

# 基于模糊卡尔曼滤波器的航天测量船组合导航系统

赵海波<sup>1,2</sup>, 郭立红<sup>1</sup>, 宋佳丽<sup>3</sup>, 康长青<sup>1,2</sup>, 顾蕊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 长春税务学院计算机系, 吉林 长春 130117)

**摘要:** 针对航天测量船组合导航系统实际工作环境, 提出采用模糊卡尔曼滤波器, 将模糊控制作为一个数据平滑窗口与常规卡尔曼滤波器相结合, 利用测量数据中的残差序列、残差序列变化率和收敛因子等参数作为模糊控制输入, 解决了导航系统中量测噪声不满足零均值白噪声的问题; 对采用该算法的测量船组合导航系统进行了仿真实验, 得到与理论分析相吻合的结果并提高了导航数据的精度; 实验表明, 采用该滤波技术的测量船组合导航系统是可靠的。

**关键词:** 模糊控制; 卡尔曼滤波器; 组合导航; 航天测量船

## Combined Navigation System of Astronautic Measurement Ship Based for Fuzzy Kalman Filter

Zhao Haibo<sup>1,2</sup>, Guo Lihong<sup>1</sup>, Song Jiali<sup>3</sup>, Kang Changqing<sup>1,2</sup>, Gu Rui<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Department of computer, Changchun College of Taxation, Changchun 130117, China)

**Abstract:** Fuzzy Kalman filter is proposed. To resolve the problem that measurement noise is not a zero-mean, white noise with a Gaussian distribution, fuzzy control is combined with Kalman filter as a data-smooth unit and the information of residual, change rate of residual, converged factor and other parameters are used in fuzzy Kalman filter aiming at astronautic measurement ship's factual working environment. Computer simulation is implemented and gets the same results that coincide with theoretical, and navigation information's accuracy is improved. Experiment shows its feasibility and application.

**Key words:** fuzzy control; Kalman filter; combined navigation; astronautic measurement ship

### 0 引言

中国航天测量船是中国测控网的海上机动测量站, 担负着远程武器外弹道和航天器轨道测量的重要任务, 是我国海上监控的唯一手段。测量船上的设备以惯性导航系统提供的地平坐标系和测量姿态为基准, 将所有读目标的测量信息归算到统一的地平坐标系, 它的精度直接决定着测量的总精度, 但惯性导航系统存在位置误差和定向误差。远洋测量船上测量设备的测量精度是最重要的性能指标, 为使测量设备达到并保持精度指标, 必须对测量设备误差进行标定和校准, 以达到准确修正系统误差的目的。考虑到惯性导航系统和 GPS 具有很强的互补性, 通常组成组合导航系统来提高测量船的精度和可靠性<sup>[1]</sup>。

在组合导航系统中, 卡尔曼滤波技术得到广泛的应用。但是在实践应用中, 受各种客观因素的影响, 往往无法满足卡尔曼滤波技术的应用条件, 导致导航滤波器的精度降低甚至发散<sup>[2-3]</sup>。为了解决这一问题, 本文提出了将模糊控制理论应用在卡尔曼滤波器中, 研究模糊卡尔曼自适应算法, 使滤波器在观测值发生异常的时候有自适应能力<sup>[4-5]</sup>。

### 1 测量船组合导航系统的卡尔曼滤波数学模型

本文根据测量船的动力学方程建立如下的 INS/GPS 组合导航系统数学模型, 设测量船的纬度、纬度速度、纬度加速度、纬度加加速度和经度、经度速度、经度加速度、经度加加速度分别为  $\varphi, \varphi', \varphi'', \varphi'''$  和  $\lambda, \lambda', \lambda'', \lambda'''$ ,

测量船的动力学方程:

$$\begin{cases} \varphi_k = \varphi_{k-1} + \varphi'_{k-1} T + \varphi''_{k-1} \frac{T^2}{2} \\ \varphi'_k = \varphi'_{k-1} + \varphi''_{k-1} T \\ \varphi''_k = \varphi''_{k-1} + \varphi'''_{k-1} T \\ \lambda_k = \lambda_{k-1} + \lambda'_{k-1} T + \lambda''_{k-1} \frac{T^2}{2} \\ \lambda'_k = \lambda'_{k-1} + \lambda''_{k-1} T \\ \lambda''_k = \lambda''_{k-1} + \lambda'''_{k-1} T \end{cases} \quad (1)$$

对运动体的跟踪者来说,  $\varphi'''$  和  $\lambda'''$  是随机量, 此处用白噪声来描述之。

选择状态向量如下:

$$x = [\varphi \quad \varphi' \quad \varphi'' \quad \lambda \quad \lambda' \quad \lambda'']^T \quad (2)$$

则状态方程为:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + \Gamma w_{k-1} \quad (3)$$

收稿日期: 2006-05-05; 修回日期: 2006-06-08。

**作者简介:** 赵海波(1978-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事组合导航和计算机控制系统方向的研究。

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \\ 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} \quad (4)$$

量测方程为:

$$Z_k = Hx_k + v_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_k + v_k \quad (5)$$

其中  $Z_k = \begin{bmatrix} \varphi_{GPS} \\ \lambda_{GPS} \end{bmatrix}$ , 为 GPS 测量得到的测量船的经纬度。

卡尔曼滤波算法可以表示为:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k/k-1} = \Phi \hat{x}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q_{k-1} \\ P_k = P_{k/k-1} - K_k H_k P_{k/k-1} \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k [z_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}] \end{cases} \quad (6)$$

$\hat{x}_k$  为对系统状态向量  $x_k$  的估计,  $K_k$  为卡尔曼滤波增益。

在标准的卡尔曼滤波中, 对系统噪声和量测噪声有如下要求:

$$\left. \begin{aligned} E[w_k] &= 0, Cov[w_k, w_j] = E[w_k w_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\ E[v_k] &= 0, Cov[v_k, v_j] = E[v_k v_j^T] = R_k \delta_{kj} \\ Cov[w_k, v_j] &= E[w_k v_j^T] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

即系统噪声和量测噪声是零均值的高斯白噪声, 并且两者不相关<sup>[6]</sup>。

## 2 模糊卡尔曼滤波器的建立

建立组合导航系统准确的数学模型需要做大量的实验, 获得准确的系统噪声和量测噪声的统计特性很困难。同时受客观条件的影响, 在 GPS 中存在的大量误差源会使位置测量精度衰减。例如卫星发射信号通过对流层和电离层时传播速度会随机变化以及在接收器视线范围内的卫星数量与几何布局, 它们会随着 GPS 接收器的地理位置与一天内的不同时间而变化<sup>[7]</sup>。因此在实际的应用中量测噪声也无法满足卡尔曼滤波的条件即不满足公式 (7), 我们定义:

$S_k = Z_k - \hat{H}x_{k/k-1}$ , 其中  $S_k$  为残差序列<sup>[8]</sup>。

残差序列方差的理论值为  $J_r$ , 则:

$$J_r = H(\Phi P_{k-1} \Phi^T + \Gamma_{k-1} Q \Gamma^T) H^T + R_{k-1} \quad (8)$$

残差序列方差的实测值为  $L_r$ , 则:

$$L_r = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i r_i^T \quad (9)$$

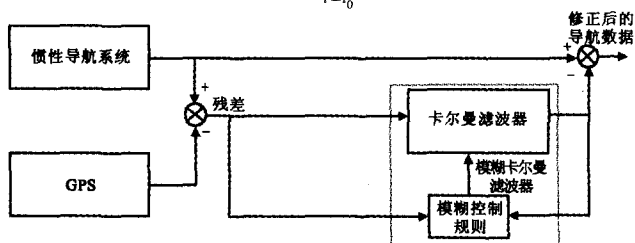


图1 模糊卡尔曼滤波器系统结构简图

观测噪声方差与量测值及残差序列密切相关, 在最优情况下, 残差序列的均值接近于零。当观测噪声方差非常大时, 即  $J_r$  与  $L_r$  的之间的值相差越来越大的时候, 量测值的可信度降低, 甚至导致滤波器发散。因此, 我们把模糊控制理论引入到滤波器中, 利用观测数据带来的信息, 不断的在线估计和修正模型和噪声统计特性, 以提高导航精度。结构图如图 1 所示。

在卡尔曼滤波器中加入模糊控制器, 就是基于模糊规则, 利用蕴涵于模糊控制器中的专家系统, 提高滤波器的稳定性和自适应能力<sup>[9-10]</sup>。本文所要设计的滤波器具有当 GPS 信息偏差过大时能够调整滤波器的输出, 使在下一个滤波周期内的参数不影响的功能并, 采用二级卡尔曼滤波器<sup>[11]</sup>。第一级滤波器的模糊输入是残差序列  $S_k$ , 残差序列的变化率  $\dot{S}_k$  和收敛因子  $\zeta$ 。  $\dot{S}_k$  通过最小二乘法拟合的方法获得, 收敛因子  $\zeta$  的计算公式如下:

$$\zeta_k = \begin{cases} 1 & \text{If } (\zeta_{k-1} = 0 \text{ and } var < V \text{ and } a < A) \text{ or} \\ 0 & (\zeta_{k-1} \neq 0 \text{ and } var < V \text{ and } a < A \text{ and } res < R) \\ \min((var^{1/3} * C) - 0.9, 1.0) & \text{other wise} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $var$  是位置方差,  $a$  是测量船在东-北-天坐标系下每个坐标轴上的加速度。第一级滤波器的模糊输出是卡尔曼滤波器的滤波增益。第一级滤波器的模糊控制规则如表 1 (模糊控制规则的另外一部分与已经给出的对称, 故省略)。残差序列  $S_k$  论域是  $\{LN, MN, SN, ZE, SP, MP, LP\}$ ,  $\dot{S}_k$  的论域是  $\{NE, NN\}$  分别代表负和非负;  $\zeta$  的论域是  $\{ZE, NZ\}$ , 分别代表零和非零 (隶属度函数图略)。

表 1 第一级滤波器的模糊控制规则

模糊输入			模糊输出
$a$	$S_k$	$\dot{S}_k$	gain
ZERO	ALL	ALL	ZERO
SM	ZERO	ZERO	ZERO
SM	NEG, POS	ZERO	SM
SM	POS	POS	MED
SM	NEG, POS	POS	ZERO
SM	ZERO, POS	NEG	ZERO
SM	NEG	NEG	MED
LA	ZERO	ZERO	SM
LA	NEG, POS	ZERO	MED
LA	POS	POS	LA
LA	ZERO	POS	SM
LA	NEG	POS	ZERO
LA	POS	NEG	ZERO
LA	ZERO	NEG	SM
LA	NEG	NEG	LA

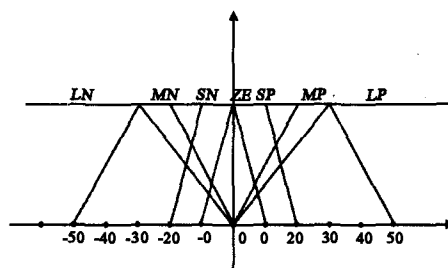


图2 残差序列的隶属度函数

第二级滤波器的输入是残差序列  $S_k$ , 残差序列的变化率  $\dot{S}_k$  和在东-北-天坐标系下每个坐标轴上的加速度  $a$ 。

我们定义滞后残差

$$lag = \frac{S_k}{v} = \frac{\dot{S}_k}{a} \quad (10)$$

则滞后估值

$$\hat{l}_k = \hat{l}_{k-1} + \sum_{i=axis} \frac{gain_i^2 * lag}{\sum_{j=axis} gain_j} \quad (11)$$

其中  $gain_i$  是第二级滤波器的输出。第二级滤波器的模糊控制规则如表 2 所示。

表 2 第二级滤波器的模糊控制规则

模糊输入			模糊输出
$S_k$	$\dot{S}_k$	$\zeta_k$	$K_k$
LN	NE	ZE	SS
LN	NE	NZ	MS
LN	NN	ZE	SL
LN	NN	NZ	MM
MN	NE	ZE	SS
MN	NE	NZ	MS
MN	NN	ZE	SL
MN	NN	NZ	MM
SN	NE	ZE	MM
SN	NE	NZ	SS
SN	NN	ZE	ML
SN	NN	NZ	SL
ZE	NE, NN	NZ, ZE	ML

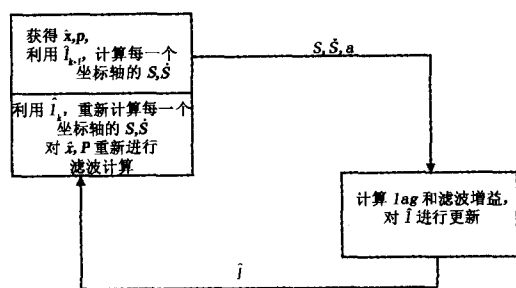


图 3 模糊卡尔曼滤波器滤波

第二级滤波器利用第一级滤波器的参数计算滞后估值, 计算后的滞后估值重新作为参数来对调整第一级滤波器的输入, 得到经过更新的卡尔曼滤波增益和公式 (6) 其他的参数。该过程可以用图 3 表示。

反模糊化的方法采用重心法, 它本质上是通常的加权平均思想, 只是其加权系数取对应的元素的隶属度而已。它的特点在于全面考虑模糊量的有关信息, 同时执行起来也比较容易。计算公式如式 (12):

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n u(u_i) \times u_i}{\sum_{i=1}^n u(u_i)} \quad (12)$$

式中,  $u$  表示计算出的精确值,  $u_i (u_i)$  表示隶属函数,  $u_i$  表示模糊集合的元素。

### 3 仿真实验

仿真对象是航速作机动变化的舰艇。初始条件为: 量测噪声; GPS 位置数据加入 1 m 的误差, 速度数据加入 1 m/s 的误差和 0.04 s 的时间滞后, 当速度发生较大的变化时在经度中加入 5 m, 纬度中加入 5 m 的误差。

系统噪声: 陀螺常值漂移为  $0.01^\circ/h$ , 随机漂移为  $0.005^\circ/h$ , 加速度计噪声为  $1.0 \times 10^{-5} g$ ; 陀螺的一阶马尔科夫项的时间常数是 60s, 姿态角初始值是  $1^\circ$ , 滤波周期是 1 s。则:

$$Q = diag [1.74 \times 10^{-6} \quad 1.0 \times 10^{-6} \quad 1.0 \times 10^{-6} \quad 1.74 \times 10^{-6} \quad 1.0 \times 10^{-6} \quad 1.0 \times 10^{-6}]$$

$$R = diag [1.0 \times 10^{-6} \quad 1.0 \times 10^{-6}]$$

$$P_0 = diag [1.0 \times 10^{-3} \quad 1.0 \times 10^{-3} \quad 1.0 \times 10^{-3} \quad 1.0 \times 10^{-3} \quad 1.0 \times 10^{-3} \quad 1.0 \times 10^{-3}]$$

$$x_0 = [38 \quad 0 \quad 0 \quad 120 \quad 0 \quad 0]^T$$

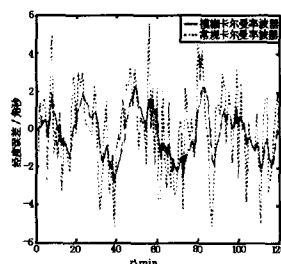


图 4 经度误差曲线图

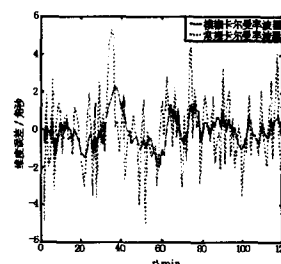


图 5 纬度误差曲线图

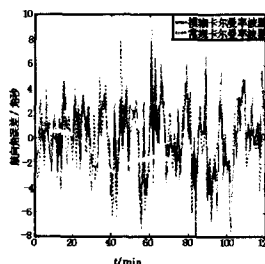


图 6 航向误差曲线图

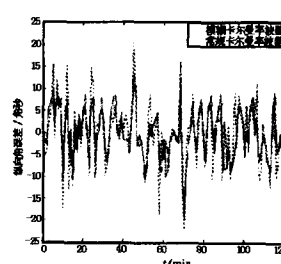


图 7 纵摇误差曲线图

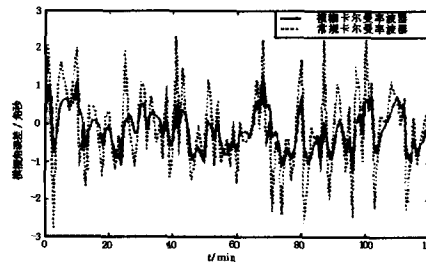


图 8 横摇误差曲线图

从图 4、图 5、图 6、图 7、图 8 可以看出, 当量测数据出现异常时, 模糊卡尔曼滤波能有效的减小各参数的误差, 使测量船能够得到精确的导航信息。

### 4 结论

本文以模糊控制为基本方法, 研究了应用于测量船组合导航系统的模糊卡尔曼滤波器, 实验结果表明, (下转第 1218 页)

其信息处理软件可以分解为几个独立的任务，其中数据采集中断是 HWI（硬中断）类型的任务，这个硬中断通过调用一个软中断模块对信号数据进行采集，其余模块是 SWI（软中断）类型的任务<sup>[4]</sup>。初始化任务完成对 DSP 的初始设定后就删除；当数据来临，由硬件中断调用软件中断进行数据采集，DSP 接收数据并进行后续的数据处理任务，下面是主动通道软件系统的执行流程，如图 3 所示。

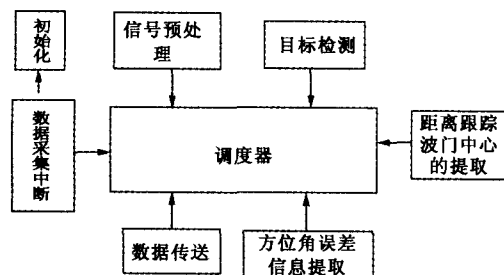


图 3 主动通道软件流程框图

#### 4 DSP/BIOS 操作系统使用中要注意的问题

尽管用 DSP/BIOS 开发 DSP 应用程序有诸多的优越性。但是在 DSP 无疑会增加系统的开销，采用 DSP/BIOS 进行开发时，需要注意一些问题。

(1) 内核的裁剪。嵌入式产品的可用资源比较少，所以它的内核相对嵌入式系统来说就显得有点大，需要进行剪裁到可利用的大小。

(2) 优先级的确定。在多线程当中，一定要注意正确设置线程的优先级。例如，接收线程的优先级要比发送线程的优先级高，以确保数据的不丢失。

(3) 长任务的分割。所谓长任务就是指整个任务的执行时间较长，超出了 RTOS 中其它某一个或某几个任务的实时性要求容限，而对整个 RTOS 的实时性构成威胁的那些任务，

解决“长”任务问题最有效的途径是进行任务分割。所谓任务分割指将影响系统实时性的“长”任务分割成若干个小任务。这样单个任务的执行时间变短，系统的任务级响应时间变短，实时性提高。

(4) 最后，当我们调试好程序后，把一些调试用的 DSP/BIOS 对象，如 LOG，STS 等只是为了调试方便用到的模块去掉，因为程序实际运行时，是不需要这些模块的。

#### 5 结论

本系统应用程序中存在一个 HWI 硬件中断（用于调用数据采集中断），并在该硬件中断中启动一个 SWI 软件中断（数据采集中断）。本系统中硬件中断出现的周期为  $a\mu s$ ，即出现频率为  $1/a$  兆次/s。在 TMS320C6713 平台上硬件中断的进入和退出至少需要  $88+82=170$  个指令周期，SWI 软件中断的启动至少需要 98 个指令周期，而且 PIP 管道操作需要 425 个指令周期。主动通道 DSP 需要有一个硬件中断、6 个软件中断，各个线程通过数据管道进行数据交换。这样每秒 DSP/BIOS 内核大约要消耗  $[170+(98+452)\times 6]\times 10^6/a$  个指令周期，在 1600MIPS 的 TMS320C6713 上运行程序，相当于 CPU 负载为  $[170+(98+452)\times 6]/1600a$ ，分析结果表明 DSP/BIOS 内核消耗 CPU 负载在 0.5% 以下，在 DSP/BIOS 实时操作系统在系统中的应用能够满足系统的设计要求。

#### 参考文献：

- [1] 彭启琮，管庆. DSP 集成开发环境——CCS 及 DSP/BIOS 的原理与应用 [M]. 北京：电子工业出版社，2004.
- [2] 李进. 实时操作系统 DSP/BIOS 在 DSP 在开发中的应用 [J]. 农机化研究，2003，10 (4)：122-123.
- [3] 任丽香，马淑芬. TMS3200C6000 系列 DSP 的原理与应用 [M]. 北京：电子工业出版社，2000.
- [4] 邓怀东，杨万海. 实时操作系统在探地雷达信号处理中的应用 [J]. 现代电子技术，2004，(8)：75-76.

(上接第 1167 页)

模糊控制能达到数据平滑的作用，在观测的同时实时估计噪声并调整相关的参数，从而提高了组合导航系统滤波器的精度。

#### 参考文献：

- [1] 高宪军，翟林培. GPS/INS 组合导航系统的研究 [J]. 光学精密工程，2004，12 (2)：18-22.
- [2] 卞鸿巍，金志华，田蔚风. 组合导航智能信息融合自适应滤波算法分析 [J]. 系统工程与电子技术，2004，26 (10)：1449-1454.
- [3] 程莉，颜国正，颜德田. 水面多传感器组合导航系统技术研究 [J]. 光学精密工程，2001，9 (4)：348-352.
- [4] 马野，王孝通，付建国. 基于模糊卡尔曼滤波量测噪声自适应校正的方法研究 [J]. 中国惯性技术学报，2005，13 (2)：24-26.
- [5] 刘钧圣，朱文彪. 一种模糊自适应 INS/GPS 组合导航方法 [J]. 现代防御，2005，33 (5)：25-30.

- [6] 郭立红，朱伟，李岩. 基于卡尔曼滤波技术解算惯导的水平偏差 [J]. 光学精密工程，2003，11 (4)：379-383.
- [7] 白宇骏，徐晓苏，丁敏. 基于低成本组合导航定位系统的新融合滤波算法 [J]. 中国惯性技术学报，2002，10 (6)：18-22.
- [8] 徐田来，游文虎，崔平远. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的 INS/GPS 组合导航系统算法研究 [J]. 宇航学报，2005，26 (5)：571-575.
- [9] 曹群，周兆英，罗晓宁，等. 功率超声系统负载的检测及模糊控制 [J]. 光学精密工程，2002，10 (2)：135-138.
- [10] Yager R R, Filev D P, Sadeghi T. Analysis of flexible structured fuzzy logic controllers [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, 1994, 24 (7)：1035-1044.
- [11] Swanson S R. A fuzzy navigational state estimator for GPS/INS integration [A]. IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium [C]. Palm Springs, CA, UNITED STATES, 1998, 541-548.