

多普勒计程仪辅助捷联惯导初始对准技术研究

鲍桂清, 于飞, 高伟, 奔粤阳

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对捷联惯导系统初始对准精度问题, 提出了一种采用多普勒计程仪辅助捷联惯导系统进行初始对准的方法。分析了多普勒计程仪测速误差的形式, 建立了多普勒计程仪与捷联惯导系统的误差模型, 通过输出校正的方法修正多普勒计程仪的速度信息, 为惯导系统提供准确的载体速度信息, 采用卡尔曼滤波进行捷联惯导系统的精对准。并对舰船匀速直航状态时, 多普勒计程仪辅助捷联惯导系统的初始对准进行了仿真分析。理论分析与仿真结果表明: 该方案能有效地解决舰船的初始对准问题, 收敛速度较快, 而且具有较高的精度。

关键词: 捷联惯导; 初始对准; 卡尔曼滤波; 多普勒计程仪; 输出校正

中图分类号: V271.4; E925.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0015-04

Initial Alignment of Strap-down Inertial Navigation System Aided by Doppler Velocity Log

BAO Guiqing, YU Fei, GAO Wei, BEN Yueyang

(Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the accuracy of Strap-down Inertial Navigation System (SINS), the paper presents a method for realizing SINS initial alignment by the assistance of Doppler Velocity Log (DVL). The DVL velocity error was analyzed, and its error model and SINS error model were set up. Output revising was used to revise the velocity of DVL in order to provide accurate velocity for SINS, and Kalman filter was used to realize precise alignment of SINS. A simulation was made for the SINS initial alignment assisted by DVL under the uniform direct motion state. The simulation results show that this method can improve the convergence speed and alignment accuracy effectively.

Key words: Strap-down Inertial Navigation System (SINS); initial alignment; Kalman filter; Doppler Velocity Log (DVL); output revising

0 引言

惯导系统是一种自主式的导航系统, 该系统隐蔽性好, 抗干扰能力强, 因此一直受到海陆空军、航天和交通运输等部门的青睐和重视^[1]。随着现代科学技术的发展, 对惯导系统的精度要求不断提高。由于初始对准与惯导系统的精度和启动准备时间均有直接关系, 所以一直被作为一项关键技术。捷联式惯导系统初始对准的主要任务是, 确定载体坐标系和真实导航坐标系(如当地地理坐标系)之间的初始方向余弦矩阵^[2]。

本文提出了一种采用多普勒计程仪辅助捷联惯导

系统初始对准的技术。将捷联惯性导航系统(Strap-down Inertial Navigation System, SINS)和多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)组合使用, 通过外速度信息的引入, 利用滤波技术进行姿态误差角参数的最优估计^[3], 从而建立准确的初始捷联矩阵。通过输出校正的方法修正 DVL 的速度信息, 使速度误差始终保持为小量, 为 SINS 提供准确的载体速度信息, 从而提高 SINS 初始对准的精度。

1 SINS 误差模型的建立

为了使 SINS 在初始对准阶段达到尽可能高的对准精度和对准速度, 需要建立准确的 SINS 误差模型^[4]。本文基于 SINS 的基本原理, 建立了 SINS 的数学误差模型, 为进一步开展 SINS 的初始对准提供了理论依据。由 SINS 的基本原理得到如下系统误差模型^[5-6]。

收稿日期: 2012-01-10 修回日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179039)

作者简介: 鲍桂清(1988—), 女, 黑龙江集贤人, 硕士生, 研究方向为捷联惯性导航技术。

$$\begin{cases}
\delta\dot{\varphi} = \frac{1}{R}\delta V_y \\
\delta\dot{\lambda} = \frac{\sec\varphi}{R}\delta V_x + \frac{V_x}{R}\tan\varphi\sec\varphi\delta\varphi \\
\delta\dot{V}_x = \phi_z f_y + \frac{V_y \tan\varphi}{R}\delta V_x + (2\omega_{ie}\sin\varphi + \frac{V_x}{R}\tan\varphi) \cdot \\
\quad \delta V_y + (2\omega_{ie}\cos\varphi V_y + \frac{V_x V_y}{R}\sec^2\varphi)\delta\varphi + \nabla_x \\
\delta\dot{V}_y = -\phi_z f_x - (2\omega_{ie}\sin\varphi V_y + \frac{2V_x \tan\varphi}{R}\delta V_x - \\
\quad (2\omega_{ie}\cos\varphi V_x + \frac{V_x^2}{R}\sec^2\varphi)\delta\varphi + \nabla_y \\
\dot{\phi}_x = -\frac{\delta V_y}{R} + (\omega_{ie}\sin\varphi + \frac{V_x \tan\varphi}{R})\phi_y - (\omega_{ie}\cos\varphi + \frac{V_x}{R})\phi_z + \varepsilon_x \\
\dot{\phi}_y = \frac{\delta V_x}{R} - (\omega_{ie}\sin\varphi + \frac{V_x \tan\varphi}{R})\phi_x - \frac{V_y}{R}\phi_z - \\
\quad \omega_{ie}\sin\varphi\phi\delta\varphi + \varepsilon_y \\
\dot{\phi}_z = \frac{\tan\varphi}{R}\delta V_x + (\omega_{ie}\cos\varphi + \frac{V_x}{R})\phi_x + (\omega_{ie}\cos\varphi + \\
\quad \frac{V_x}{R}\sec^2\varphi)\delta\varphi + \frac{V_y}{R}\phi_y + \varepsilon_z
\end{cases} \quad (1)$$

式中: $\delta\varphi$ 、 $\delta\lambda$ 分别为纬度误差与经度误差; R 为地球半径; φ 为当地地理纬度; δV_x 、 δV_y 分别为载体的东向速度误差与北向速度误差; ω_{ie} 为地球自转角速度; ∇_x 、 ∇_y 分别为 x 轴和 y 轴加速度计误差; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为加速度计 x 轴、 y 轴和 z 轴测量的比力信息; ϕ_x 、 ϕ_y 、 ϕ_z 分别为载体 x 轴、 y 轴和 z 轴姿态误差角; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴的陀螺漂移。

2 DVL 误差模型的建立

由于 DVL 具有速度测量的高精度, 所以一般以多普勒测得的速度作为导航中的速度基准。但是, DVL 测量的过程中会受到很多因素的影响, 因为它测量载体相对海底的速度和偏流角^[7]时, 测量误差主要有速度偏移误差 δV_d , 偏流角误差 $\delta\Delta$, 刻度系数误差 δC , 其中, δV_d 和 $\delta\Delta$ 用一阶马尔可夫过程表示, δC 为随机常数。相应误差方程为

$$\begin{cases}
\delta\dot{V}_d = -\beta_d \delta V_d + w_d \\
\delta\dot{\Delta} = -\beta_\Delta \delta\Delta + w_\Delta \\
\delta\dot{C} = 0
\end{cases} \quad (2)$$

式中: β_d^{-1} 、 β_Δ^{-1} 分别为速度偏移误差和偏流角误差的相关时间; w_d 、 w_Δ 为激励白噪声。

3 滤波模型的建立

SINS 初始对准采用卡尔曼滤波技术估计的主要

对象是姿态误差角, 本文采用间接的估计方法。间接法的系统状态方程和量测方程都是线性的, 因此可以采用最优线性卡尔曼滤波技术^[8-9]。由于 DVL 测量过程受环境因素影响较大, 本文采用输出校正的方法修正 DVL 的速度信息, 通过输出校正使 DVL 的测速误差保持为小量。DVL 辅助 SINS 初始对准原理如图 1 所示。

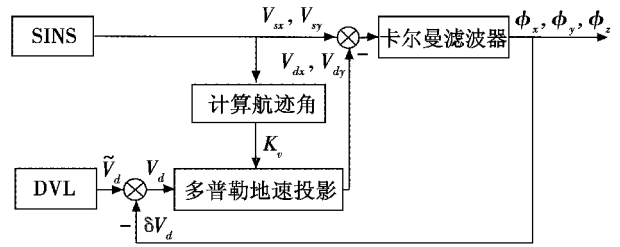


图1 DVL 辅助 SINS 初始对准原理图

Fig.1 Schematic of SINS initial alignment aided by DVL

3.1 状态方程

状态方程形式为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (3)$$

式中: $X(t)$ 为 t 时刻系统的状态变量; $F(t)$ 和 $G(t)$ 分别为系统状态矩阵和噪声矩阵; $W(t)$ 为系统的噪声向量。

选取状态向量

$$X = [\delta\varphi \quad \delta\lambda \quad \delta v_x \quad \delta v_y \quad \phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \delta V_d \quad \delta\Delta \quad \delta C]^T \quad (4)$$

系统状态向量 $F(t)$ 为

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_1(t)_{7 \times 7} & \cdots & F_2(t)_{7 \times 3} & \cdots & F_3(t)_{7 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{7 \times 3} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{0}_{6 \times 7} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 3} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 3} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{0}_{3 \times 7} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & F_4(t)_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases}
F_1(t) = \begin{bmatrix} F_{11}(t) & F_{12}(t) & F_{13}(t) \\ F_{21}(t) & F_{22}(t) & F_{23}(t) \end{bmatrix} \\
F_2(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ C_{b3}^n \end{bmatrix} \\
F_3(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \tilde{C}_{b2}^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} \end{bmatrix} \\
F_4(t) = \begin{bmatrix} -\beta_d & 0 & 0 \\ -\beta_\Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{cases} \quad (6)$$

$F_1(t)$ 中

$$\mathbf{F}_{11}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{V_x \tan \varphi \sec \varphi}{R} & 0 \\ 2\omega_{ie} \cos \varphi V_y + \frac{V_x V_y \sec^2 \varphi}{R} & 0 \\ -\left(2\omega_{ie} \cos \varphi V_x + \frac{V_x^2 \sec^2 \varphi}{R}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{12}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ \frac{\sec \varphi}{R} & 0 & 0 \\ \frac{V_y \tan \varphi}{R} & 2\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_x \tan \varphi}{R} & 0 \\ -\left(2\omega_{ie} \sin \varphi V_y + \frac{2V_x \tan \varphi}{R}\right) & 0 & f_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_{13}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -f_z & f_y \\ 0 & -f_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{21}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega_{ie} \sin \varphi & 0 \\ \omega_{ie} \cos \varphi + \frac{V_x \sec^2 \varphi}{R} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{22}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R} & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & -\left(\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_x \tan \varphi}{R}\right) \\ \frac{\tan \varphi}{R} & 0 & \frac{V_y}{R} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_{23}(t) = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_x \tan \varphi}{R} & -\left(\omega_{ie} \cos \varphi + \frac{V_x}{R}\right) \\ -\frac{V_y}{R} & -\frac{V_x}{R} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: R 为地球半径; φ 为当地地理纬度; λ 为当地地理经度; V_x 、 V_y 分别为载体的东向、北向速度; ω_{ie} 为地球自转角速度; f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴加速度计输出的比力信息; \mathbf{C}_b^n 为姿态矩阵, $\tilde{\mathbf{C}}_{b \times 2}^n$ 表示 \mathbf{C}_b^n 的前两行前两列。

系统噪声矩阵为

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{b \times 3}^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_{b \times 3}^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

系统的噪声向量为

$$\mathbf{W}(t) = [0 \ 0 \ a_x \ a_y \ w_x \ w_y \ w_z \ 0 \ 0 \ 0 \ w_d \ w_\Delta \ 0] \quad (14)$$

式中: a_x 、 a_y 分别为 x 轴、 y 轴加速度计零偏; w_x 、 w_y 、 w_z 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴陀螺的常值漂移; w_d 、 w_Δ 为 DVL 的激励白噪声。

3.2 量测方程

SINS 解算速度和 DVL 测量速度之差作为观测量, 得系统量测方程为

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{Z}(t)$ 表示 t 时刻系统的量测向量; $\mathbf{H}(t)$ 表示系统的量测矩阵; $\mathbf{v}(t)$ 表示系统的测量噪声。

量测量为

$$\mathbf{Z}(t) = V_s - V_d \quad (16)$$

式中: V_s 为惯导解算速度信息; V_d 为反馈校正后的 DVL 输出的载体速度信息, 即

$$V_d = \tilde{V}_d - \delta V_d \quad (17)$$

式中, \tilde{V}_d 为 DVL 输出的载体速度。

量测矩阵为

$$\mathbf{H} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin K_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\cos K_v & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, K_v 为考虑偏流角的航迹向。

4 仿真分析

卡尔曼滤波初始值的确定: 初始状态值 $\mathbf{X}(0)$ 可以认为是均值为零的随机变量, 可以把状态估计的初始值定为零^[10]。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(0) = \text{diag} \{ & (20/\text{Re})^2, (20/\text{Re})^2, (20/\text{Re})^2, \\ & (0.05 \text{ m/s})^2, (0.05 \text{ m/s})^2, (0.05 \text{ m/s})^2, \\ & (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (0.01(^\circ)/\text{h})^2, \\ & (0.01(^\circ)/\text{h})^2, (0.01(^\circ)/\text{h})^2, (100 \mu\text{g})^2, \\ & (100 \mu\text{g})^2, (100 \mu\text{g})^2 \} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(0) = \text{diag} \{ & 0, 0, 0, (50 \mu\text{g})^2, (50 \mu\text{g})^2, \\ & (50 \mu\text{g})^2, (0.005(^\circ)/\text{h})^2, (0.005(^\circ)/\text{h})^2, \\ & (0.005(^\circ)/\text{h})^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\mathbf{R}(0) = \text{diag} \{ (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2 \} \quad (21)$$

载体航行时, 横摇轴、纵摇轴的摇摆幅度分别为 3.7° 、 5° , 周期为 10 s 、 8 s 。

仿真曲线如图 2、图 3 所示。从图中两种状态的初始对准结果可知, 常规卡尔曼滤波收敛速度较慢, 收敛精度较差, 东向误差角的估计精度为 $0.22'$, 北向误差角估计精度为 $0.4'$, 13 min 时方位误差角估计精度为 $6'$ 。而采用输出校正修正 DVL 的速度信息后, 收敛较快, 且收敛精度有了很大提高, 东向误差角估计精度为

0.17', 北向误差角的估计精度为 0.22', 方位误差角的收敛速度明显提高, 6 min 时方位误差角的估计曲线已稳定, 估计精度为 4'。仿真验证了采用输出校正修正 DVL 辅助 SINS 进行初始对准是可行的, 而且具有比较高的精度。

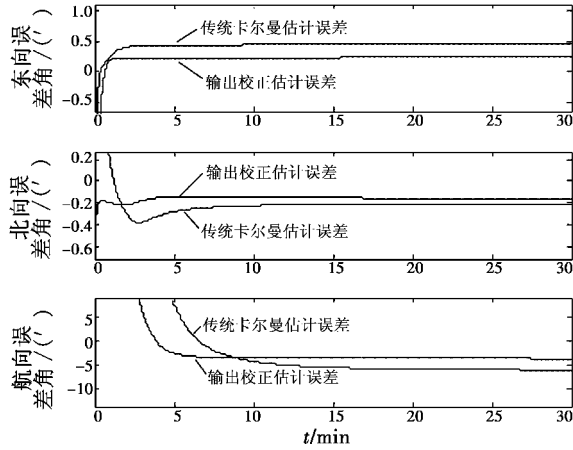


图 2 初始对准仿真曲线

Fig. 2 Initial alignment simulation curve

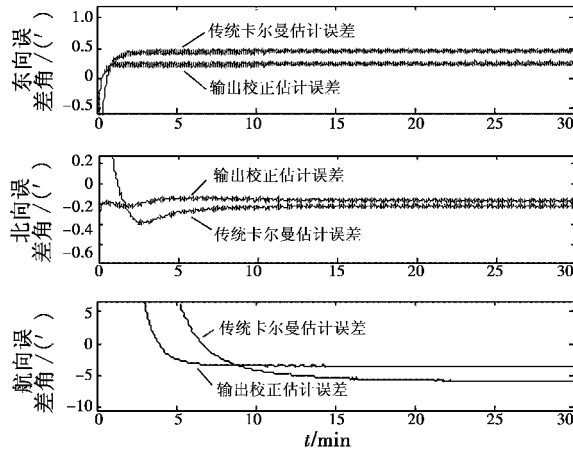


图 3 摇摆状态初始对准仿真曲线

Fig. 3 Initial alignment simulation curve under swinging state

5 结束语

本文论证了 DVL 辅助 SINS 初始对准的可行性。通过采用输出校正的方法修正 DVL 的速度信息, 以弥补 DVL 受环境影响较大的不足, 为 SINS 初始对准提供精确的载体速度信息, 并通过 Matlab 软件对 DVL 辅助 SINS 初始对准进行了仿真。仿真结果表明, 采用输出校正的方法修正 DVL 的速度信息明显提高了 SINS 初始对准的精度和速度, 是一种有效实用的初始对准方案。

参考文献

- [1] 张树侠, 孙静. 捷联式惯性导航系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 12-14, 48-59.
- [2] 万德钧, 房建成. 惯性导航初始对准[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998: 36-42.
- [3] 张少平, 唐楚华. 多普勒测速声呐在小型潜器中应用的分析[J]. 声学与电子工程, 2006(1): 35-38.
- [4] 李东明. 捷联式惯导系统初始对准方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [5] 陈兵舫, 张育林. 惯导系统初始对准误差模型研究[J]. 上海航天, 2001(6): 4-8.
- [6] JIANG Y F. Error analysis of analytic coarse alignment methods[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 334-337.
- [7] 李亮. INSDVL 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [8] 张健. 惯导与多普勒组合导航技术仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [9] 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: 33-35.
- [10] LÜ Shaolin, XIE Ling, CHEN Jiabin. New techniques for initial alignment of strapdown inertial navigation system [J]. Journal of the Franklin Institute, 2009, 346(10): 1021-1037.

欢迎投稿 <http://www.dgykz.com>