

# 联合卡尔曼滤波及其在舰船综合 导航系统中的应用\*

周 哲

翁海娜 庄良杰

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系 150009) (天津航海仪器研究所)

**摘 要** 针对INS/GPS/CNS 舰船综合导航系统的特点,设计了用于该系统的联合卡尔曼滤波器。该联合卡尔曼滤波器具有全局最优性,其结构遵循信息分配原则,其算法改善了数值计算的稳定性和系统的容错性,并减少了信息传输量与计算量。理论分析及仿真结果表明,该联合滤波器能够满足系统精度和容错性的要求。

**关键词** 综合导航系统,联合卡尔曼滤波,信息分配原则

分类号 U 666. 11

## Federated Kalman Filtering and Its Application to Ship Integrated Navigation System

Zhou Zhe

Weng Haina, Zhuang Liangjie

(Harbin Institute of Technology) (Tianjin Navigation Instrument Institute)

**Abstract** Federated Kalman filter applied to INS/GPS/CNS integrated navigation systems is described with emphasis on the algorithm implementation issues and the numerical simulation results. The federated Kalman filter is globally optimal. Its partitioned estimation architecture is based theoretically on the information-sharing principles. The method can provide improvements in filter stability, fault tolerance and data throughput. Theoretic analysis and numerical simulation results have demonstrated the fine performance characteristics of the federated filter in terms of estimation accuracy and fault tolerance.

**Key words** integrated navigation system, federated Kalman filtering, information-sharing principle

### 1 引 言

舰船综合导航系统的任务是利用外部量测信息(如全球定位系统(GPS)提供的位置信息以及天文导航设备(CNS)提供的航向信息等),精确地估计出惯性导航系统(INS)的误差,并通过误差补偿,使INS提供连续、实时、高精度的位置、姿态及速度等信息,以保证舰船长期安全航行。综合导航系统实际上是完成INS/GPS/CNS多导航传感器的信息处理过程。以往常采用标准的卡尔曼滤波技术来解决初始标定问题,但由于集中式卡尔曼滤波器需要集中处理所有传感器的测量数据,因而计算量大,且不具

有容错性。

近年来,Carlson提出一种联合卡尔曼滤波算法,利用信息分配原则能够实现多传感器信息的最优综合,并使整个系统具有较好的容错能力<sup>[1]</sup>,从而获得整体上的最优性能。本文针对舰船综合导航系统的特点,给出一种联合卡尔曼滤波器的设计方法。

### 2 导航传感器的误差分析

舰船上装备的INS采用平台式结构,当以水平阻尼方式工作时,其误差方程为

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{\mathcal{R}}_{INS} \\ \delta \dot{\lambda}_{INS} \\ \delta \dot{K}_{INS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\Omega_{co} s \Phi \\ \Omega_g \Phi & 0 & 0 \\ \Omega_{ec} \Phi & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathcal{R}_{INS} \\ \delta \lambda_{INS} \\ \delta K_{INS} \end{bmatrix} +$$

\* 1999-07-19 收稿,1999-09-23 修回

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sec\varphi & 0 \\ 0 & -\operatorname{tg}\varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_e \\ \epsilon_n \\ \epsilon_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为载体所在处的纬度,  $\Omega$  为地球自转角速度,  $\delta K_{INS}$  为 INS 航向误差角,  $\delta\alpha_{NS}$  和  $\delta\lambda_{NS}$  分别为经纬度的误差,  $\epsilon_e, \epsilon_n$  和  $\epsilon_a$  为 INS 东向、北向和方位陀螺的漂移率。对于长期航行的惯导系统而言, 它们是主要误差源。通过试验建模可得到陀螺漂移模型为阶段常值  $\dot{\epsilon}$  加一阶高斯-马尔可夫过程  $\epsilon^{[2]}$ , 即  $\epsilon = \dot{\epsilon} + \epsilon_s$ 。

GPS 的定位功能是通过 GPS 卫星的观测来实现的。GPS 的输出误差在采样间隔超过 4min 时, 可认为是独立随机序列<sup>[3]</sup>。CNS 提供的航向信息来源于对天体的观测, 当采样间隔超过 4min 时, 也可认为其误差是不相关的。

### 3 联合卡尔曼滤波器设计

#### 3.1 联合卡尔曼滤波器结构

基于上述误差分析, 本文设计出由 9 个状态变量组成的综合导航系统联合卡尔曼滤波器, 该联合滤波器的结构如图 1 所示。

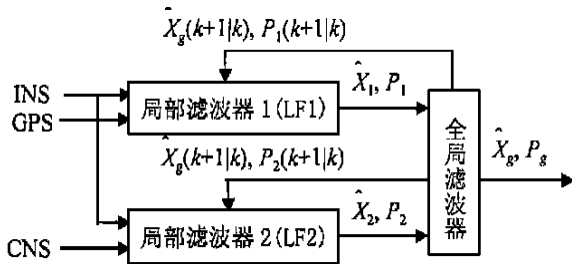


图 1 联合卡尔曼滤波器结构

综合惯性系统的全局状态变量选为

$$X_g = [\delta\alpha_{NS} \delta\lambda_{NS} \delta K_{INS} \epsilon_e \epsilon_n \epsilon_a \epsilon_e \epsilon_n \epsilon_a]$$

状态方程为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + GW(t) \quad (2)$$

其中,  $F(t)$  为  $9 \times 9$  时变系数矩阵, 由惯导系统误差方程(1)及陀螺漂移模型确定;  $W(t)$  为系统噪声, 是方差强度阵为  $Q$  的白噪声矢量;  $G$  为系统噪声阵。

INS 和 GPS 构成子系统 1, 取系统状态矢量  $X_1 = X_g$ ; INS 和 CNS 构成子系统 2, 取状态矢量  $X_2 = X_g$ 。它们的状态方程均与全局系统状态方程(2)相同。将其离散化, 相应的离散系统状态方程为

$$\begin{aligned} X_i(k) &= \Phi(k, k-1)X_i(k-1) + \\ &\Gamma(k, k-1)W(k-1), \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\Phi(k, k-1) = \Phi(k, k-1) = e^{A(k)T}$$

$$T = t_k - t_{k-1}$$

$$\Gamma(k, k-1)W(k-1) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k - \tau)GW(\tau)d\tau$$

离散系统的干扰协方差阵为

$$\begin{aligned} \Gamma(k, k-1)Q(k-1)\Gamma^T(k, k-1) &= \\ \int_{t_{k-1}}^{t_k} \Phi(t_k - \tau)GQG^T\Phi^T(t_k - \tau)d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

子系统 1 的观测值取 INS 与 GPS 的位置信息之差, 子系统 2 的观测量取 INS 输出的航向与天文设备输出航向信息之差, 量测周期均为 5min。量测方程为离散形式, 即

$$Z_i(k) = H_iX_i(k) + V_i(k), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

局部滤波器 1 和局部滤波器 2 将每步的滤波结果传递给全局滤波器, 全局滤波器完成信息的最优综合。每个滤波阶段完成后, 由全局滤波器将合成的全局估计  $\hat{X}_g$  及按“信息分配”原则形成的协方差的分配量, 向各局部滤波器进行信息反馈。这种联合卡尔曼滤波器结构的容错性较好。

#### 3.2 信息分配系数的确定及

联合卡尔曼滤波器算法

按信息分配原则选择信息分配系数  $\beta_i$  是整个联合卡尔曼滤波器中的一个关键环节, 通常选取实数  $0 < \beta < 1$ 。本文中  $\beta_i$  取为对角矩阵形式, 即

$$\begin{cases} \beta_1(k) = \operatorname{diag}(a_1, a_2, \dots, a_9) \\ a_i = \frac{P_1(k|k)_{ii}}{P_1(k|k)_{ii} + P_2(k|k)_{ii}} \\ \beta_2(k) = \operatorname{diag}(b_1, b_2, \dots, b_9) \\ b_i = \frac{P_2(k|k)_{ii}}{P_1(k|k)_{ii} + P_2(k|k)_{ii}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $P_1(k|k)_{ii}, P_2(k|k)_{ii}$  代表  $P_1(k|k), P_2(k|k)$  的第  $i$  行第  $i$  列元素。由式(6)可见,  $\beta_1(k) + \beta_2(k) = I$ , 满足信息守恒原则。据此, 本文提出如下算法。

全局滤波器在计算全局状态和估计方差的基础上, 增加了预测算法(时间更新), 即计算  $\hat{X}_g(k+1|k)$  和  $P_g(k+1|k)$ , 以便完成下一步局部滤波器的预测功能。具体算法如下

$$P_g^{-1}(k|k) = P_1^{-1}(k|k) + P_2^{-1}(k|k) \quad (7)$$

$$\hat{X}_g(k) = P_g(k|k)[P_1^{-1}(k|k)\hat{X}_1(k) + P_2^{-1}(k|k)\hat{X}_2(k)] \quad (8)$$

$$\hat{X}_g(k+1|k) = \Phi(k+1, k)\hat{X}_g(k|k) \quad (9)$$

$$P_g(k+1|k) =$$

$$\Phi(k+1, k)P_g(k|k)\Phi^T(k+1, k) +$$

$$\Gamma(k+1, k)Q(k)\Gamma^T(k+1, k) \quad (10)$$

为进行信息分配, 全局滤波器根据式(6)自动

计算信息分配系数, 并计算信息分配量

$$P_1(k+1|k) = \beta^{-1}(k) P_g(k+1|k) \quad (11)$$

$$P_2(k+1|k) = \beta^{-1}(k) P_g(k+1|k) \quad (12)$$

全局滤波器对各局部滤波器进行信息反馈, 将  $\hat{X}_g(k+1|k)$ ,  $P_1(k+1|k)$ ,  $P_2(k+1|k)$  传递给局部滤波器, 供局部滤波器下一步推算使用。此时信息的传输量较小。

通过这样选取信息分配系数及进行信息反馈, 使得局部滤波器 1 和局部滤波器 2 对  $P_g(k|k-1)$  中各行分别放大不同的倍数  $a_i$  和  $b_i$ 。从  $a_i$  和  $b_i$  的表达式 (6) 看出, 当局部滤波器对某个状态的估计方差减小时, 相应的  $a_i$  或  $b_i$  变小, 则对  $P_g(k|k-1)$  的放大倍数变大, 使局部滤波器下一步对该状态的估计方差增大。这样就不会出现因局部滤波器的方差阵过小而使全局滤波器无法对其求逆的情况, 从而保证了全局滤波器在数值计算上的稳定性。

由于局部滤波器的预测功能已由全局滤波器的上一步完成, 经全局滤波器对各局部滤波器的信息反馈后, 局部滤波器只需进行滤波运算, 因而该联合卡尔曼滤波器的总计算量较小。局部滤波器的滤波与全局滤波器的融合同步, 周期均为 5min, 具体滤

波算法如下

$$K_i(k) = P_i(k|k-1) H_i^T \times [H_i P_i(k|k-1) H_i^T + R_i(k)]^{-1} \quad (13)$$

$$P_i(k|k) = [I - K_i(k) H_i] P_i(k|k-1) \quad (14)$$

$$\hat{X}_i(k) = \hat{X}_g(k|k-1) + K_i(k) [Z_i(k) - H_i \hat{X}_g(k|k-1)] \quad (15)$$

## 4 仿真及结果分析

针对如上的系统描述及联合卡尔曼滤波算法, 本文对船舶停靠在码头时的综合导航系统进行了计算机仿真, 部分仿真结果如图 2 所示。图中的两条曲线分别代表 INS 的误差及联合滤波器对该量的估计值。仿真结果表明, 本文所设计的联合卡尔曼滤波器对系统各状态均能给出较好的估计, 能够完成综合导航任务。

在同样条件下, 本文还进行了集中式滤波器仿真, 联合滤波器对  $\delta R_s$  的估计值与集中滤波器对该值的估计值的差值极小, 为  $10^{-13}$  角秒。可见, 本文所设计的联合卡尔曼滤波器的估计精度与集中式滤波器是一致的。

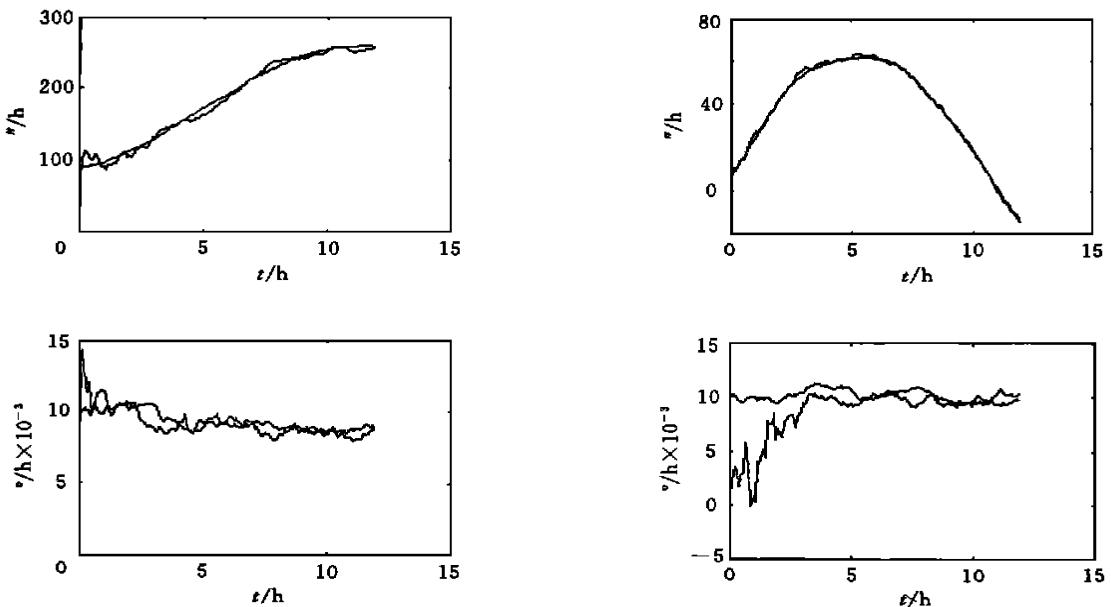


图 2 综合导航系统的仿真曲线

- (a) INS 的航向误差及估计值
- (b) INS 的纬度误差及估计值
- (c) 东向陀螺漂移及估计值
- (d) 方位陀螺漂移及估计值

所有引用的测试算法均采用二进制编码,串长取 32 位,群体规模取 100,选择方法为轮盘赌法,迭代次数为 500 代。SGA 的交叉、变异概率分别为 0.6 和 0.01;本文算法参数选为:  $T_0 = 300$ , 迭代次数为 100 代,  $\alpha = 0.9$ ,  $\mu = 100$ ,  $r = 100$ ,  $L_k = 15$ ,  $k_1 = k_2 = 1.0$ 。求解结果如表 1 所示。

表 1 几种算法的求解速度与性能对比

算 法	收敛到全局最优点的平均迭代数	收敛到局部极值点的次数
文献[3] 算法	331	4
文献[4] 算法	168	0
SGA	不收敛	
HEA	18	0

例 2 一 Job Shop, 有 5 台机床和 3 台机器人, 10 个 Job 类型共 45 道工序在车间内加工, 其批量分别为 5, 6, 4, 6, 4, 5, 7, 3, 5, 5, 各 Job 类型的加工要求与工序加工时间参见文献[5]。在此, 把 HEA 和文献[2, 5] 的 PN & HS、GATS 方法用于此问题的调度结果进行比较, 求解结果如表 2 所示。

表 2 几种算法的求解质量对比

	PN & HS	GATS	HEA
调度长度平均值	273	240	221
平均运行时间	10min	1.5min	46.2s
所用计算机	DEC 5 000/200	奔 166	奔 166

表 1 和表 2 所示结果表明, 无论是解决函数优化问题还是解决组合优化(Job Shop 调度) 问题, HEA 的求解速度、求解质量和稳定性都优于所引用的算法, 充分显示了其在解决优化问题时的优越性。

## 4 结 论

本文分析了几种算法的特点, 综合 SAA、ES 和 LS 各自的优点, 把 ES 的计算并行性、记忆功能和 LS 的快速搜索能力引入到 SAA 过程, 同时对一些控制参数进行了优化设置, 提出了混合的演化算法(HEA)。实验结果表明, HEA 从多方面不同程度地改进了算法的求解质量和速度, 充分说明了算法的有效性。

## 参 考 文 献

- 1 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 2 姜思杰. 基于 GA 与 TS 的最小平衡算法研究及其在 FMS 中应用. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1998
- 3 Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in GA. IEEE Trans on SMC, 1994, 24(4): 656~667
- 4 吴志远. 一种新的自适应遗传算法及其在多峰值函数优化中的应用. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 127~129
- 5 Lee D Y, Dicesare F. Scheduling FMS using Petri-net and heuristic search. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1994, 10(2): 123~132

## 作 者 简 介

何 霆 男, 1972 年生。1997 年毕业于哈尔滨工业大学, 现为该校现代生产技术中心博士研究生。研究方向为生产计划、调度与控制。

马玉林 男, 1937 年生。哈尔滨工业大学现代生产技术中心主任, 教授, 博士生导师。主要研究方向为 FMS 及其仿真技术等。

金 铮 女, 1975 年生。黑龙江省计算机总公司工程师。主要研究方向为计算机软、硬件以及决策支持系统等。

(上接第 503 页)

## 参 考 文 献

- 1 Carlson N A, Berarducci M P. Federated Kalman filter simulation results. Navigation, 1994, 41(3): 297~321
- 2 翁海娜, 庄良杰, 李滋刚, 等. 液浮陀螺的试验建模研究. 中国惯性技术学报, 1999, 32(2): 30~34
- 3 庄良杰, 韩福江, 刘飞, 等. GPS 信息在惯性导航和惯性测量系统中的应用. 中国惯性技术学报, 1994, 12(3): 11~15

## 作 者 简 介

周 哲 男, 1965 年生。哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士生。研究方向为数据融合方法及应用, 小波变换。

翁海娜 女, 1969 年生。1999 年在东南大学获博士学位, 现为天津航海仪器研究所科研人员。研究方向为建模, 数据处理, 最优估计。

庄良杰 男, 1945 年生。1966 年毕业于中山大学数学系, 现为天津航海仪器研究所研究员, 兼职博士生导师。主要从事惯导系统技术, 最优估计理论, 最优控制理论及应用的研究。