

文章编号: 1001-0920(2007)05-0566-03

闭环 H 滤波在无源北斗/SINS 导航系统中的实现

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, 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: H 滤波通常应用于系统模型和噪声特性不确定的环境, 存在滤波精度不高的缺点. 通过对 H 滤波引入闭环修正, 在不影响滤波鲁棒性的前提下, 有效地提高了系统精度. 无源北斗/SINS 组合导航系统的动态跑车实验结果表明, 闭环 H 滤波下的组合导航精度优于相同滤波误差模型下的闭环 Kalman 滤波, 并且具有参数设置简单、滤波稳定性强的优点.

关键词: 组合导航; H 鲁棒滤波; Kalman 滤波; 闭环修正

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

Realization of closed-cycle H filtering in passive BD/SINS navigation system

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

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China.
Correspondent: KANG Guo-hua, E-mail: kghnuaa@nuaa.edu.cn)

Abstract: H filtering usually is used in the special environment of the uncertain system model and noise character, and its low precision confines its application field. By applying new H filtering with closed-cycle correction, the filtering precision is increased and the inherent robustness is kept. The trial run experiment of passive BD/SINS integrated navigation system shows that the precision of this closed-cycle H filtering is higher than that of Kalman filtering with the same error model. Moreover, this new filtering has fewer parameters and more powerful robustness.

Key words: Integrated navigation; H filter; Kalman filter; Closed-cycle correction

1 引言

H 滤波和 Kalman 滤波是线性随机动态系统中的两种参数最优估计方法, 只是追求的最优性能指标不同. Kalman 滤波追求的是二次型性能指标下的最优, 要求系统状态误差的方差最小, 即强调估计精度; H 滤波追求的是噪声干扰对可控输出的影响最小, 即强调系统的鲁棒性^[1].

H 滤波不需建立精确的误差模型, 也不需知道系统误差的统计特性, 滤波参数设置简单, 这正是 Kalman 滤波所缺乏的. 在许多实际应用场合, 如空间运行过程中大型航天器或无源北斗双星定位等, 由于对干扰信号的统计特性一般无法精确知道, H 滤波便可获得比 Kalman 滤波更好的结果. 但

H 滤波解的不确定性^[2], 导致其滤波精度变差, 使得这种方法的应用在一定程度上受到了限制. 本文通过在常规的开环 H 滤波的基础上引入闭环修正的方法, 既提高了滤波精度, 又保证了系统的鲁棒性.

2 开环 H 滤波

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, y_k 为量测输出, A_k , B_k , C_k 和 D_k 为相应的系数矩阵, w_k 为能量有限的噪声信号. 可以证明^[3], 对于式 (1) 这种形式的动态系统, H 滤波具有如下递推方程形式:

收稿日期: 2006-02-15; 修回日期: 2006-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60472125).

作者简介: 康国华(1978—), 男, 福建南平人, 博士生, 从事卫星定位、组合导航的研究; 刘建业(1957—), 男, 浙江桐乡人, 教授, 博士生导师, 从事惯性技术、组合导航等研究.

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

其中: K_k 为滤波反馈增益矩阵, 为 H 滤波目标函数的稳定性阈值, $P_{k,k}$ 为 Riccati 方程^[4] 的解.

3 闭环 H 滤波的构建

以往的研究通常利用式(2) 构建的 H 滤波器进行输出修正(即开环控制), 使系统的鲁棒性得以保证, 但是精度欠佳^[5]. 实际上, 在最优控制系统中, 闭环控制比开环控制优越得多, 表现在它对噪声干扰的敏感性较低. 由此本文提出闭环 H 滤波算法. 考虑在式(1) 的 x_{k+1} 中加入控制项 $T_k U_k$, 即

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

其中: U_k 为控制律, T_k 为控制项系数矩阵.

闭环 H 滤波的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, 不妨利用开环 Kalman 滤波和闭环 Kalman 滤波的差别^[6], 对式(2) 中的 $\hat{x}_{k,k-1}$ 增加控制项 $T_{k-1} U_{k-1}$, 即

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

其余项不变, 构成闭环 H 滤波方程.

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, 控制律(即反馈控制) 和最优估计可以分开考虑. 首先考虑控制律, 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, 设置二次型性能指标, 并利用极大值原理或动态规划等方法, 求得线性离散系统(3) 在二次型性能指标下的最优控制律^[6]

$$U_k = - T_k^{-1} A_{k+1,k} \hat{x}_{k,k}. \quad (5)$$

考虑二次型性能指标下的最优估计, 将求得的控制律代入式(4), 得 $\hat{x}_{k,k-1} = 0$. $\hat{x}_{k,k-1}$ 始终为 0, 这正是最优控制律的作用. 由于系统状态变量为误差矢量, 从统计的角度看, 在系统误差反馈并扣除后, 误差矢量应为 0. 用 $\hat{x}_{k,k-1} = 0$ 替换式(2) 中的 $\hat{x}_{k,k-1}$, 就是闭

环 H 滤波的递推公式.

4 闭环 H 滤波的应用

4.1 无源北斗 / SINS 组合模型

相对于 GPS 接收机这样成熟的系统, 无源北斗接收机近年来才开始研制, 系统还不完善, 输出有色噪声大, 数据跳变点多, 噪声分析和建模工作有待于深入研究. 应用 Kalman 滤波存在不确定的滤波统计参数; 相比之下, 闭环 H 滤波参数设置简单, 可以直接应用.

为了简化, 不对 SINS 系统的加速度计和陀螺建立复杂的误差模型. 这里以最基本的 9 个导航误差量为状态矢量, 建立 9 阶组合导航系统状态方程^[4]

$$\dot{X}(t) = A(t) X(t) + G(t) V_I(t). \quad (6)$$

其中 $A(t)$, $X(t)$, $G(t)$ 和 $V_I(t)$ 的具体形式参见文献[4]. 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^[7]. 闭环 H 滤波参数 $n = 3$, 滤波初值根据实际情况选取. 闭环 H 滤波的组合导航系统原理如图 1 所示.

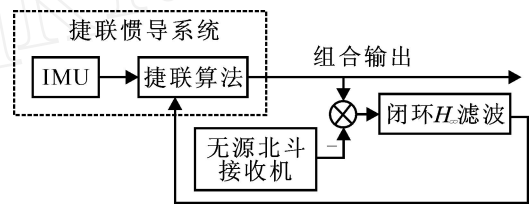


图 1 无源北斗 / SINS 组合闭环 H 滤波原理

4.2 实验验证

通过室内静态定位和室外跑车对闭环 H 滤波进行验证. 采用的实际器件为: 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 $0.2^\circ/h$ 和 $10^{-4}g$; 无源北斗接收机, 国内某单位研制, 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 + 铷钟这两种无源模式. 采集以上器件的原始数据, 进行组合导航半物理仿真.

为了对比, 对相同数据分别进行闭环 Kalman 滤波和闭环 H 滤波. 闭环 Kalman 滤波器的状态方程与闭环 H 滤波相同, 量测方程的观测噪声为白噪声, 滤波参数根据器件情况设定. 静态下两种滤波的导航结果如表 1 所示, 其中姿态、速度和位置精度参数为各自三轴方向精度的均值.

表 1 静态下无源北斗 / SINS 组合导航精度(1) 对比

组合导航参数	三星 + 高度表无源方式		双星 + 高度表 + 铷钟无源方式	
	闭环 Kalman 滤波	闭环 H 滤波	闭环 Kalman 滤波	闭环 H 滤波
航向角 / deg	0.003 84	0.000 43	0.105 64	0.000 75
东向速度 / (m/s)	0.65	0.57	0.86	0.77
位置 / m	11.3	12.7	14.6	14.7

从表1可以看出:1)在同一种北斗无源方式的静态组合下, H 滤波的姿态和速度精度(1)优于Kalman滤波,位置精度二者相当;2)由于北斗无源方式的不同,Kalman滤波的导航精度差异较大,而不同无源方式下的 H 滤波精度没有太大变化.以上结果说明闭环 H 滤波具有较好的滤波适应性,在不调整滤波参数的条件下可获得稳定的滤波值,而Kalman滤波受数据的影响较大.

跑车实验在西安城外的绕城高速公路上进行.跑车时,北斗接收机采用三星+高度表的无源方式.无源北斗位置、闭环Kalman滤波组合导航和闭环 H 滤波组合导航的轨迹如图2所示.图中还显示了放大的一段曲线.

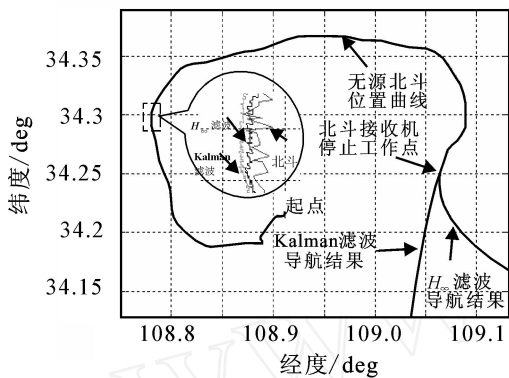


图2 组合导航和无源北斗位置轨迹

从图2看出,闭环 H 滤波比闭环Kalman滤波更接近于无源北斗,且曲线更光滑.另外,接收机停止工作后的导航曲线表明,没有无源北斗组合,导航系统的位置将很快发散.

以无源北斗的速度和位置为真值,统计闭环 H 滤波和闭环Kalman滤波的组合导航误差,结果如表2所示.

表2 无源北斗/SINS组合导航系统跑车实验误差

组合导航 滤波类型	速度方差(1)		位置方差(1)	
	东向 m/s	北向 m/s	经度 m	纬度 m
Kalman 滤波	1.04	3.15	11.9	12.8
闭环 H 滤波	0.97	3.06	7.4	10.0

从表2看出,闭环 H 滤波的导航精度略优于闭环Kalman滤波,表明在动态环境下闭环 H 滤波也可取得较好的滤波效果.对比文献[4,8]的 H 滤波静态仿真或动态纯数字仿真,本文结论是通过实际动态跑车获得的,因此更具参考价值.

5 结论

引入闭环反馈可以简化 H 滤波递推公式,更重要是在不改变 H 滤波鲁棒性的前提下,能提高滤波精度,从而拓宽了 H 滤波的应用范围.无源北

斗/SINS组合导航系统的静态定位和跑车实验表明,在系统噪声模型不能精确已知的环境下,闭环 H 滤波可取得比闭环Kalman滤波更好的效果,且对应用环境有更好的适应性.本文提出的闭环 H 滤波,为组合导航系统的设计提供了一种不依赖于对有色噪声精确建模的滤波器,使得组合导航系统的设计和实现更为清晰.

参考文献(References)

- [1] 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 X P, Zhang X K, Zhang L K. Comparison H robust filter and Kalman filter[J]. System Engineering and Electronics, 2003, 25(10): 1267-1269.)
- [2] 张明,施鼎汉. 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 M, Shi D H. H filter for uncertain parameter system: A criterion and design method based on algebraic Riccati inequality [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(5): 711-714.)
- [3] Rami S Mangoubi, Brent D Appleby, George C Verghese. Stochastic interpretation of H and robust estimation[C]. Proc of the 33th Conf on Decision and Control. Lake Buena Vista, 1994: 3943-3948.
- [4] 赵伟. 基于载波相位的GPS/惯性组合技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
(Zhao W. The study on GPS/inertial integrated technique based on carrier phase[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.)
- [5] 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 X K, Yuan J P. H filtering algorithm and its application GPS/SINS integrated navigation system[J]. Acta Aeronautica and Astronautica Sinica, 2001, 22(4): 366-368.)
- [6] 袁信,俞济洋,陈哲. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社, 1993: 183-185.
(Yuan X, Yu J Y, Chen Z. Navigation system [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993: 183-185.)
- [7] Kang G H, Liu J Y, Zhu Y H, et al. Realization of GPS/SST/SINS integrated navigation filter algorithm for ballistic missile [J]. J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 22(2): 115-118.
- [8] Zhao L, Chen Z. Study on theory analysis and application in navigation system for H adaptive filtering [J]. J of System Simulation, 2004, 16(5): 1024-1026.