

基于多新息强跟踪 SINS 大失准角初始对准研究

武 萌¹, 汤霞清¹, 尹训锋²

(1. 装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072; 2. 91917 部队, 北京 102401)

摘 要: 利用衰减记忆多新息强跟踪反馈校正卡尔曼滤波, 设计了无需粗对准的捷联惯导大失准角初始对准算法。采用反馈校正卡尔曼滤波和新息正交性跟踪, 将捷联惯导对准前的非线性大失准角快速校正成小失准角, 对准过程引入了具有衰减记忆功能的多新息, 改善了卡尔曼滤波反馈校正状态跟踪能力。

关键词: 捷联惯导; 初始对准; 多新息卡尔曼滤波; 强跟踪滤波; 大失准角

中图分类号: V249.3 **文献标识码:** A

Research on the Large Misalignment Angles Initial Alignment Method of SINS Based on Multi-Innovation Strong Tracking Filter

WU Meng¹, TANG Xiaqing¹, YIN Xunfeng²

(1. Dept. of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. 91917 Army, Beijing 102401, China)

Abstract: The large misalignment angle alignment algorithm without the coarse alignment is employed by the Kalman filtering method of the fading memory and multi-innovation strong tracking. It can change the nonlinear large misalignment angle into the small misalignment angle by using the feedback correction Kalman filter and the innovation orthogonality tracking. Also, through introducing the fading memory of multi-innovation, SINS Kalman filter feedback tracking ability is improved.

Key words: SINS; initial alignment; multi-innovation Kalman filter; strong tracking filter; large misalignment angles

0 引言

捷联惯性导航系统(简称捷联惯导)初始对准通常分为粗对准和精对准两个阶段。粗对准使捷联惯导姿态误差角达到小失准角,在此基础上通过建立小失准角线性卡尔曼误差模型实现精对准。基于小失准角假设的捷联惯导静基座初始对准能达到较高的初始对准精度,但需要占用一定的时间进行粗对准。为缩短捷联惯导初始对准时间,提高系统的快速反应能力,基于大失准角的捷联惯导初始对准方法得到了广泛研究^[1-5]。基于大失准角假设的捷联惯导为非线性系统,初始对准大都采用非线性滤波方法^[1-4],实现复杂,系统性能无法保证。彭卓等采用线性标准卡尔曼滤波,通过反馈校正和强跟踪滤波实现了大失准角条件下静基座线性对准,为大失准角静基座初始对准提供了新方法^[5]。

大失准角反馈校正过程是捷联惯导系统状态估值不断变化的过程,也是新息不断变化的过程,仅使用当前时刻的新息不能准确反映状态的实时变化。为提高大失准角反馈校正卡尔曼滤波效果,本文提出了衰减多新息滤波技术。采用衰减技术对旧时刻的新息进行衰减利用,克服了多新息引起状态估计波动的缺点,改善了反馈校正卡尔曼滤波过程中的状态跟踪能力,提升了滤波效果。

1 捷联惯导大失准角误差模型

在捷联惯导中选取地心坐标系为惯性坐标系(记为*i*),东北天地理坐标系为导航坐标系(记为*n*),地球自转角速率为 ω_e 。捷联惯导初始对准时若不进行粗对准或粗对准不彻底,因载体姿态误差的不确定性,则捷联惯导姿态误差角是大角度。假设捷联惯导系统失准角 $\varphi = [\varphi_E \ \varphi_N \ \varphi_U]^T$,陀螺测

收稿日期:2016-07-29

作者简介:武萌(1981-),女,山东泰安人,讲师,博士生,主要从事惯性导航与制导的研究。通信作者:汤霞清(1965-),男,湖南长沙人,教授,主要从事惯性测量和导航技术的研究。

量误差主要为漂移误差 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$, 加速计测量误差主要为漂移误差 \mathbf{V}^b , 捷联惯导的数学平台坐标系为 n' , 在大失准角情况下, n 系和 n' 系不完全重合。在静基座条件下, 捷联惯导姿态误差和速度误差^[6]分别为

$$\dot{\varphi} = C_{\varphi}^{-1}[(\mathbf{I} - \mathbf{C}_n^{n'})\tilde{\omega}_n - \mathbf{C}_b^{n'}\boldsymbol{\varepsilon}^b] \quad (1)$$

$$\delta\dot{\mathbf{V}} = [\mathbf{I} - (\mathbf{C}_n^{n'})^T]\mathbf{C}_b^{n'}\tilde{\mathbf{f}}^b + (\mathbf{C}_n^{n'})^T\mathbf{C}_b^{n'}\mathbf{V}^b \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_n^{n'} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_N \cos \varphi_U - \sin \varphi_N \sin \varphi_E \sin \varphi_U & \cos \varphi_N \cos \varphi_U + \sin \varphi_N \sin \varphi_E \cos \varphi_U - \sin \varphi_N \cos \varphi_E & & & \\ & -\cos \varphi_E \sin \varphi_U & \cdots & \cos \varphi_N \cos \varphi_U & \sin \varphi_E \\ \sin \varphi_N \cos \varphi_U + \cos \varphi_N \sin \varphi_E \sin \varphi_U & \sin \varphi_N \sin \varphi_U - \cos \varphi_N \sin \varphi_E \cos \varphi_U & \cos \varphi_N \cos \varphi_E & & \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(1)、(2)可见, 捷联惯导静基座条件下的大失准角误差模型是非线性的, 直接采用该模型进行捷联惯导初始对准非常复杂。研究^[5]表明, 不直接采用式(1)、(2)的非线性模型, 直接采用强跟踪反馈校正线性卡尔曼滤波技术可将大失准角 φ 校正到较小的失准角, 进而实现捷联惯导系统的快速高精度初始对准。捷联惯导系统反馈校正卡尔曼滤波选取状态变量为

$$\mathbf{X} = [\delta V_E, \delta V_N, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \nabla_E, \nabla_N, \varepsilon_E, \varepsilon_N, \varepsilon_U]^T \quad (5)$$

式中 $\varepsilon_E, \varepsilon_N, \varepsilon_U$ 为东、北、天向等效陀螺漂移。

状态方程和观测方程分别为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{0}_{5 \times 5} & \mathbf{0}_{5 \times 5} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{0}_{5 \times 5} \\ \mathbf{0}_{5 \times 5} & \mathbf{0}_{5 \times 5} \end{bmatrix} \mathbf{W} \quad (6)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{W} = [\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ 为服从 $N(0, \mathbf{Q})$ 分布的高斯白噪声, ω_{ax} 和 ω_{ay} 为加速度计随机零偏, ω_{gx}, ω_{gy} 和 ω_{gz} 为陀螺随机零偏; \mathbf{V} 为系统观测噪声矢量, 是 $N(0, \mathbf{R})$ 的高斯白噪声过程。 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 分别为

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2\Omega_U & 0 & -g & 0 \\ -2\Omega_U & 0 & g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega_U & -\Omega_N \\ 0 & 0 & -\Omega_U & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_N & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$C_{\varphi}^{-1} = \frac{1}{\cos \varphi_E} \begin{bmatrix} \cos \varphi_N \cos \varphi_E & 0 & \sin \varphi_N \cos \varphi_E \\ \sin \varphi_N \sin \varphi_E \cos \varphi_E - \cos \varphi_N \sin \varphi_E \\ -\sin \varphi_N & 0 & \cos \varphi_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\tilde{\mathbf{f}}^b$ 为加速度计的测量值。

2 多新息强跟踪滤波算法

2.1 反馈校正强跟踪滤波技术

采用标准卡尔曼滤波进行大失准角捷联惯导初始对准, 需要采用反馈校正技术将卡尔曼滤波估计值反馈到系统中, 通过反馈校正将大失准角校正成符合线性条件的小失准角。反馈校正卡尔曼滤波采用递推方式滤波, 滤波公式为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{B}_{k-1} \mathbf{U}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ P_k = (\mathbf{I} - K_k H_k) P_{k/k-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{B}_{k-1} 为反馈校正系数矩阵; \mathbf{U}_{k-1} 为控制变量。

由于静基座卡尔曼滤波具有不完全可观性, 因而并不是所有状态反馈都具有积极意义。本文仅反馈对系统有用的姿态误差角和速度误差。令 $e(k) = Z_k - H_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$, 则 $e(k)$ 被称为新息。由式(10)可见, 卡尔曼滤波一步预测结果 $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$, 经过新息修正后得到 \mathbf{X}_k 的最优估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。在模型准确的情况下, $\{e(k)\}$ 是满足正交条件的白噪声序列。

捷联惯导系统不经过粗对准而直接采用式(10)进行卡尔曼滤波精对准, 在对准初始阶段其失准角是大角度, 经过反馈校正系数 \mathbf{B}_{k-1} 的不断修正, 大失准角逐渐变为满足线性条件的小失准角。捷联惯导系统初始对准从大失准角到小失准角的变化过程是状态变量 $\delta V_E, \delta V_N, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 不断变化的过程。若要使大失准角 $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 成功变为小失准角, 需要卡尔曼滤波具有强的状态跟踪能力, 但由于卡尔曼滤波针对非线性模型的不准确性, 仅采用反馈校正技术并不能很好地将大失准角变为小失准角。研究表明, 滤波过程中 $\delta V_E, \delta V_N, \varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 状态的突

变将导致新息 $e(k)$ 的变化,这种变化将使 $e(k)$ 不再满足正交条件。采用技术手段强迫 $e(k)$ 保持正交性的强跟踪滤波技术是保持卡尔曼滤波状态跟踪能力的有效手段^[7]。强跟踪滤波通过在卡尔曼滤波方程 $P_{k/k-1}$ 中引入渐消因子来实现,其实现方程为

$$P_{k/k-1} = \text{diag}([\lambda_{1k} \ \lambda_{2k} \ \cdots \ \lambda_{10k}])\Phi_{k/k-1}P_{k-1}\Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1}Q_{k-1}\Gamma_{k-1}^T \quad (11)$$

式中 λ_{ik} 为渐消因子^[7]。

2.2 多新息跟踪算法

新息 $e(k)$ 是反映卡尔曼滤波系统观测偏差的量,而 $\mathbf{K}_k e_k = \hat{X}_k - \hat{X}_{k/k-1}$ 反应状态估计的偏差。大失准角捷联惯导初始对准过程中,在滤波初始阶段,由于模型的非线性,捷联惯导误差状态估计不是最优估计,而是“突变”估计,“突变”的状态受反馈校正约束能最终将非线性的状态拉回小角度。“突变”的状态估计会导致新息的变化,这种变化体现了状态更新的有用信息。标准卡尔曼滤波中 k 时刻的状态估计值仅用到了 k 时刻的新息,忽略了前一段时刻新息的影响,因而仅采用当前时刻的新息 $e(k)$ 进行状态估计,不能有效跟踪系统的状态变化。参考多新息辨识理论^[8],将新息向量扩展成新息矩阵,将 $k-1$ 及其以前时刻的新息引入到状态变量的修正中,可有效改善大失准角捷联惯导初始对准状态跟踪能力,状态估计多信息修正方程为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + \sum_{j=k-N_{IV}+1}^k \mathbf{K}_j e_j \quad (12)$$

将 $\mathbf{K}_k e_k = \hat{X}_k - \hat{X}_{k/k-1}$ 代入式(12),则

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k e_k + \hat{X}_{k-1} - \hat{X}_{k-1/k-2} + \cdots + \hat{X}_{k-N_{IV}+1} - \hat{X}_{k-N_{IV}+1/k-N_{IV}} \quad (13)$$

由式(12)、(13)可看出,采用多新息技术可修正前 $N_{IV}-1$ 时刻的状态估计误差,及时有效跟踪系统的状态变化。由式(13)可看出,旧新息数据并不是越多越好,过多的状态估计误差会降低当前新息的地位,造成较大的波动,降低跟踪精度。为提高多新息卡尔曼滤波跟踪精度,并减小过多旧新息引起的状态波动,引入指数渐消因子,将 $k-1$ 时刻之前的新息进行渐消,即利用了旧新息中的有用数据,又提升了当前新息的修正比例,修正方程为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + \sum_{j=k-N_{IV}+1}^k s^{-(k-j)} \mathbf{K}_j e_j \quad (14)$$

式中 s 为大于 1 的指数渐消因子。

3 仿真实验

为验证上述算法的有效性,进行系统仿真实验。系统仿真参数设置:陀螺随机常值漂移为 0.02 ($^\circ$)/h,噪声为 0.01 ($^\circ$)/h,加速度计随机常值零偏为 $1 \times 10^{-4} g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$),噪声为 $1 \times 10^{-5} g$,架设载体真实姿态为 $[5^\circ \ 5^\circ \ 30^\circ]$,载体位置为 $[34^\circ \ 120^\circ \ 30 \text{ m}]$,载体处于静止状态。卡尔曼滤波状态参数为: $X_0=0, R=\text{diag}([0.01 \text{ m/s} \ 0.01 \text{ m/s}]^2), Q=\text{diag}([0.1 \text{ m/s}, 0.1 \text{ m/s}, 0.01$ ($^\circ$)/h, 0.01 ($^\circ$)/h, 0.01 ($^\circ$)/h, $0_{1 \times 5}]^2), P_0=\text{diag}([1 \text{ m/s} \ 1 \text{ m/s} \ 1^\circ \ 1^\circ \ 1^\circ \ 0.01$ ($^\circ$)/h $\cdots \ 0.01$ ($^\circ$)/h 0.01 ($^\circ$)/h $50 \mu g \ 50 \mu g]^2)$ 。新息协方差矩阵用滑动开窗法进行估计,估计公式为

$$C_{IVk} = \frac{1}{N} \sum_{j=k-N+1}^k e_j e_j^T \quad (15)$$

式中 N 为滑动窗口长度。为了兼顾新息方差估计的有效性和动态特性,本文仿真时取 $N=10$ 。

仿真结果分别如图 1~3 所示。图 1 为卡尔曼滤波过程中姿态误差角的变化对新息方差的影响。由图可看出,在系统姿态发生变化时,特别是正、负突变时,新息方差也会发生突变。图 2 为多新息长度对姿态跟踪效果的影响。由图 2 可看出,引入的旧新息越多,系统的状态跟踪能力越强,但当旧新息过多时,系统的状态跟踪出现较大波动,甚至引起发散。采用衰减多新息可有效克服因旧新息过多而引起的发散问题。图 3 为采用标准反馈校正卡尔曼滤波、强跟踪卡尔曼滤波和多新息强跟踪滤波时,航向误差滤波效果图,图中小图为局部放大图。由图 3 可看出,标准反馈校正卡尔曼滤波虽能将大失准角“拉回”小角度,但该算法在滤波初始阶段波动较大,收敛速度慢。与单纯的强跟踪卡尔曼滤波相比,多新息强跟踪滤波具有较快的收敛速度和较高对准精度,能够达到与静基座小失准角初始对准相当的精度。

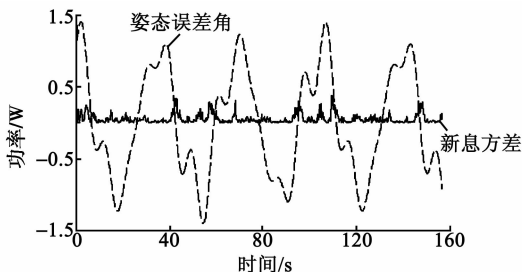


图 1 系统状态变化对新息的影响

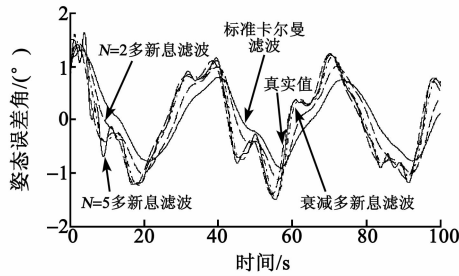


图 2 不同新息数量对跟踪效果的影响

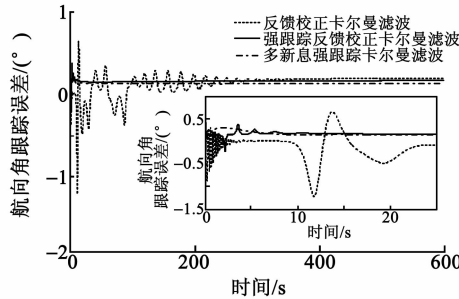


图 3 不同算法滤波结果比较

4 结束语

为了缩短捷联惯导系统初始对准时间,提高系统快速反应能力,本文提出了一种静基座大失准角多新息强跟踪滤波算法。该算法不需要粗对准和复杂的非线性滤波技术,通过引入衰减多新息,能够提高大失准角反馈状态跟踪精度。仿真结果表明,该算法能实现大失准角高精度初始对准,对提高捷联惯导系统快速反应能力具有实用价值。

参考文献:

[1] 刘海鹏,张科,李恒年,等.捷联惯导系统大失准角下的初始对准研究[J].航空计算技术,2012,42(4):39-42.
LIU Haipeng, ZHANG Ke, LI Hengnian, et al. Research on initial alignment of SINS with large misalignment angles[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(4): 39-42.

[2] 龙瑞,秦永元,夏家和. CDKF 在捷联惯导系统大失准角初始对准的应用[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 364-368.
LONG Rui, QIN Yongyuan, XIA Jiahe. Applying

CDKF to initial alignment of SINS for large misalignment angles[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(3): 364-368.

[3] 李慧平,张福斌,徐德民. 一种粒子滤波 SINS 大方位失准角初始对准方法[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(6): 62-66.
LI Huiping, ZHANG Fubin, XU Demin. An initial alignment method of large azimuth misalignment angle in strap-down inertial navigation system based on particle filter[J]. Torpedo Technology, 2009, 17(6): 62-66.

[4] 柏猛,赵晓光,侯增广. 一种自适应滤波方法在捷联惯导系统大失准角初始对准中的应用[J]. 传感技术学报, 2008, 21(6): 1066-1069.
BAI Meng, ZHAO Xiaoguang, HOU Zengguang. Application of an adaptive filter in initial alignment of strapdown inertial navigation system with large misalignment errors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 1066-1069.

[5] 彭卓,张嵘,郭美凤,等. 基于强跟踪滤波器的 SINS 大失准角初始对准新方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(5): 565-569.
PENG Zhuo, ZHANG Rong, GUO Meifeng, et al. Strong tracking filter based SINS initial alignment of SINS for large misalignment angles [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(5): 565-569.

[6] 严恭敏. 车载自主定位定向系统研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.

[7] 徐定杰,贺瑞,沈锋,等. 基于新息协方差的自适应渐消卡尔曼滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2696-2699.
XU Dingjie, HE Rui, SHEN Feng, et al. Adaptive fading Kalman filter based on innovation covarianc [J]. Systems Engineering and Electronic, 2011, 33(12): 2696-2699.

[8] DING J, XIE L, DING F. Performance analysis of multi-innovation stochastic gradient identification for non-uniformly sampled systems[J]. Control and Decision, 2011, 26(9): 1338-1342.