

自适应闭环 H_∞ 滤波在组合导航系统中的实现研究

康国华¹, 刘建业¹, 刘瑞华², 赵 伟¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院导航研究中心, 江苏 南京 210016;

2. 中国民航学院 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘要: 针对常规 H_∞ 滤波在组合导航系统中滤波精度不高的问题, 采用闭环反馈的方法对滤波加以改进; 并在闭环 H_∞ 滤波迭代方程中引入遗忘因子, 利用量测噪声的变化自适应调整滤波增益, 构成自适应闭环 H_∞ 滤波. 理论分析表明, 该改进的滤波算法降低了噪声干扰, 但不影响 H_∞ 滤波本身的鲁棒性. 无源北斗/SINS组合导航系统跑车数据的半物理仿真进一步表明, 自适应闭环 H_∞ 滤波下的组合导航精度明显优于采用开环 H_∞ 滤波或不带有遗忘因子的闭环 H_∞ 滤波算法的导航精度, 从而验证了改进滤波算法的有效性.

关键词: 组合导航; H_∞ 鲁棒滤波; 自适应滤波; 闭环修正; 无源北斗

中图分类号: V249

文献标识码: A

Realization of adaptive closed-loop H-infinity filter in integrated navigation system

KANG Guo-hua¹, LIU Jian-ye¹, LIU Rui-hua², ZHAO Wei¹

(1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;

2. TianJin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To deal with the low precision of normal H-infinity filter in the integrated navigation system, the closed-loop feedback is employed for the H-infinity filter. In the closed-loop H-infinity filter, a forgetting factor is introduced to adjust the filter gain automatically based on the level of the measurement noise, constituting a closed-loop adaptive H-infinity filter. The theoretical analysis indicates that this adaptive close-loop H-infinity filter lowers the disturbance noise level, without affecting the inherent robustness of the H-infinity filter. Finally, the trial experiment of passive BD/SINS integrated navigation system shows that the navigation precision of the system with the adaptive closed-loop H-infinity filter is higher than that with the open-loop H-infinity filter, or the closed-loop H-infinity filter without the forgetting factor. This verifies the efficacy of the proposed H-infinity filter in raising the precision of the integrated navigation system.

Key words: integrated navigation; H-infinity filter; adaptive filter; closed-cycle correction; passive Beidou

1 引言(Introduction)

目前Kalman滤波或者基于Kalman滤波的改进算法如UKF、EKF、联邦滤波等已在组合导航系统中得到普遍应用^[1,2]. 但随着近年来非相似性导航系统的增加、新传感器不断出现以及导航应用领域的扩展, 组合导航系统难以精确建模, 噪声统计特性难以获得等问题逐渐突出, 影响了Kalman滤波稳定性. 针对这一问题, 国内外不少学者进行了研究, 其中 H_∞ 滤波器以其突出的稳定性, 对噪声特性的不依赖性以及滤波参数设置简单等优点, 受到了关注^[3~5]. 但同时也由于 H_∞ 滤波解的不确定性^[4], 导致其滤波精度差, 使得 H_∞ 滤波在具体应用上受到了

一定程度的限制.

本文通过研究, 对原来常规的 H_∞ 滤波进行改进, 通过引入闭环修正和遗忘因子构成自适应闭环 H_∞ 滤波, 提高滤波精度; 并利用跑车实测的无源北斗/SINS组合导航原始数据进行半物理仿真加以验证.

2 常规 H_∞ 滤波(Normal H_∞ filter)

一般的, 考虑如下开环线性时变离散系统:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_{k+1,k}x_k + B_k w_k, \\ y_k = C_k x_k + D_k w_k. \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_k 为系统状态变量, 在组合导航系统中通常为

误差矢量; y_k 为量测输出, A_k, B_k, C_k 和 D_k 为相应系数矩阵, w_k 为能量有限的噪声信号。

可以证明^[5], 对(1)这样的系统, H_∞ 滤波具有如下递推形式:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k,k-1} = A_k \hat{x}_{k-1,k-1}, \\ P_{k,k-1} = P_{k-1,k-1}^{-1} - \gamma^{-2} I, \\ \hat{x}_{k,k} = \hat{x}_{k,k-1} + K_k [y_k - C_k \hat{x}_{k,k-1}], \\ K_k = [B_k D_k^T + A_k P_{k,k-1}^{-1} C_k^T] [I + \\ C_k P_{k,k-1}^{-1} C_k^T]^{-1}, \\ P_{k,k} = (A_k - K_k C_k) P_{k,k-1}^{-1} (A_k - K_k C_k)^{-1} + \\ (B_k - K_k D_k (B_k - K_k D_k)^{-1}), \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_k 为滤波的反馈增益矩阵, γ 为 H_∞ 滤波目标函数的稳定性阈值, P_k^k 是 Riccati 方程^[5] 的解。

3 改进的 H_∞ 滤波 (H_∞ filter improved)

3.1 闭环修正的引入 (Introduced closed-cycle correction)

式(2)构建的滤波器是由式(1)开环系统得到, 因此在系统误差修正上采用开环校正, 虽有理论表明系统鲁棒性有保证, 但实际滤波精度欠佳^[6], 因此限制了其使用, 特别是在对精度要求较高的导航系统中。实际上, 在最优控制系统中, 闭环控制比开环控制优越的多, 表现在它对噪声干扰的敏感性低。由此本文结合以往的研究工作, 提出了对 H_∞ 滤波采用闭环控制的算法。在式(1)的 x_{k+1} 中引入控制量 $T_k U_k$, U_k 为控制项, T_k 为控制项系数矩阵, 如下所示:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_{k+1,k} x_k + T_k U_k + B_k w_k, \\ y_k = C_k x_k + D_k w_k. \end{cases} \quad (3)$$

闭环修正的 H_∞ 滤波递推方程需要求解复杂的 Riccati 方程, 由于 H_∞ 滤波和 Kalman 滤波的相似性^[7], 不妨借鉴 Kalman 滤波开环和闭环仅是 $\hat{x}_{k,k-1}$ 不同的特点, 将式(2)中的 $\hat{x}_{k,k-1}$ 增加控制项 $T_{k-1} U_{k-1}$ 如式(4)所示, 其余的不变, 构成闭环 H_∞ 滤波的滤波方程:

$$\hat{x}_{k,k-1} = A_{k,k-1} \hat{x}_{k-1,k-1} + T_{k-1} U_{k-1}. \quad (4)$$

这里需要把控制律 U_{k-1} 用 $\hat{x}_{k-1,k-1}$ 表示出来。根据控制理论中的“分离定理”, 控制率即反馈控制和最优估计可以分开考虑。首先考虑控制律, 这里引入控制律的目的是提高滤波精度, 根据惯性组合导航系统的物理可实现关系, 设置以下的二次型性能指标:

$$J_N = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} x_k^T Q_k x_k + x_N^T S x_N \right\}, \quad (5)$$

其中: Q_k, S 为加权矩阵, $x_k^T Q_k x_k$ 为控制过程的误差, $x_N^T S x_N$ 为终端误差。利用极大值原理或者动态规划

等方法^[8], 可以求得线性离散系统(3)在式(5)下的最优控制律:

$$U_k = -T_k^{-1} A_{k+1,k} \hat{x}_{k,k}, \quad (6)$$

接着考虑二次型性能指标下的最优估计, 将上式代入式(4)得

$$\hat{x}_{k,k-1} \equiv 0, \quad (7)$$

从中看出 $\hat{x}_{k,k-1} \equiv 0$, 这正是由于最优控制律的作用: 由于系统状态变量为误差矢量, 从统计角度考虑, 在系统误差反馈并扣除后, 误差矢量应为零。

3.2 自适应闭环 H_∞ 滤波 (Adaptive closed-cycle H_∞ filter)

无论是 Kalman 滤波还是 H_∞ 滤波, 当前的滤波值都是在以往观测数据的基础上获得的, 这样随着时间累计, 以往观测数据对当前滤波值影响比重增加, 降低了滤波器对现时数据的敏感性, 通常导致滤波误差增大。遗忘因子的引入, 构成自适应滤波, 可以很好的解决这一问题。文献[9]给出了在某常规 H_∞ 滤波中引入遗忘因子的滤波增益方程:

$$P_{k,k-1}^* = A_k [P_k^* \lambda] A_k^T + B_k w(k) w(k)^T B_k^T, \quad (8)$$

$$K_k^* =$$

$$P_{k,k-1}^* H^T (H P_{k,k-1}^* H^T + D_k w(k) w(k)^T D_k^T)^{-1}, \quad (9)$$

式中: H 是个过渡变量, λ 是引入的遗忘因子 (标量 $\lambda > 1$), 消除式(8)中的 λ 就恢复成文献[9]中的基本 $\tilde{P}_{k,k-1}, \tilde{K}_k$ 。由于遗忘因子 $\lambda > 1$, 因此 $P_{k,k-1}^*$ 总大于 $\tilde{P}_{k,k-1}$, 所以 $K_k^* > \tilde{K}_k$ 。这意味着引入遗忘因子后, 新量测值利用的权重比原来基本方差时的权重大。但本文经过仿真发现, 这样引入的 λ 易导致 Riccati 方程求解出现矩阵不可求逆的现象。对此, 根据滤波方程迭代的特点和遗忘因子所起的作用, 本文将遗忘因子直接引入到闭环 H_∞ 滤波状态变量的量测更新上, 即

$$\hat{x}_{k,k}^* = \lambda K_k y_k = (\lambda K_k) y_k = \hat{K}_k^* y_k. \quad (10)$$

由此看出, 引入的 λ 通过调节 K_k , 加大了现时数据的利用权重, 从而达到了遗忘因子的目的。另一方面这并不影响 $P_{k,k}$ 的迭代, 从而保证了滤波的鲁棒性。

在工程应用中可采用预报残差设计滤波发散判据^[10], 判断滤波状态是否正常。这里可借助此判据使 λ 自适应调整。

$$z_k = y_k - C_k \hat{x}_{k,k-1}, \quad (11)$$

$$z_k^T z_k \geq \beta \text{tr}[E(z_k z_k^T)], \quad (12)$$

式中: z_k 是预报残差, $\beta \geq 1$ 是储备系数, 式(12)是发散判据。若式(12)成立, 表明滤波器的实际估值误

差将超过理论值的 β 倍以上. 将式(7)(11)代入式(12), 考虑到 y_k 相关性较弱, 得

$$\|y_k\|_2 \geq \beta E(\|y_k\|_2), \quad (13)$$

由于实际系统的 $E(\|y_k\|_2)$ 较难获得, 本文提出如下判据

$$\|y_k\|_2 \geq \beta E(\|y_{k-1}\|_2), \quad (14)$$

即通过两个相邻时刻的残差变化判断滤波是否发散. 对比式(13)和式(14)可以看出, 前者从宏观($E(\|y_k\|_2)$)上判断滤波是否发散, 后者更注重细节的变化. 由于 H_∞ 滤波稳定性较好, 滤波中出现式(13)的情况较少, 而常出现式(14)的情况, 从而延长了滤波收敛时间. 因此本文采用式(14)作为调节遗忘因子的前提条件, 并利用相邻时刻的残差变化计算遗忘因子 λ (或 λ_k):

$$\lambda_k = (1 - \frac{\|y_{k-1}\|_2}{\|y_k\|_2})\sigma|_{\beta}, \quad (15)$$

其中 σ 是调整系数, 可根据实际情况设定. 式(15)表明: 一旦 $\frac{\|y_k\|_2}{\|y_{k-1}\|_2}$ 超过规定的 β 时, 将滤波增益 K_k 扩大 λ_k 倍, 即增强现时量测数据的权重. 采用式(15)计算, $\lambda_k \leq \sigma$, 可避免出现过调现象.

4 改进的 H_∞ 滤波的应用(Application of H_∞ filter improved)

4.1 无源北斗/SINS组合模型(Model of PBD/SINS)

本文将改进的算法应用于无源北斗/SINS组合导航系统中. 由于无源北斗接收机近年才研制使用, 系统还不完善, 输出中的有色噪声大、数据跳变点多, 导航精度不高. 针对实际接收机的噪声统计分析和建模工作还有待深入. 因此采用要求已知噪声统计特性的Kalman滤波效果欠佳. 相比之下 H_∞ 滤波不需要这些统计参数, 应用时更具优势.

建立系统动态方程时, 组合系统中SINS的加速度计和陀螺也不再建立复杂的误差模型, 因此以最基本的9个导航误差量为状态矢量, 建立的9阶组合导航系统状态方程^[11]为

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + G(t)V_I(t), \quad (16)$$

其中:

$$X = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta v_E \ \delta v_N \ \delta v_U \ \delta L \ \delta \lambda \ \delta h]^T,$$

$$V_I = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az}]^T,$$

式中: ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 分别为捷联系统数学平台误差角; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 为捷联惯导的速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为捷联惯导的位置误差; 下标 E, N, U 表示东北天坐标系. $\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}$ 分别表示陀螺噪声; $\omega_{gx}, \omega_{gy},$

ω_{gz} 表示加速度计噪声; $A(t), G(t)$ 具体形式参见参考文献[11]. 组合导航系统采用常规的位置速度组合, 量测方程比较简单, 参见文献[11,12]. H_∞ 滤波参数 $\gamma = 3$, 滤波初值根据实际情况选取.

4.2 跑车试验(Experiment)

为了检验以上改进 H_∞ 滤波算法的正确性, 用跑车试验数据进行验证. 半物理仿真系统如图1所示: 先采集导航设备的原始数据, 其中IMU表示由陀螺和加速度计构成的惯性测量单元, 然后再以读数据文件的方式进行离线实现.

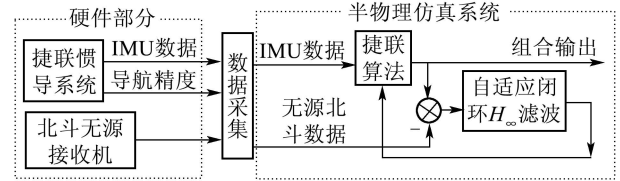


图1 无源北斗/SINS组合导航半物理仿真系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of simulated PBD/SINS navigation system

使用的导航设备为: 捷联惯导系统, 装有挠性陀螺和石英压电加速度计, 精度分别为 $0.2^\circ/\text{h}$ 和 10^{-4} g ; 一台无源北斗接收机, 国内某家单位研制, 位置误差和速度误差分别为15 m和1 m/s, 可工作在三星+高度表和双星+高度表+铷钟这两种无源伪距接收模式.

一共进行了5次跑车, 两组路线, 跑车结果大体相同, 这里选取时间最长的一组进行说明. 跑车时间是2005年11月19日上午, 路线如图2所示: 从西安的南郊出发, 经西户高速到达户县, 再沿西沔公路返回原点, 历时约90多分钟. 跑车时无源北斗的工作模式是双星+高度表+铷钟.

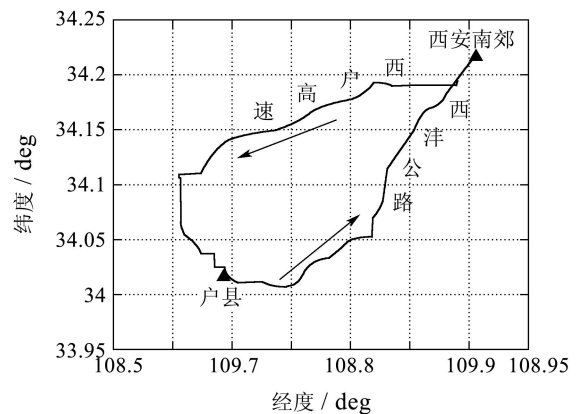


图2 跑车轨迹示意图

Fig. 2 Experiment route

开环和闭环 H_∞ 滤波效果对比如图3、图4所示, 这里的误差是指组合导航结果与无源北斗对应输出的差值. 通过对比可以清楚看出: 开环 H_∞ 滤波下纬

度误差有明显的发散-收敛-稳定过程, 而闭环 H_∞ 滤波下的纬度误差曲线则很平稳. 经度误差的对比情况也如此, 因篇幅有限这里不再画出; 图4的速度误差对比更清楚的显示出闭环 H_∞ 滤波误差小的特点. 图3、图4对应的误差统计如表1所示, 表中数据表明动态环境下闭环 H_∞ 滤波已具有实用精度.

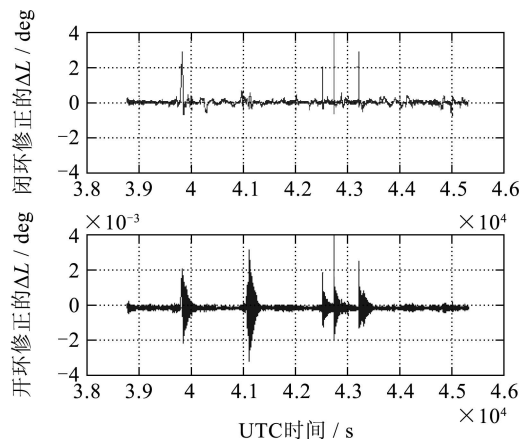


图3 闭/开环 H_∞ 滤波下纬度误差对比曲线

Fig. 3 Latitude error of closed-cycle/open-cycle H_∞ filter

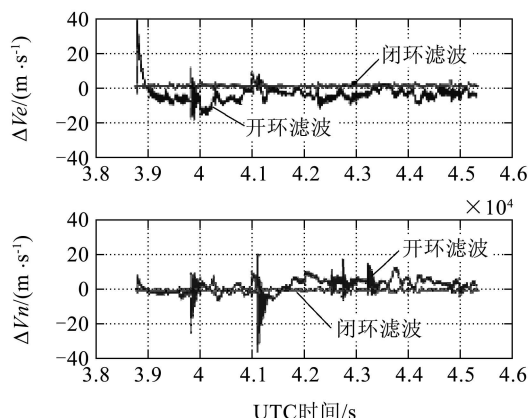


图4 闭/开环 H_∞ 滤波下的速度误差对比

Fig. 4 Velocity error of closed-cycle/open-cycle H_∞ filter

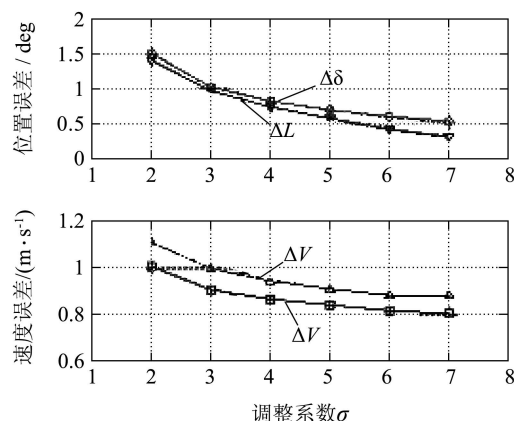


图5 H_∞ 滤波闭环修正下遗忘因子对导航误差的影响

Fig. 5 Forgetting factor effect on the navigation error of closed-cycle H_∞ filter

表1 PB/SINS组合导航系统跑车实验误差

Table 1 Experiment error of PB/SINS integrated navigation system

滤波类型	速度方差(1σ)		位置方差(1σ)	
	东向/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	北向/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	经度/m	纬度/m
开环 H_∞ 滤波	4.81	4.55	23.97	33.12
闭环 H_∞ 滤波	1.04	1.16	18.98	17.88

遗忘因子对闭环 H_∞ 滤波精度影响的曲线如图5所示, 图中一点对应一次跑车仿真, 点的 x 坐标是对应跑车仿真时滤波采用的调整系数. 从图中看出, 随着调整系数 σ 的增加, 即遗忘因子作用的增强, 组合导航系统的速度、位置误差都明显下降, 并趋向稳定, 但随着 σ 增大也存在过调现象, 因此 σ 可根据实际情况选取合适的大小. 图5显示当 $\sigma = 7$ 时, 位置误差5 m以内, 速度误差0.88 m/s以内. 可以看出明显优于表1列出的不带有遗忘因子下的闭环 H_∞ 滤波精度, 从而验证了遗忘因子的有效性.

5 结论(Conclusion)

自适应闭环 H_∞ 滤波, 通过闭环修正和遗忘因子这两个改进手段, 不仅简化了 H_∞ 滤波递推公式, 而且在不改变滤波鲁棒性的前提下进一步提高了滤波精度, 拓宽了 H_∞ 滤波的应用领域, 使 H_∞ 滤波在工程中的应用成为可能. 无源北斗/SINS组合导航系统的动态跑车半物理仿真表明, 在系统噪声模型还不能精确已知的环境下, 闭环 H_∞ 滤波可取得比开环 H_∞ 滤波更好的效果; 遗忘因子的引入可有效提高组合导航系统的精度. 对比以往文献[6,7,11]所做的 H_∞ 滤波静态仿真或纯数字动态仿真, 以上结果是通过实际动态跑车获得, 并且是在无源北斗/SINS组合系统中实现, 因此结论更具有参考意义.

参考文献(References):

- [1] ROMANENKO A, CASTRO J A A M. The unscented filter as an alternative to the EKF for nonlinear state estimation: a simulation case study[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(3): 347 – 355.
- [2] 袁冬莉, 席庆彪, 阎建国, 等. 联邦卡尔曼滤波器在无人机导航系统中的应用[J]. *西北工业大学学报*, 2002, 20(2): 310 – 313. (YUAN Dongli, XI Qingbiao, YAN Jianguo, et al. A globally optimal GPS/RP/DR navigation system for P. R. China's Remotely Piloted Vehicle[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2002, 20(2): 310 – 313.)
- [3] JIN S H, PARK J B, KIM K K, et al. Krein space approach to decentralized H_∞ state estimation[J]. *IEEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2001, 148(6): 502 – 508.

不考虑为此而付出的代价。

例1 设目标函数(9)中 $\lambda = 0.5$; 系统(5)中的 $A_i(z) = 1 + 0.2z$; $B_i(z) = -5 + 2z, i = 1, \dots, N$, 则根据定理1和推论1可知系统(5)均方稳定, 且局部目标函数有界。

5 结论(Concluding remarks)

本文主要提出了一类基于局部-整体反馈控制的多个体系统的稳定性问题的框架, 并在此框架下研究了一类线性随机系统的均方稳定性。但这些结果都是很初步的, 并且所用的方法有一定的局限性, 还有大量问题值得进一步深入研究, 例如, 我们没有考虑反映整个系统状态的整体目标函数(例如同步性问题等); 本文中的邻居关系还有很大的局限性, 实际中, 个体能预测到的平均信息可能是局部的。希望在今后的研究中进一步考虑这些问题。

参考文献(References):

- [1] VICSEK T, CZIROK A, JACOB B E, et al. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(6): 1226 – 1229.
- [2] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988 – 1001.
- [3] SAVKIN AV. Coordinated collective motion of groups of autonomous mobile robots: analysis of Vicsek's model[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 39(6): 981 – 983.
- [4] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(5): 655 – 661.
- [5] MOUREAU L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(2): 169 – 181.
- [6] HUANG M Y. *Stochastic control for distributed systems with applications to wireless communications*[D]. Canada: McGill University Press, 2003.
- [7] BASAR T, HO Y C. Information properties of the Nash solutions of two stochastic nonzero-sum games[J]. *Journal of Economic Theory*, 1974, 7(4): 370 – 387.
- [8] 张明, 施鼎汉. 联参数不确定系统的 H_∞ 滤波器-基于代数Riccati不等式的判据与设计方法[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(5): 711 – 714.
(ZHANG Ming, SHI Dinghan. An H_∞ filter for uncertain parameter System—a criterion and design method based on algebraic Riccati inequality[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 711 – 714.)
- [9] RAMI S M, BRENT D A, GEROGEE C V. Stochastic Interpretation of H_∞ and Robust Estimation[C] // *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*. Lake Buena Vista: IEEE Press, 1994, 3943 – 3948.
- [10] 岳晓奎, 袁建平. H_∞ 滤波算法及其在GPS/SINS组合导航系统中的应用[J]. *航空学报*, 2001, 22(4): 366 – 368.
(YUE Xiaokui; YUAN Jianping. H_∞ filtering algorithm and its application in GPS/SINS integrated navigation system[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2001, 22(4): 366 – 368.)
- [11] 王新屏, 张显库, 张丽坤. H_∞ 鲁棒滤波器与Kalman滤波器的对比[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(10): 1267 – 1269.
(WANG Xinping, ZHANG Xianku, ZHANG Likun. Comparison of H_∞ robust filter and Kalman filter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(10): 1267 – 1269.)
- [12] 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.
- [13] 贾志凯, 房建成, 李艳华. 带遗忘因子的在机载SAR运补系统中的应用[J]. *中国惯性技术学报*, 2003, 11(2): 5 – 8.
(JIA Zhikai, FANG Jiancheng, LI Yanhua. On H_∞ filtering with forgetting factor for airborne SAR motion compensation system[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2003, 11(2): 5 – 8.)
- [14] 徐景硕, 秦永元, 彭蓉. 自适应卡尔曼滤波器渐消因子选取方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(11): 1552 – 1554.
(XU Jingshuo, QIN Yongyuan, PENG Rong. New method for selecting adaptive Kalman filter fading factor[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(11): 1552 – 1554.)
- [15] 赵伟, 袁信, 林雪原. 采用 H_∞ 滤波器的GPS/INS全组合导航系统[J]. *航空学报*, 2002, 23(3): 265 – 269.
(ZHAO Wei, YUAN Xin, LIN Xueyuan. Research on complete gps/ins integration using H_∞ filter[J]. *Acta Aeronautica on Astronautica Sinica*, 2002, 23(3): 265 – 269.)
- [16] KANG G H, LIU J Y, ZHU Y H, et al. Realization of GPS/SST/SINS integrated navigation filter algorithm for ballistic missile[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Theory and Applications*, 2005, 22(2): 115 – 118.

作者简介:

刘志新 (1979—), 女, 中国科学院数学与系统科学研究院系统科学研究所博士研究生, 研究方向为复杂多个体系统, E-mail: lzx@amss.ac.cn.

(上接第550页)

作者简介:

康国华 (1978—), 男, 2006年获南京航空航天大学导航、制导与控制博士学位, 现从事惯导、卫星定位与组合导航和微小卫星姿控等领域的研究, E-mail: kghnuaa@nuaa.edu.cn;

刘建业 (1957—), 男, 南京航空航天大学自动化学院教授、博士生导师, 从事惯性技术、卫星定位、组合导航的研究, E-mail: Ljyac@nuaa.edu.cn.