V_x}{R} \sec^2 L) + \phi_x (\omega_{ie} \cos L + \frac{V_x}{R}) + \phi_y \frac{V_y}{R} + \varepsilon_{gz} \end{cases} \quad (3)$$

其中, δL 、 $\delta \lambda$ 为纬度、经度误差; δV_x 、 δV_y 表示东向、北向误差; ϕ_x 、 ϕ_y 表示北向、东向水平失

1) AUV 捷联惯导系统误差模型

根据捷联惯导系统长时间工作的误差特点, 选择 2 个位置误差 δL 、 $\delta \lambda$, 2 个水平速度误差 δV_x 、 δV_y , 3 个平台失准角 ϕ_x 、 ϕ_y 、 ϕ_z 作为状态变量, 得相应的线性误差方程如下:

$$\begin{cases} \delta \dot{L} = \frac{\delta V_y}{R} \\ \delta \dot{\lambda} = \frac{\delta V_x}{R} \sec L + \frac{V_x}{R} \sec L \text{tg} L \delta L \end{cases} \quad (1)$$

准角; ϕ_z 表示方位失准角; R 为地球半径; f'_x 、 f'_y 、 f'_z 表示加速度计测量值在当地地理坐标系的分量; ω_{ie} 、 L 表示地球自转角速度和当地纬度; ∇_x 、 ∇_y 表示加速度随机计漂移; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 表示陀螺漂移; ε_{gx} 、 ε_{gy} 、 ε_{gz} 表示等效到地理坐标系的陀螺漂移。

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2009-10-22

作者简介: 钱辉 (1979-), 男, 湖北人, 海军工程大学在读硕士, 从事控制与制导研究。

$$\begin{cases} \varepsilon_{gx} = C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{13}\varepsilon_z \\ \varepsilon_{gy} = C_{21}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y + C_{23}\varepsilon_z \\ \varepsilon_{gz} = C_{31}\varepsilon_x + C_{32}\varepsilon_y + C_{33}\varepsilon_z \end{cases} \quad (4)$$

式中, $C'_b(C'_{ij}, i, j=1,2,3)$ 表示姿态矩阵。

陀螺漂移模型用一阶马尔可夫过程表示。误差方程为:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_x = -\beta_x \varepsilon_x + w_x \\ \dot{\varepsilon}_y = -\beta_y \varepsilon_y + w_y \\ \dot{\varepsilon}_z = -\beta_z \varepsilon_z + w_z \end{cases} \quad (5)$$

式中, β_x^{-1} 、 β_y^{-1} 、 β_z^{-1} 表示一阶马尔可夫过程相应的相关时间, w_x 、 w_y 、 w_z 为激励白噪声。

2) 多普勒测速仪误差模型

$$\begin{cases} \delta \dot{V}_d = -\beta_d \delta V_d + w_d \\ \delta \dot{\Delta} = -\beta_\Delta \delta \Delta + w_\Delta \\ \delta \dot{K} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, δK 为刻度系数误差; δV_d 为速度偏移误差; $\delta \Delta$ 为偏流角误差; $\frac{1}{\beta_d}$ 、 $\frac{1}{\beta_\Delta}$ 表示速度偏移误差和偏流角误差的马尔可夫相关时间, w_d 、 w_Δ 为激励白噪声。

2 SINS/DVL 组合导航系统 kalman 滤波器

1) 系统状态方程

联合捷联惯导误差模型式 (1)~式 (4) 和 DVL 误差模型式 (5), 建立组合导航系统状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + W(t) \quad (7)$$

式中, 状态向量和系统噪声向量分别为:

$$X = [\delta L, \delta \lambda, \delta V_x, \delta V_y, \phi_x, \phi_y, \phi_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \delta V_d, \delta \Delta, \delta K]^T$$

$$W = [0, 0, \nabla_x, \nabla_y, 0, 0, 0, w_x, w_y, w_z, w_d, w_\Delta, 0]^T$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_{SINS7 \times 7} & \vdots & 0_{4 \times 3} & \vdots & 0_{7 \times 3} \\ & & C'_b & & \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ 0_{3 \times 7} & \vdots & A_G & \vdots & 0_{3 \times 3} \\ \dots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ 0_{3 \times 7} & \vdots & 0_{3 \times 3} & \vdots & A_{DVL3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, A_{SINS} 表示惯性导航系统状态转移矩阵; C'_b 表示姿态矩阵, 用于将陀螺漂移由载体坐标系转移到地理坐标系; A_G 表示陀螺反相关时间矩阵; A_{DVL} 表示多普勒计程仪误差反相关时间矩阵。

2) 系统测量方程

取惯导系统计算出的速度与多普勒测速仪测

出的速度之差作为系统的量测值, 用这个量测值建立的量测方程是线性的。如图 1, 多普勒地速由航迹角 ψ_v 分解到地理坐标系的北向和东向, 但计算的航迹角是平台航向角 ψ_p 和多普勒测出的偏流角 δ_d 之和, 因此有平台方位误差角 ϕ_z 和多普勒偏流误差角 Δ 的影响。设多普勒地速含有刻度系数误差 δK 、速度偏移误差 δv_d 和量测白噪声 η 则系统量测方程为:

$$\begin{cases} Z_x = -\delta v_x + v_y \phi_z + v_y \Delta + v_x \delta K + \delta v_d \sin \psi_v + \eta_x \\ Z_y = \delta v_y + v_x \phi_z + v_x \Delta - v_y \delta K - \delta v_d \cos \psi_v + \eta_y \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{令: } Z = [Z_x \quad Z_y]^T, \quad V = [\eta_x \quad \eta_y]^T$$

则量测方程表示为:

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (10)$$

其中, $H(t) =$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & v_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v_x & \sin \psi_v & v_y \\ 0 & 1 & 0 & 0 & v_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -v_y & -\cos \psi_v & v_x \end{bmatrix}$$

设 t_0 表示滤波器开始工作的时间, 则从所建立的模型可知:

$$\begin{cases} E[W(t)] = E[V(t)] = E[W(t)V^T(\tau)] = 0 \\ E[X(t_0)] = E[X(t_0)W^T(t)] = E[X(t_0)V^T(t)] = 0 \\ E[W(t)W^T(\tau)] = Q(t)\delta(t-\tau) \\ Q(t) = \text{diag}[\sigma_{\nabla_x}^2, \sigma_{\nabla_y}^2, 0, 0, 0, 0, 2\beta_x \sigma_x^2, 2\beta_y \sigma_y^2, 2\beta_z \sigma_z^2, 0, 2\beta_d \sigma_d^2, 2\beta_\Delta \sigma_\Delta^2] \\ E[V(t)V^T(\tau)] = R(t)\delta(t-\tau) \\ R(t) = \text{diag}[\sigma_{\eta_x}^2, \sigma_{\eta_y}^2] \end{cases} \quad (11)$$

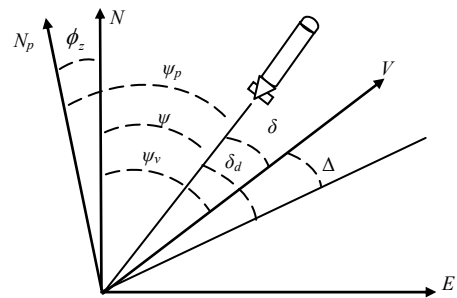


图 1 量测方程各角度之间关系示意图

3 仿真结果及分析

将所得的状态方程式 (6) 和量的方程式 (8) 离散化可的离散 Kalman 滤波方程:

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_{k+1/k} X_k + W_k \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\Phi_{k+1/k} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{T^n}{n!} A^n(t_k) \quad (13)$$

1) 仿真过程中的假设

(1) 设地球为球体，不考虑地球的椭球度及不规则的地球表面对捷联惯导系统的影响；

(2) 设地球自转角速度为常值，即 ω_{ie}^e 为常值，

$$\omega_{ie}^e = [\omega_{iez}^e \ 0 \ 0]^T;$$

(3) 设地球重力加速度为常值，即不考虑 g 随纬度变化， g_0 为赤道海平面上的重力加速度。

2) 仿真参数的给定

(1) 地球半径 $R_e = 6371 \text{ km}$ ；

(2) 赤道海平面上的重力加速度 $g_0 = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ；

(3) 地球自转角速率，

$$\omega_{ie} = 15.0411 (^\circ) / h = 7.29211 \times 10^{-5} \text{ rad/s}；$$

3) 仿真初始条件及初始数据

(1) AUV 初始位置：北纬 25° ；东经 120° ；

(2) AUV 速度： $V=8 \text{ kn}$ ；

(3) 仿真步长： $T=10 \text{ s}$ ；

4) 惯性元件指标和导航参数初始误差：

$$\sigma_{\delta\phi}^2(0) = \sigma_{\delta\lambda}^2(0) = 0$$

$$\sigma_{\delta V_x}^2(0) = \sigma_{\delta V_y}^2(0) = (0.1 \text{ m/s})^2$$

$$\sigma_{\phi_x}^2(0) = \sigma_{\phi_y}^2(0) = \sigma_{\phi_z}^2(0) = (2.424 \times 10^{-5})^2$$

$$\sigma_{\varepsilon_x}^2 = \sigma_{\varepsilon_y}^2 = \sigma_{\varepsilon_z}^2 = (0.1^\circ / h)^2 = (4.85 \times 10^{-6})^2$$

$$\sigma_{a_x}^2 = \sigma_{a_y}^2 = (1 \times 10^{-4} \text{ g})^2$$

$$\sigma_{\delta V_d}^2 = (0.05 \text{ m/s})^2$$

$$\sigma_{\delta\Delta}^2 = (1^\circ)^2 = (1.745 \times 10^{-3})^2 \quad \sigma_{\delta C}^2 = (0.001)^2$$

陀螺漂移 $\varepsilon_i (i = x, y, z)$ 、速度偏移误差 δV_d 、偏流角误差 $\delta\Delta$ 相关时间分别为 $\beta_i^{-1} = 1h, (i = x, y, z)$ ， $\beta_d^{-1} = 5 \text{ min}$ ； $\beta_\Delta^{-1} = 5 \text{ min}$ 。

5) 卡尔曼滤波器初始值

$$X_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$P_0 = \text{diag}[\sigma_{\delta\phi}^2(0), \sigma_{\delta\lambda}^2(0), \sigma_{\delta V_x}^2(0), \sigma_{\delta V_y}^2(0), \sigma_{\phi_x}^2(0),$$

$$\sigma_{\phi_y}^2(0), \sigma_{\phi_z}^2(0), \sigma_{\varepsilon_x}^2, \sigma_{\varepsilon_y}^2, \sigma_{\varepsilon_z}^2, \sigma_{\delta V_d}^2, \sigma_{\delta\Delta}^2, \sigma_{\delta C}^2]$$

$$Q = \text{diag}[0, 0, (0.1\sigma_{a_x})^2, (0.1\sigma_{a_y})^2, 0, 0, 0, q\varepsilon_x, q\varepsilon_y, q\varepsilon_z, q\delta V_d, q\delta\Delta, q\delta C]$$

$$R = \text{diag}[(0.005 \text{ m/s})^2 \quad (0.005 \text{ m/s})^2]$$

其中， $q\delta V_d = \sigma_{\delta V_d}^2(1 - e^{-2\beta_d T})$ ； $q\varepsilon_i = \sigma_{\varepsilon_i}^2(1 - e^{-2\beta_i T})$ ， $(i = x, y, z)$ ； $q\delta\Delta = \sigma_{\delta\Delta}^2(1 - e^{-2\beta_\Delta T})$ 。

不考虑捷联惯导系统初始对准误差，惯导数据由实验室实测得到，在系统噪声与观测噪声已知情况下，应用常规卡尔曼滤波算法仿真，如图 2。

预建 AUV 系统噪声与实际系统噪声不一致，观测噪声已知，仿真结果如图 3。

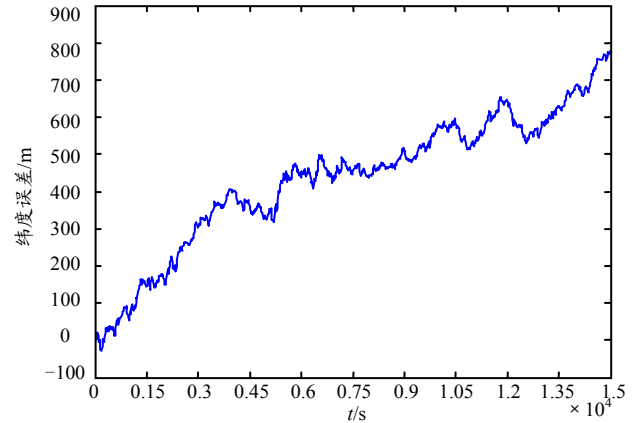


图 2 预建噪声已知的定位精度仿真结果

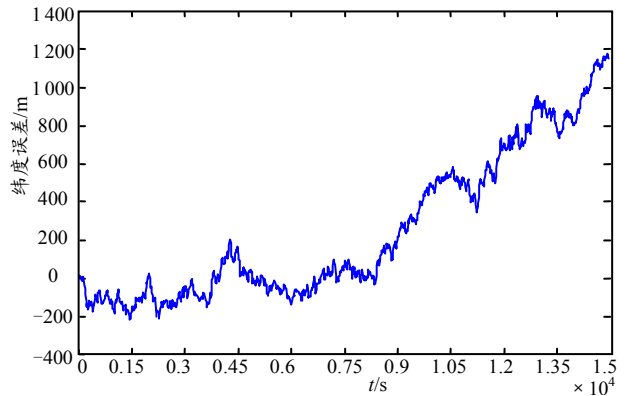


图 3 预建噪声不能准确描述时定位精度仿真结果

由图 2 和图 3 可见，在预建噪声能准确描述时，SINS/DVL 组合导航在 15 000 s 时定位误差约为 780 m。在噪声统计模型不准时，由于系统噪声模型失真 SINS/DVL 组合导航在 15 000 s 时定位误差约为 1 160 m。以上是采用常规 kalman 滤波算法的结果，可见：滤波存在明显发散，这可能是在滤波递推中，舍入误差逐渐积累，致使误差方差阵失去非负定性，影响滤波增益，使其逐渐失去合适的加权作用导致。

4 结束语

仿真结果看，该研究是更高效的滤波算法，为提高大航程 AUV 导航定位精度提供了参考。

参考文献：

[1] 朱海, 莫军. 水下导航信息融合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
[2] 以光衢. 惯性导航原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1987.
[3] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 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.
[4] 董原生, 苏冬寒, 罗九林, 等. 装甲装备抢修性评价指标[J]. 四川兵工学报, 2008(6): 13-15.