

组合导航系统 INS/GNSS/SAR 及其降阶模型性能的研究

邹维宝 高社生 任思聪

(西北工业大学自动控制系·西安, 710072)

摘要: 介绍了高阶组合导航系统惯性导航系统(INS)/全球导航卫星系统(GNSS)/合成孔径雷达(SAR)及其降阶模型。降阶系统的卡尔曼滤波时间大大缩短了,但其精度并未有大的降低。仿真结果证明,INS/GNSS/SAR 的降阶模型仍可为飞机提供满意的导航精度。

关键词: 组合导航系统; 卡尔曼滤波; 降阶模型

文献标识码: A

Performance Study of INS/GNSS/SAR Integrated Navigation System and Its Reduced-Order Model

ZOU Weibao, GAO Shesheng and REN Sicong

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University · Xi'an, 710072, P. R. China)

Abstract: This paper introduces a full-order inertial navigation system(INS)/global navigation satellite system(GNSS)/synthetic aperture radar(SAR) integrated navigation system and its reduced-order model. The computation time of Kalman filter for reduced-order model is decreased with little loss in accuracy. The simulation results prove that the reduced-order model can also provide satisfactory accuracy for aircraft navigation.

Key words: integrated navigation system; Kalman filter; reduced-order model

1 引言(Introduction)

INS/GNSS/SAR 组合导航系统采用卡尔曼滤波器进行数据处理。该组合系统的特性是由动态模型和观测模型来描述的。动态模型可用一线性微分方程表示,其中包括 INS, GNSS 和 SAR 的系统误差。观测模型包括 INS, GNSS 和 SAR 的观测量及其观测量的组合。

卡尔曼滤波器的计算时间是由系统的状态矢量维数 n 决定的。每一步迭代的计算量等于 n^3 , 状态维数的减少有利于计算时间的缩短。而且,组合系统阶数的降低也有利于工程实现。目前,绝大多数有效控制系统的设计方法都是基于低阶模型,而复杂的高阶模型往往难以获得一个稳态系统。

模型降阶的目的是为了寻找到一个低阶模型,且该模型可以体现复杂的高阶模型的动态特性。本文首先介绍了包含 23 个状态的高阶组合系统模型,在此基础上忽略一些不可观测或难以观测的状态,从而得到一个包含 17 个状态的降阶模型。仿真说明,降阶模型可为飞行器提供满意的导航精度。

2 组合导航系统 INS/GNSS/SAR 的设计 (Description of INS/GNSS/SAR integrated navigation system)

2.1 动态误差模型(Dynamic error model)

在本文中,建模惯导系统为 SINS, 导航坐标系采用东北天地理坐标系。组合导航系统 INS/GNSS/SAR 的高阶动态误差模型如下:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t). \quad (1)$$

$X(t)$ 是状态变量,由系统的多种误差组成^[1],即:

$$X(t) = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \\ \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \\ \epsilon_{mx}, \epsilon_{my}, \epsilon_{mz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \\ \Delta tr, \delta tr, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^T.$$

其中: ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为姿态角误差; $\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$ 为速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为位置误差; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为陀螺常值漂移; $\epsilon_{mx}, \epsilon_{my}, \epsilon_{mz}$ 为陀螺一阶马尔科夫漂移; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度计零偏; $\Delta tr, \delta tr$ 为 GNSS 钟偏及钟漂; $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 为 SAR 天线姿态角误差。

系统噪声 $W(t)$ 为:

$$W(t) =$$

$$[W_{\epsilon x}, W_{\epsilon y}, W_{\epsilon z}, W_{\epsilon \dot{x}}, W_{\epsilon \dot{y}}, W_{\epsilon \dot{z}},$$

$$W_{\varphi x}, W_{\varphi y}, W_{\varphi z}, W_{\Delta \text{tr}}, W_{\delta \text{tr}}, W_{\varphi x}, W_{\varphi y}, W_{\varphi z}]^T.$$

$F(t)$ (23×23) 是组合系统的动态矩阵,其中包含有 90% 的零元素, $G(t)$ (23×14) 是系数矩阵,它包含 95% 的零元素,这两个矩阵均为稀疏矩阵.

2.2 观测模型(Observation model)

组合系统的测量信息包括 GNSS 测得的伪距 ρ_G 及伪距率 $\dot{\rho}_G$, 相应于 INS 给出的位置处的伪距 ρ_I 及伪距率 $\dot{\rho}_I$, SAR 的方位角 A 及俯仰角 E 测量值.

SAR 的测量值可表示为:

$$\bar{Z}_A = A + V_A,$$

$$\bar{Z}_E = E + V_E.$$

A, E 分别为方位角及俯仰角的真值, V_A, V_E 是测量误差,可以认为是白噪声.

系统测量方程为:

$$Z_K = \begin{bmatrix} \rho_G - \rho_I \\ \dot{\rho}_G - \dot{\rho}_I \\ A \\ E \end{bmatrix} + V_K.$$

线性化后可得:

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t), \quad (2)$$

其中, $H(t)$ 是组合系统的测量矩阵,包含 78.7% 的零元素,是稀疏矩阵, $V(t)$ 是测量噪声.

3 模型降阶方法 (Model order reduction method investigation)

卡尔曼滤波器的稳定性是由系统的可控性和可观测性决定的,它们是系统模型降阶中非常关键的两个因素.

对于 INS/GNSS/SAR 组合系统,其可控性与可观测性可定义为如下的格兰姆矩阵:

可控性为:

$$P = \int_0^\infty e^{Ft} G G^T e^{F^T t} dt,$$

可观测性为:

$$Q = \int_0^\infty e^{Ft} H H^T e^{F^T t} dt.$$

对于系统(1)和(2),如果 $F(t)$ 的所有特征值都在左半平面,则 P, Q 是半正定矩阵,且是唯一的.它们满足如下的 Lyapunov 方程

$$FP + PF^T + GG^T = 0,$$

$$F^T Q + QF + H^T H = 0.$$

对于 P, Q 来说,系统可控性及可观测性的概念是:

- 当且仅当 F, G 是完全可控时, P 为正定的;
- 当且仅当 F, H 是完全可观测时, Q 为正定的.

从数学的角度来看,系统的可控性与可观测性问题可以用相同的手段来解决.这里,我们来考虑一下系统的可观测性.系统的可观测性是由观测矩阵 B 的性质决定的.

$$B = \begin{bmatrix} H(0) \\ H(1)F(0) \\ \vdots \\ H(n)F(n)F(n-1)\cdots F(0) \end{bmatrix}.$$

如果 B 是满秩的,则系统(1)和(2)就是可观测的,否则就是不可观测的.

上面我们介绍了判断组合系统可观测性的理论上的可行性,但在实际中,这些计算是十分复杂的.我们采用另一种近似的方法,即:研究输出端对状态估计的可能性.如果一个动态系统是可观测的,那么动态方程中所有的状态在输出端都是可被估计的.相反,如果某一个状态在输出端是不可估计的,那么该状态就不可观测.

4 INS/GNSS/SAR 组合系统的降阶模型 (Reduced order model for integrated INS/GNSS/SAR)

关于模型降阶这方面的研究文章有很多^[2],这些方法可以分为两大类.第一类,保留系统中的主要状态,例如 Aggregation 方法, Model 方法, Lyapunov 函数方法和 Perturbation 方法^[3].另一类方法是对输入-输出数据的辨识,这些数据是通过用一特定的输入信号驱动原系统而获得的.对 INS/GNSS/SAR 组合系统而言,由于模型降阶是应用于工程实践中,所以我们采用第一种方法,即:忽略系统中的某些状态以减小计算量的难度.

忽略状态的方法是基于物理系统与数学模型两者关系之上的.根据文[4],那些不可观测的状态对系统的影响极小,所以即使未考虑这些状态,滤波性能也下降不多.可是滤波实际结果因为没有考虑这些状态的影响而不再是最优的.但这些状态的忽略不会影响到动态系统的基本特性.

对于系统(1)和(2),我们可以判断,当采用卡尔曼滤波器时,哪些状态是可观测的,哪些状态是不可观测的.在静基座条件下,陀螺常值漂移、加速度计零偏等 6 个量是不可观测的.用户钟偏和钟漂等状

态,用卡尔曼滤波器是不可观测的.于是,在系统(1)中,3个陀螺常值漂移状态可以去掉;3个加速度计零偏状态可认为是白噪声,可以忽略;钟偏和钟漂状态是深组合情况下必须的,它们不仅不能被忽略,而且它们还是增强滤波器鲁棒性的重要状态.

于是,组合系统降阶动态模型可以表示为:

$$\dot{X}_d(t) = F_d(t)X_d(t) + G_d(t)W(t).$$

其中

$$X_d(t) = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_{mx}, \epsilon_{my}, \epsilon_{mz}, \Delta tr, \delta tr, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^T.$$

$F_d(t)$ (17×17) 是降阶组合系统的动态矩阵, $G_d(t)$

(17×14) 是噪声系数矩阵.

测量方程为:

$$Z_d(t) = H_d(t)X_d(t) + V(t).$$

$H_d(t)$ 是降阶组合系统的测量矩阵, $V(t)$ 是测量噪声.

5 仿真(Simulation)

为了将高阶系统与低阶系统进行对比说明,本文采用方差分析法进行仿真.系统降阶后的滤波是次优滤波^[5,6],仿真采用的是均方差方程,仿真结果如图1~4所示.表1列出了高阶^[7,8]和低阶模型的计算时间.表2列出了高阶和低阶模型的导航误差精度.

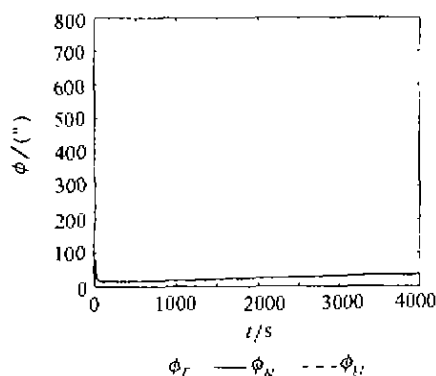


图1 姿态误差

Fig. 1 Attitude error curves (1σ) (23 states)

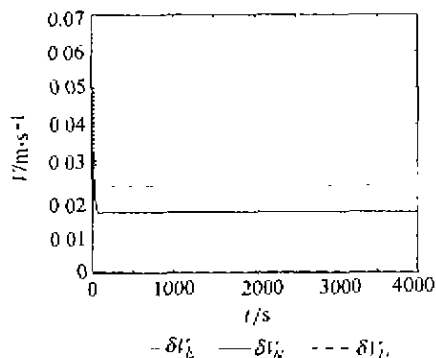


图3 速度误差

Fig. 3 Velocity error cures (1σ) (23 states)

飞机初始位置为东经 120° , 北纬 30° , 高度 1000m , 航向正东, 速度 300m/s , 飞行时间 4000s , 陀螺漂移 $0.1^\circ/\text{h}$, 加速度计零偏 10^{-4}g . 按照几何位置误差系数最小的原则, 从可见星座中选择4颗最佳GNSS导航星.

图1、图3所示的是高阶模型的导航误差曲线, 图2、图4所示的是低阶模型的导航误差曲线. 从误差曲线上可以看出, 姿态角误差 ϕ_E, ϕ_N 在两种模型下的差别较小. 方位角误差 ϕ_U 和速度误差 $\delta V_E, \delta V_N$

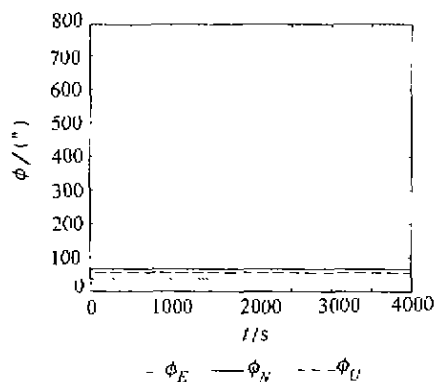


图2 姿态误差

Fig. 2 Attitude error curves (1σ) (17 states)

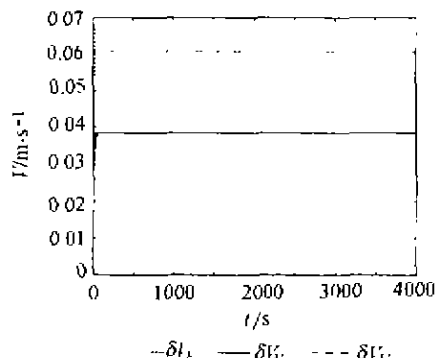


图4 速度误差

Fig. 4 Velocity error cures (1σ) (12 states)

的差别较大些,这主要是由于简化了陀螺和加速度计模型.

表1 高阶与低阶模型计算时间对比

Table 1 Computation time comparison of high-order and reduced-order model

组合系统状态	每一步计算时间
23个状态	0.11s
17个状态	0.05s

表 2 导航误差对比 (1σ)

Table 2 Navigation errors comparison

导航误差	高阶(23)	低阶(17)
$\phi_E(^{\circ})$	33.11	36.52
$\phi_N(^{\circ})$	36.25	65.62
$\phi_U(^{\circ})$	33.08	56.11
$\delta V_E/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.023	0.0609
$\delta V_N/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.0163	0.0384
$\delta V_U/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.002	0.008

6 结论(Conclusion)

基于以上的仿真结果,我们可以得到以下的结论:

1) 降阶模型可以为飞机导航提供满意的精度;
2) 卡尔曼滤波器的计算时间是组合系统状态矢量的三次方,模型从 23 阶降到 17 阶,计算时间减少了大约 55%,这对工程实现是非常有益的;

3) 在降阶组合系统中,陀螺常值漂移被去掉了,但是,为了进一步提高导航精度,可以对它进行补偿。

参考文献(References)

- [1] Layne J R and Paschall R N. Performance analysis of an integrated SAR/GPS/INS targeting and navigation system [A]. Proceedings of 50th Annual Meeting, Institute of Navigation '94 [C], New York, USA, 1994, 157-168
- [2] Zlatev Z. Computational Methods for General Sparse Matrices [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [3] Zhou Tong. Improving design assessment and simulation of large-scale dynamic system [D]. Michigan, USA: Michigan State University, 1988

versity, 1988

- [4] Davison E J. A method for simplifying linear dynamic system [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1967, 12: 119-121
- [5] Qiu Yongyuan. Kalman Filtering & Integrated Navigation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998
- [6] Eric M J. Identification using low models [D]. Berkeley, USA: University of California, Berkeley, 1988
- [7] Ornedo R S and Kenneth A. GPS and radar aided inertial navigation system for missile system applications [A]. Proceedings of 42th Annual Meeting on Position, Location and Navigation System [C], London, UK, 1998, 614-621
- [8] Schmidt D J. Error analysis of an air-to-surface missile with a synthetic aperture radar seeker [A]. Proceedings of 37th Annual Meeting, Institute of Navigation '81, [C], New York, USA, 1981, 363-370

本文作者简介

邹维宝 1967 年生 1989 年毕业于合肥工业大学资源环境系, 1997 年获西北工业大学飞行力学专业硕士学位, 2000 年获西北工业大学导航、制导与控制专业博士学位. 研究领域为自动控制, 组合导航系统及多传感器智能化信息融合技术. 现在香港理工大学从事导航, SAR, InSAR 雷达图像及信号处理方面的研究. Email: jszouwb@263.net

高社生 1956 年生, 博士, 副教授. 1981 年毕业于陕西师范大学数学系, 1993 年获得西北工业大学应用数学系硕士学位. 1996 年晋升为副教授, 1999 年获得西北工业大学导航、制导与控制专业博士学位. 发表科研论文 20 多篇. 现为中国惯性技术学会仪表专业委员会委员. 现在主要从事惯性技术和组合导航的研究

任思聪 1927 年生, 教授, 博士生导师. 1955 年毕业于大连理工大学, 1964 年获得前苏联列宁格勒精密机械与光学学院副博士学位. 长期从事精密仪器, 惯性传感器, 惯性系统, 组合导航系统, 自动控制与数字信号处理等领域的研究工作