

自适应卡尔曼滤波在组合导航中的应用研究

董健康, 安东

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

摘要:对惯性导航系统(INS)与全球导航系统(GPS)分别进行了具体探讨,对比了两者的优缺点,针对INS/GPS组合导航系统中由于模型不准或因量测噪声的复杂多变造成的发散问题,引入了一种基于输出相关法的自适应卡尔曼滤波技术。通过在自适应滤波算法中推算最优稳态增益来调整量测噪声,抑制滤波器的发散,为GPS/INS组合导航系统实现高精度导航提供了有效的途径。仿真结果表明该算法能很好地对系统状态进行最优估计并适应系统噪声的变化,具有比常规卡尔曼滤波更高的导航精度。

关键词:组合导航;GPS/INS;卡尔曼滤波;自适应滤波

中图分类号:TN96

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)10-0183-03

Study of Application of Adaptive Kalman Filter Technology in Integrated Navigation System

DONG Jian-kang, AN Dong

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The GPS and INS are separately discussed in the paper, and comparisons of their advantages and disadvantages are made in the paper. The measurement noise in the INS/GPS integrated navigation system is complex and variable, and the model is inaccuracy sometimes, which could bring divergence. To solve this problem, presents the technology of adaptive Kalman filter based on relative output method. By calculating the optimum static-state gain in the adaptive Kalman filter algorithm to adjust the measurement noise, the technology could restrain the divergence and provide an effective way to realize high precision navigation for GPS/INS integrated navigation system. The simulation results indicate that this filtering algorithm can get a better result in system states optimization estimation. Simultaneously it has a superiority of adapting system noise variation and this algorithm has better navigation accuracy than the regular Kalman filter algorithm.

Key words: integrated navigation; GPS/INS; Kalman filtering; adaptive filtering

0 引言

由于惯性导航系统(INS)和全球定位系统(GPS)性能互补,所以,以该两个子系统构造出组合导航系统是航空导航的最优方案。美国空军航空电子实验室在下一代军用飞机的研究计划中指出,卡尔曼滤波仍然是组合导航信息处理的关键技术^[1]。但是,在采用常规卡尔曼滤波技术时,需要已知被研究对象数学模型和噪声统计的先验知识。如果当模型不准或者对噪声统计特征缺乏了解时,应用常规卡尔曼滤波就会存在不稳定问题,并容易引起滤波发散。文中主要探讨在

噪声统计特征未知的情况下,将自适应卡尔曼滤波算法运用到组合导航中去。经过仿真得出,自适应卡尔曼滤波算法相对于常规卡尔曼滤波,提高了收敛速度和滤波精度,具有较高的自适应能力,对导航精度有进一步的提升。

1 GPS/INS 组合导航系统介绍

组合导航技术是指使用两种或两种以上的不同导航系统对同一信息源作测量,从这些测量值的比较值中提取出个系统的误差并校正之。采用组合导航技术的系统称作组合导航系统^[2]。

全球定位系统(GPS)是以子午仪卫星导航系统为基础而发展起来的,它吸收了子午仪系统的经验,根据接收到的导航卫星信号解算出航行体的位置和速度,产生出来的误差是有界的,具有全球性、全天候、高精度、三维定位、长期稳定等优点。

惯性导航系统(INS)基于惯性原理来工作,且工

收稿日期:2011-03-21;修回日期:2011-06-06

基金项目:天津市科技攻关计划重点项目(06YFGZGX00700);国家自然科学基金重点项目(60832011)

作者简介:董健康(1960-),教授,研究方向为电子系统故障诊断及工业数据识别与回归;安东,硕士,研究方向为智能检测与智能控制。

作时不需要接收任何外部信息,也不向外发出任何信息,只依靠系统本身就能全天候的在全球范围内和任何介质环境里自主隐蔽地进行连续的三维空间定位和定向,能够提供航行体运动状态的全部信息。但是,惯导系统的计算误差会随着时间而累积,这对于续航时间长的航行体来说是致命的缺陷。

GPS 和 INS 各有自己的优点和缺点,但是两者在误差传播性能方面恰好是互补的,GPS 的长期稳定性好,但短期稳定性差,INS 与其正好相反,所以我们可以采用组合导航技术将这些性能不同的导航系统有机地结合在一起,从而来提高导航系统的整体性能^[3]。

2 自适应滤波

自适应滤波是一种具有抑制滤波器发散作用的滤波方法,它在滤波计算中,一方面利用量测不断地修正预测值,同时也对未知的或不确切知道的系统模型参数和噪声统计参数进行估计或修正,使滤波增益自动适应观测数据,减小估计误差。

自适应滤波器原理图如图 1 所示。

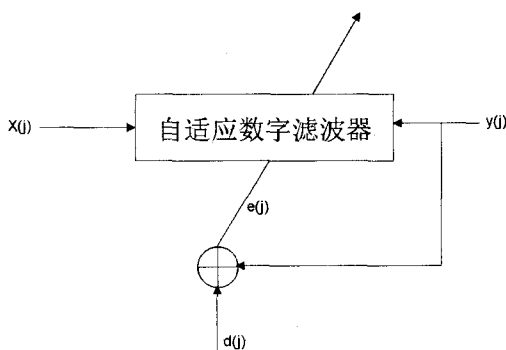


图 1 自适应滤波器原理图

图中 $X(j)$ 表示 j 时刻的输入信号值, $y(j)$ 表示 j 时刻的输出信号值, $d(j)$ 表示 j 时刻的参考信号值或所期望响应信号值,误差信号 $e(j)$ 为 $d(j)$ 与 $y(j)$ 之差。自适应数字滤波器的滤波参数受误差信号 $e(j)$ 的控制,根据 $e(j)$ 的值而自动调整,使之适合下一时刻的输入 $x(j+1)$,以便使输出 $y(j+1)$ 接近于所期望的参考信号 $d(j+1)$ 。

假设系统模型参数已知,且该线性定常系统完全可控和完全可观测,状态方程和量测方程分别为:

$$X_i = \Phi X_{i-1} + W_{i-1} = \Phi^k X_{i-k} + \sum_{l=1}^k \Phi^{l-1} W_{i-l}$$

$$Z_i = HX_i + V_i = H\Phi^k X_{i-k} + H \sum_{l=1}^k \Phi^{l-1} W_{i-l} + V_i$$

式中 W_k 和 V_k 都是零均值的白噪声序列,对应的方差阵 Q 和 R 都是未知阵, Φ 和 H 是已知阵。假设滤波器已经达到稳态,增益阵 K_k 已趋近于稳态值 K 。

输出相关法自适应滤波的基本途径是根据观测数据 $\{Z_i\}$ 估计出输出相关函数序列 $\{C_i\}$,再由 $\{C_i\}$ 推算出最优稳态增益阵 K ,使得增益 K 不断与实际量测数据 $\{Z_i\}$ 相适应^[4]。

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H\Phi\Gamma H^T \\ H\Phi^2\Gamma H^T \\ \vdots \\ H\Phi^n\Gamma H^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H\Phi \\ H\Phi^2 \\ \vdots \\ H\Phi^n \end{bmatrix} \Gamma H^T$$

式中 n 是状态的维数^[5], A 为系统的可观测阵

$$A = \begin{bmatrix} H\Phi \\ H\Phi^2 \\ \vdots \\ H\Phi^n \end{bmatrix} \quad \Gamma H^T = (A^T A)^{-1} A^T \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}$$

$$K = PH^T [HPH^T + R]^{-1}$$

$$X_k = \hat{X}_{k,k-1} + \tilde{X}_{k,k-1}$$

$$\Gamma = E[X_k X_k^T]$$

$$= E[(\hat{X}_{k,k-1} + \tilde{X}_{k,k-1})(\hat{X}_{k,k-1} + \tilde{X}_{k,k-1})^T]$$

$$= F + P$$

式中 $F = E[\hat{X}_{k,k-1} \hat{X}_{k,k-1}^T]$

$$K = (\Gamma H^T - FH^T)(C_0 - HFH^T)^{-1}$$

$$\hat{X}_{k+1,k} = \Phi \hat{X}_k = \Phi[\hat{X}_{k,k-1} + K(H\tilde{X}_{k,k-1} + V_k)]$$

$$F = E[\hat{X}_{k+1,k} \hat{X}_{k+1,k}^T]$$

$$= \Phi E[\hat{X}_{k,k-1} + K(H\tilde{X}_{k,k-1} + V_k)] \cdot$$

$$[\hat{X}_{k,k-1} + K(H\tilde{X}_{k,k-1} + V_k)]^T \Phi^T$$

$$= \Phi[F + K(HPH^T + R)K^T]\Phi^T$$

$$= \Phi[F + (\Gamma H^T - FH^T)(C_0 - HFH^T)^{-1}](\Gamma H^T - FH^T)^T]\Phi^T$$

$$\hat{C}_i^k = \frac{1}{k} \sum_{l=i+1}^k Z_l Z_{l-i}^T$$

$$= \hat{C}_i^{k-1} + \frac{1}{k}(Z_k Z_{k-i}^T - \hat{C}_i^{k-1})$$

其中 $i = 0, 1, 2, \dots, n$

综合上面式子得完全可控和完全可观测定常系统的稳态输出相关自适应滤波方程^[6]:

$$\hat{X}_k = \Phi \hat{X}_{k-1} + \hat{K}^k [Z_k - H\Phi \hat{X}_{k-1}]$$

$$\hat{K}^k = [\hat{\Gamma}^k H^T - \hat{F}^k H^T][\hat{C}_0^k - H\hat{F}^k H^T]^{-1}$$

$$\hat{\Gamma}^k H^T = (A^T A)^{-1} A^T \begin{bmatrix} \hat{C}_1^k \\ \hat{C}_2^k \\ \vdots \\ \hat{C}_n^k \end{bmatrix}$$

$$\hat{F}^k = \Phi[\hat{F}^k + (\hat{\Gamma}^k - \hat{F}^k)H^T[\hat{C}_0^k - H\hat{F}^k H^T]^{-1}H(\hat{\Gamma}^k - \hat{F}^k)^T]\Phi^T$$

$$\hat{C}_i^k = C\hat{C}_i^{k-1} + \frac{1}{k}(Z_k Z_k^T - \hat{C}_i^{k-1})$$

其中

$$\hat{X}_0 = E[X_0] \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

\hat{K}^k, \hat{F}^k 和 \hat{C}_i^k 的上标 k 表示估计所依据的量测数据的个数^[7]。

3 GPS/INS 组合导航系统数学模型

GPS/INS 组合导航系统的状态方程可用一阶矩阵微分方程来描述^[8]:

$$\dot{X}(t) = \Phi(t) X(t) + W(t)$$

在这里假设地球为圆球体,即 $R_m = R_n = R$ 。采用东北天导航坐标系,将地理经度、地理纬度、东向速度、北向速度及平台姿态角作为状态变量^[9],即 $X = [\delta\varphi \ \delta\lambda \ \delta v_E \ \delta v_N \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$,则惯性导航系统的误差模型为:

$$\dot{\delta\varphi} = \frac{1}{R}\delta v_N$$

$$\dot{\delta\lambda} = \frac{v_E}{R\cos\varphi}\tan\varphi\delta\varphi + \frac{\delta v_E}{R\cos\varphi}$$

$$\dot{\delta v_E} = (2\omega_e\cos\varphi v_N + \frac{v_E v_N}{R\cos^2\varphi})\delta\varphi + \frac{v_N}{R}\tan\varphi\delta v_E +$$

$$(2\omega_e\sin\varphi v_N + \frac{v_E}{R}\tan\varphi)\delta v_N - g\beta + \Delta\alpha_E$$

$$\dot{\delta v_N} = (-2\omega_e\cos\varphi v_E - \frac{v_E v_N}{R\cos^2\varphi})\delta\varphi +$$

$$(-2\omega_e\sin\varphi + \frac{2v_E}{R}\tan\varphi)\delta v_E + g\alpha + \Delta\alpha_N$$

$$\dot{\alpha} = -\frac{1}{R}\delta v_N + (\omega_e\sin\varphi + \frac{v_E}{R}\tan\varphi)\beta -$$

$$(\omega_e\cos\varphi + \frac{v_E}{R})\gamma + \varepsilon_x$$

$$\dot{\beta} = -\omega_e\sin\varphi\delta\varphi + \frac{1}{R}\delta v_E -$$

$$(\omega_e\sin\varphi + \frac{v_E}{R}\tan\varphi)\alpha - \frac{v_N}{R}\gamma + \varepsilon_y$$

$$\dot{\gamma} = (\omega_e\cos\varphi + \frac{v_E}{R\cos^2\varphi})\delta\varphi + \frac{1}{R}\tan\varphi\delta v_E + \frac{v_N}{R}\beta +$$

$$(\omega_e\cos\varphi + \frac{v_E}{R})\alpha + \varepsilon_z$$

上式中, ω_e, g 分别是地球自转的角速度与重力加速度; $\Delta\alpha_E, \Delta\alpha_N$ 分别是东向与北向的加速度计的误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 ε_z 是陀螺仪的常值漂移量^[10]。由上,组合导航系统观察方程为:

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t)$$

采用惯性导航系统和卫星导航系统接收机之间的位置差作为观测信息,即^[11]:

$$Z(t) = [\varphi_{INS} - \varphi_{GPS} \lambda_{INS} - \lambda_{GPS} v_{EINS} - v_{EGPS} v_{NINS} - v_{NGPS}]^T$$

对应的观测矩阵为:

$$H = [\text{diag}([1, 1, 1, 1]) \ 0_{4 \times 3}]$$

将组合系统状态方程离散化,就可以应用自适应滤波算法对导航参数误差进行最优设计^[12]。

4 仿真结果分析

依据上文给出的 GPS/INS 组合导航系统的数学模型,分别采用常规卡尔曼滤波和第2节中介绍的滤波方法,对状态变量进行最优估计,仿真结果如图2到图5所示。

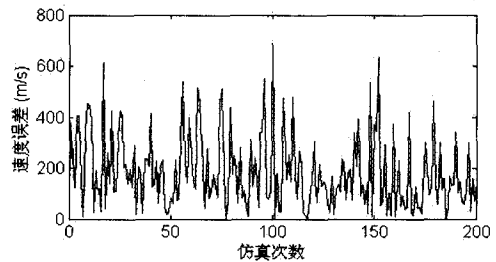


图2 常规卡尔曼滤波的速度误差

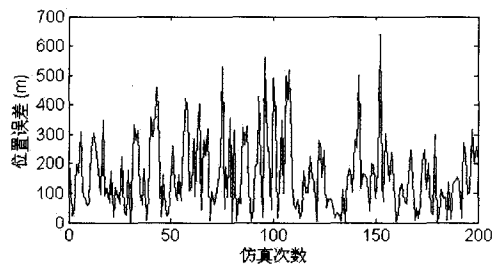


图3 常规卡尔曼滤波的位置误差

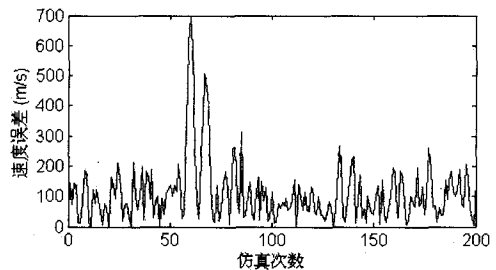


图4 自适应卡尔曼滤波的速度误差

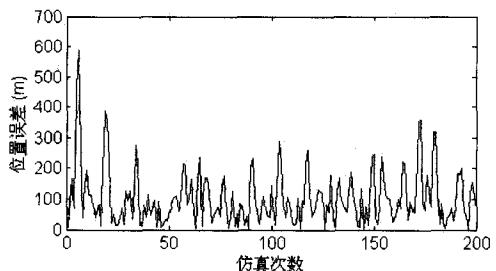


图5 自适应卡尔曼滤波的位置误差

4 结束语

DEA/AHP 模型将方法 DEA 和 AHP 相结合,实现了它们的优势互补,将原来的有效和非有效分类,扩展到决策单元的全排序^[15]。最后,以船用配件制造业为研究对象,通过选择决策过程的评价分析,表明 DEA/AHP 综合评价方法具有较强的适用性和可操作性,但针对不同的项目合作伙伴存在的不同特点,在指标设计取值方面也应有所不同。因此,在方法具体应用过程中,需广泛征求熟悉的决策者和有关专家意见。

参考文献:

- [1] Aissaoui N, Haouaria M, Hassinib E. Supplier selection and order lot sizing modeling: a review[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34: 3516-3540.
- [2] Degraeve Z, Labro E, Roodhooft F. An evaluation of vendor selection models from a total cost of ownership perspective[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 125: 34-58.
- [3] Boer L, Labro E, Morlacchi P. A review of methods supporting supplier selection[J]. European Journal of Purchasing & Supply Management, 2001, 7(2): 75-89.
- [4] Saaty T L, Alexander J M. Thinking with models: mathematical models in the physical, biological and social sciences[M]. London: Pergamon Press, 1981.
- [5] Badri M A. A combined AHP-GP model for quality control systems[J]. Int. J. Production Economics, 2001, 72: 27-40.
- [6] de Boer L, van der Wegen L, Telgen J. Outranking methods in support of supplier selection[J]. Journal of Purchasing and Supply Management, 1998, 4(2): 109-118.
- [7] Yahya S, Kingsman B. Modelling a multi-objective allocation problem in a government sponsored entrepreneur development programme[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 136: 430-448.
- [8] 刘宁, 高飞燕. 基于 AHP-FCE 的供应商选择问题研究与应用[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 11-14.
- [9] 姜丽. 多 agent 协商研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [10] 田宇. 物流服务供应链构建中的供应商选择研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(5): 51-52.
- [11] 王荣培, 万麟瑞. 多专家 AHP 的算法改进及其在供应商选择模型中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(7): 89-90.
- [12] Satty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGrawHill, 1980.
- [13] Charnes A, Cooper W W, Rhode E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units[J]. European Journal of Operational Research, 1978(2): 429-444.
- [14] 魏权龄. 评价相对有效性的 DEA 方法—运筹学的新领域[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998.
- [15] 赵娜, 祝海梅, 陈焕标, 等. 基于 AHP 和 DEA 的港口供应链合作伙伴选择[J]. 水运工程, 2009(3): 57-59.

(上接第 185 页)

由此对比可以发现,当初始条件相同时,自适应卡尔曼滤波算法使得组合导航系统状态变量的滤波效果更加改善,自适应性显著增强。

5 结束语

文中基于反馈控制的思想介绍了自适应卡尔曼滤波算法,并对组合导航系统数学模型进行了仿真验证。仿真结果表明,自适应卡尔曼滤波方法有效地提高了收敛速度和滤波精度,对组合导航系统精度的提升有了进一步的改善。

参考文献:

- [1] 李弼程, 黄洁, 高世海, 等. 信息融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航系统原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [3] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1998.
- [4] 付梦印. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] Stauffer C, Grimson W. Adaptive background mixture models for real time tracking[C]// Proceedings of the IEEE CS Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Collins: IEEE Computer Society, 1999: 246-252.
- [6] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [7] Sasiadek J Z, Wang Q, Zeremba M B. Fuzzy Adaptive Kalman Filtering For INS/GPS Data Fusion[C]// Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Intelligent Control. [s. l.]: [s. n.], 2000: 181-186.
- [8] XU Guo-wei, MA Sheng-qian, WEI SHU-ping. Research to RLS Algorithm of Adaptive Filter and Its DSP Realization[J]. Computer Technology and Development, 2010(10): 35-38.
- [9] 许国威, 马胜前, 危淑平. 基于 LabVIEW 与 MATLAB 的自适应滤波器设计研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(1): 226-229.
- [10] 衡霞, 刘志镜. 基于自适应滤波的语音增强和噪声消除[J]. 微机发展(现更名: 计算机技术与发展), 2004, 14(1): 96-98.
- [11] 夏伟才, 曾致远. 一种基于卡尔曼滤波的背景更新算法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(10): 134-136.
- [12] 谢小娟. GPS 数据采集系统[J]. 微机发展(现更名: 计算机技术与发展), 1997, 7(2): 55-56.