

模糊自适应无迹卡尔曼滤波方法用于天文导航

张迎春, 李璟璟, 吴丽娜, 李化义

(哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 150001 哈尔滨, hitsat509@163.com)

摘要: 为克服航天器自主天文导航中不确定测量噪声对导航精度的影响,提出了一种基于模糊推理的自适应无迹卡尔曼滤波(FUKF)方法.该方法根据滤波过程中实际测量残差方差与理论残差方差的比值,将系统滤波过程分为普通模式和自适应模式.分别对两种模式建立模糊隶属度函数,应用模糊推理规则,得到自适应修正因子,对系统的测量噪声方差阵进行实时修正,使其跟踪实际测量噪声的变化.当系统受到不确定环境噪声影响时,该滤波算法仍然有效收敛.将该方法应用于直接敏感地平的航天器自主天文导航中,不同测量噪声水平下的仿真结果表明,该算法对不确定的测量噪声具有较强的自适应能力,保证了导航信息的输出精度.

关键词: 模糊推理系统;自适应滤波;无迹卡尔曼滤波;天文导航

中图分类号: V448.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)01-0012-05

Application of fuzzy adaptive unscented Kalman filter in spacecraft celestial navigation

ZHANG Ying-chun, LI Jing-jing, WU Li-na, LI Hua-yi

(Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, hitsat509@163.com)

Abstract: To solve the problem of unscented Kalman filter(UKF) filtering under uncertain measurement noises during spacecraft autonomous celestial navigation, an adaptive UKF algorithm based on fuzzy logic is presented. According to the ratio between the actual residual and filter residual, the filter process is divided into two modes: normal mode and adaptive mode. The fuzzy membership functions are established separately to the two modes. Through fuzzy inference rule, the adaptive revise factor is obtained to real-time revise the measurement noise covariance so that the actual noise covariance is tracked. Accordingly, the filter could converge effectively even the measurements are suffered from uncertain noises. The fuzzy adaptive UKF algorithm is applied in directly sensing horizon celestial navigation system, and simulation results under different noise levels show that the algorithm is adaptive to uncertain measurement noises.

Key words: fuzzy inference system; adaptive filtering; UKF; celestial navigation

在天文自主导航系统中,利用星敏感器和地平仪直接敏感地平的方法得到越来越广泛的研究.利用该方法建立观测方程,结合航天器轨道动力学模型,通过扩展卡尔曼滤波或 Unscented 卡尔曼滤波(UKF)的方法,即可得到位置和速度的

估计值.由于估计精度高,不需要计算雅克比矩阵,UKF 方法是目前较为流行的状态估计方法^[1].然而,该方法要求准确已知系统噪声和测量噪声特性.对于在轨航天器,由于受到太阳风、空间高能粒子、磁暴等复杂空间环境的影响,往往无法准确地确定测量噪声.因此,研究自适应的滤波算法,成为天文导航需要解决的问题之一.

针对这一问题,文献[2-3]引入模糊自适应方法.其基本思想是:在滤波过程中,利用模糊推理系统,动态调整测量噪声协方差阵的权值,使残差协方差的实际值与理论值相一致.这种方法较

收稿日期: 2010-12-20.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA702101);
微小型航天器技术国防重点学科实验室开放基金
(HIT. KLOF. 2009092).

作者简介: 张迎春(1961—),男,教授,博士生导师.
李璟璟(1982—),男,博士研究生.

好地解决了测量发生跳变以及测量噪声方差较小时的自适应滤波. 然而, 当实际噪声水平较高时, 由此导致的残差的协方差的实际值与理论值的比值远大于 1. 在这种情况下, 难以在比值 1 附近划定隶属度函数.

本文将滤波模式划分为普通模式和自适应模式, 分别建立两者的隶属度函数. 在普通模式下的自适应调节, 可以提高估计精度, 加速收敛过程; 在自适应模式下的调节, 可以使滤波器具有适应不同噪声水平的能力. 采用这种方法的系统极大地方便了模糊参数的调整, 易于工程实现, 对于不同强度的测量噪声具有较强的自适应能力.

1 模糊自适应 UKF 算法

1.1 常规 UKF 方法

UKF 方法最早由 Julier^[4-5]等提出, 该方法通过 Unscented 变换设计广义状态点, 并利用广义状态点对系统状态的概率分布进行近似, 避免了复杂的雅可比矩阵的求取, 提高了滤波精度. 对于非线性系统:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k. \end{aligned}$$

其中, 状态向量 $\mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^L$, 输入向量 $\mathbf{u}_k \in \mathbf{R}^n$, 输出向量 $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^M$, 过程噪声 $\mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k)$, 测量噪声 $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k)$, 且 $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{v}_k$ 不相关. 常规 UKF 算法如下.

Step 1. 对状态变量 $\mathbf{x}_k$ 、均值 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 、方差 $\hat{\mathbf{P}}_{k-1}$ 进行 Unscented 变换:

$$\begin{aligned} \chi_{i,k-1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, i = 0; \\ \chi_{i,k-1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + (\sqrt{(L+\lambda)\hat{\mathbf{P}}_{k-1}})_i, i = 1, \dots, L; \\ \chi_{i,k-1} &= \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - (\sqrt{(L+\lambda)\hat{\mathbf{P}}_{k-1}})_{i-L}, i = L+1, \dots, 2L. \end{aligned}$$

其中 λ 为可调节的尺度参数.

Step 2. 预测过程:

$$\begin{aligned} \chi_{i,k/k-1} &= f(\chi_{i,k-1}), \\ \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i \chi_{i,k/k-1}, \\ \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i (\chi_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})(\chi_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})^T + \mathbf{Q}_k, \\ \chi_{i,k/k-1}^* &= [\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \sqrt{(L+\lambda)\hat{\mathbf{P}}_{k/k-1}} \quad \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \sqrt{(L+\lambda)\hat{\mathbf{P}}_{k/k-1}}], \\ Y_{i,k/k-1} &= g(\chi_{i,k/k-1}^*), \\ \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i^* Y_{i,k/k-1}. \end{aligned}$$

其中, W_i 和 W_i^* 分别为计算 $\mathbf{y}_k$ 的均值和方差所用的加权.

Step 3. 更新过程:

$$\hat{\mathbf{P}}_{yy} = \sum_{i=0}^{2L} W_i (Y_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1})(Y_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1})^T + \mathbf{R}_k, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{xy} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i (\chi_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})(\chi_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1})^T, \\ \mathbf{K}_k &= \hat{\mathbf{P}}_{xy} \hat{\mathbf{P}}_{yy}^{-1}, \\ \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1}), \\ \hat{\mathbf{P}}_k &= \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} - \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{P}}_{xy} \mathbf{K}_k^T. \end{aligned}$$

1.2 模糊自适应滤波方法

在 UKF 滤波过程中, 定义系统新息为

$$\boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1},$$

则系统实际残差方差阵为

$$\bar{\mathbf{C}}_k = \frac{1}{M-1} \sum_{i=k-M+1}^k \boldsymbol{\eta}_i \boldsymbol{\eta}_i^T.$$

其中 M 为所选取的平滑窗口. 根据式(1), 系统理论残差方差阵为 $\hat{\mathbf{P}}_{yy}$, 定义两者的比值 α_k 为

$$\alpha_k = \text{tr}(\bar{\mathbf{C}}_k) / \text{tr}(\hat{\mathbf{P}}_{yy}). \quad (2)$$

当系统噪声统计特性准确时, 残差应为零均值高斯白噪声序列, 残差方差实际值与理论值的比值 α_k 应在 1 附近^[6]. 当系统测量噪声的实际值与给定值不一致时, α_k 将偏离 1, 为了使滤波稳定, 可通过调节 $\mathbf{R}_k$ 对理论残差方差阵进行调整:

$$\hat{\mathbf{P}}_{yy} = \sum_{i=0}^{2L} W_i (Y_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1})(Y_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1})^T + \varepsilon_k \mathbf{R}_k.$$

其中: ε_k 为调节因子, 当系统测量噪声实际值大于给定值时, $\alpha_k > 1$, 此时可增大 ε_k , 使 α_k 回到 1 附近; 当系统测量噪声实际值小于给定值时, $\alpha_k < 1$, 此时可减小 ε_k .

以 α_k 作为模糊推理系统的输入, ε_k 为其输出, 以 1 为参考, 设 S 表示模糊集合“小”, M 表示基本等于 1, L 表示模糊集合“大”, 可建立如下的模糊推理规则:

- 1) 如果 $\alpha_k \in S$, 那么 $\varepsilon_k \in S$;
- 2) 如果 $\alpha_k \in M$, 那么 $\varepsilon_k \in M$;
- 3) 如果 $\alpha_k \in L$, 那么 $\varepsilon_k \in L$.

通过该方法得到的模糊自适应 UKF 滤波器, 能够克服小范围内不确定测量噪声的干扰. 但是, 在实际中, 测量噪声的幅值变化往往在一个较大的范围内, 当测量噪声水平变化较大时, 以 $\alpha = 1$ 为参考建立的模糊集合不能很好地描述系统的属性. 由式(2)可知, $\alpha_k \in (0, +\infty)$, 此时, 按照模糊描述, L 的范围将远大于 S 和 M , 其后果是难以建立合适的模糊推理规则, 模糊参数难以调整, 不利于工程应用. 为了进一步解决这一问

题,引入门限值 γ ,以此门限值将 α_k 的取值区间划分为普通滤波模式($\alpha_k \in (0, \gamma)$)以及自适应滤波模式($\alpha_k \in (\gamma, +\infty)$),通过对两个区间分别引入模糊推理系统进行自适应调节.普通滤波模式的调节,可以提高导航信息估计精度,加速收敛过程;自适应模式下的调节,意味着测量噪声发生了明显的变化,通过此种方式的调节,克服不确定性测量噪声的影响,保证滤波估计稳定性.

2 直接敏感地平天文导航系统模型

2.1 航天器轨道动力学模型

在 J2000.0 地心赤道坐标系下,建立卫星自主导航系统模型^[7]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ -\mu \frac{x}{r^3} \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 1.5 \right) \right] + \Delta F_x \\ -\mu \frac{y}{r^3} \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 1.5 \right) \right] + \Delta F_y \\ -\mu \frac{z}{r^3} \left[1 - J_2 \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 \left(7.5 \frac{z^2}{r^2} - 4.5 \right) \right] + \Delta F_z \end{Bmatrix} + \mathbf{w}.$$

(3)

其中, $\mathbf{x} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z]^T$,分别为卫星在 3 个坐标轴上的位置和速度, R_e 为地球半径, μ 为地心引力常数, J_2 为地球引力二阶带谐项系数, $\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta F_z$ 为地球非球形摄动的高阶摄动项和日、月摄动以及太阳光压摄动和大气摄动等其他摄动力影响.

2.2 直接敏感地平观测模型

直接敏感地平的自主导航方法技术成熟、系统稳定,能够提供连续的观测信息,是一种常用的天文导航方案.该方法的基本原理^[7]如图 1,航天器通过地平仪获得地心方向矢量信息,通过星敏器获得星光方向的矢量,进而可获得星光角距 α .

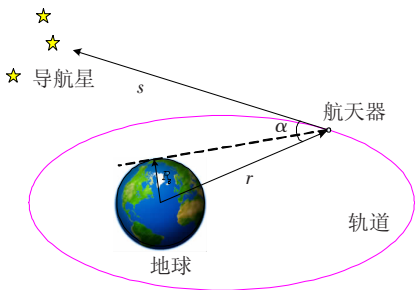


图 1 直接敏感地平导航方案

采用星光角距 α 作为观测量,可建立观测方程:

$$\mathbf{y}_k = \alpha + \zeta + v_a = \arccos\left(-\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}}{r}\right) + \zeta + v_a. \quad (4)$$

其中: $\mathbf{r}$ 是航天器在地心惯性坐标系中的位置矢量,由地平敏感器获得; $\mathbf{s}$ 是导航星星光方向的单位矢量,由星敏器识别; ζ 为测量方程的残差; v_a 为测量噪声,该噪声的实际统计特性受到空间不确定因素的影响,导致导航信息估计产生较大的误差甚至发散.

3 仿真验证

3.1 自主导航系统仿真环境

选取仿真场景^[8]为:半长轴 $a = 7\,136.635$,偏心率 $e = 0.001\,809$,轨道倾角 $i = 65^\circ$,升交点赤经 $\Omega = 30^\circ$,近地点角距 $\omega = 30^\circ$,星敏传感器的视场为 $20^\circ \times 20^\circ$,星敏传感器精度 $3''$,红外地平仪精度为 0.02° ,导航星选用均匀分布在天球上的 40 颗星.假设系统的测量噪声先验方差阵的标准差为 $R_p = 6.32 \times 10^{-4}$,仿真中取 $M = 20$.

3.2 模糊推理系统设计

模糊逻辑系统的设计一般分为 3 个步骤:模糊化过程、模糊规则生成过程、反模糊化过程.将精确量转变为模糊量的过程称为模糊化^[9],经过模糊化后,输入变量映射为 0 到 1 之间的值,进而转化为由隶属度函数表示的模糊集.对于前述自主天文导航系统,依据正常情况下实际残差协方差与理论残差协方差的比值,设定门限值 $\gamma \in (2, 5)$,将系统划分为 2 个不同的状态模式,即普通模式和自适应模式.对两种模式的输入量 α_k 分别进行模糊化,设计模糊隶属度函数,并按照模糊推理规则 1) ~ 3) 建立模糊自适应推理系统,系统输出即为自适应修正因子 ε_k ,用于对测量噪声方差阵的实时修正.反模糊化又称清晰化,即把模糊量转变为精确量的过程.反模糊化有多种实现方法,常用的有重心法、推理法等.在仿真中,模糊推理可借助于 MATLAB 自带的模糊控制推理工具箱^[10],方便地实现模糊推理过程.

3.3 自主导航系统仿真验证

对于方程(3)、(4)组成的自主导航系统,当系统噪声统计特性精确已知时,UKF 是一种较为理想的滤波方法.然而,在实际系统中,系统建模误差、先验噪声信息估计不足以及空间环境干扰都可引起观测方程中 v_a 的变化.单纯采用 UKF 方法很容易使估计过程出现较大的偏差.模糊自适应调整因子的引入,使 UKF 滤波过程中的噪声方差能够实时修正,从而达到对不确定测量噪声自适应的目的.

的. 分别在理想情况下和存在不确定测量噪声影响的情况下进行仿真. 在理想情况下, 假设测量噪声先验统计信息较为精确, 能够准确地描述实际噪声特性, 仿真的目的是为了验证模糊自适应 UKF 方法的精度; 在不确定噪声环境影响下, 测量噪声先验信息不能准确地反映实际噪声统计特性, 仿真的目的是为了验证自适应方法的有效性.

3.3.1 系统噪声统计特性准确情况下仿真比较

当系统的先验噪声统计特性准确时, 实际残差方差阵与理论残差方差阵的比值 α_k 应在 1 左右, 此时滤波器工作在普通滤波模式. 模糊自适应调节的作用, 是使 α_k 趋向于 1, 从而提高滤波器的估计精度, 抑制滤波初始阶段的发散. 分别采用 UKF 和模糊自适应 UKF 滤波算法进行自主导航解算, 图 2、3 分别给出了估计误差 Monte Carlo 仿真结果.

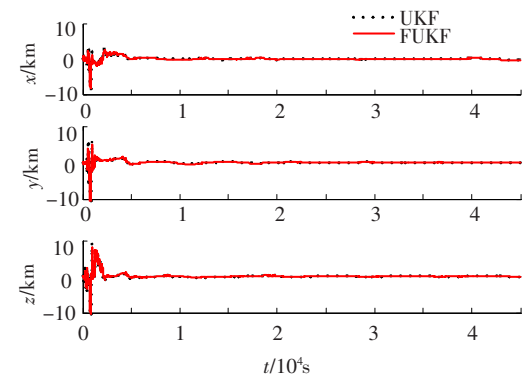


图 2 位置估计误差曲线

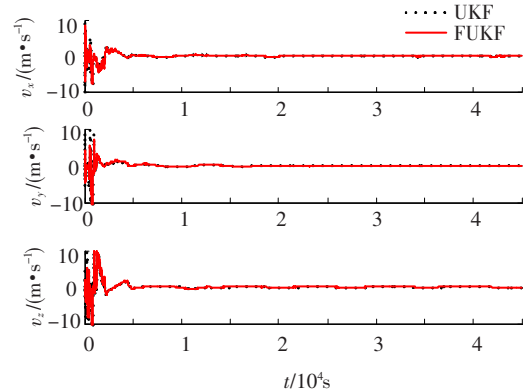


图 3 速度估计误差曲线

由图 2、3 可见, 两种滤波方法的估计误差都能够较好地趋于收敛. 在滤波器的收敛阶段, FUKF 方法由于模糊自适应调节作用, 其幅值略小于 UKF 方法. 经计算, 两种方法位置和速度均方根误差 (RMSE) 值如表 1 所示.

表 1 均方根误差 (RMSE)

方法	x/m	y/m	z/m	$v_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_z/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	t/s
UKF	161.52	117.42	202.56	0.15	0.09	0.14	6.8
FUKF	153.69	109.65	197.74	0.15	0.08	0.13	12.6

由表 1 可见, FUKF 方法在精度上略优于 UKF 方法, 这是因为在普通模式下的模糊自适应调节作用, 将残差方差实际值与理论值的比值始终拉向 1. 但是, 模糊推理的引入增加了计算量, 因而 FUKF 性能的提高是以牺牲计算时间为代价的.

3.3.2 不确定噪声影响下的仿真比较

由于航天器面临的空间环境复杂多变, 实际测量噪声统计特性与先验噪声统计特性往往有较大的偏差, 实际残差方差阵与理论残差方差阵的比值 α_k 已经远大于 1, 此时滤波器工作在自适应滤波模式. 模糊自适应的调节作用, 本质上依然是依据模糊律, 使 α_k 趋向于 1, 从而达到克服不确定噪声干扰, 正常输出导航信息的目的. 考虑实际测量噪声方差 $R_t = NR_p$, 其中, $1 \leq N \leq 600$, 以噪声水平 N 为横坐标, 分别采用 UKF 和 FUKF 滤波算法进行自主导航解算, 给出 3 个轴位置和速度的均方根误差随噪声水平的变化情况如图 4~9.

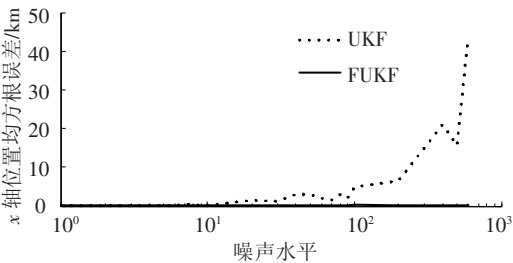


图 4 x 轴位置均方根误差曲线

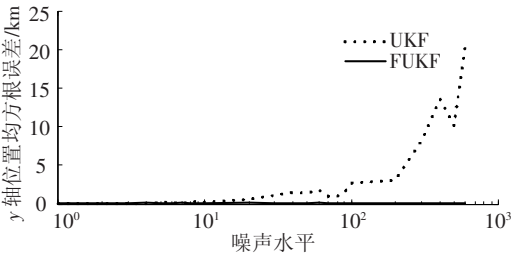


图 5 y 轴位置均方根误差曲线

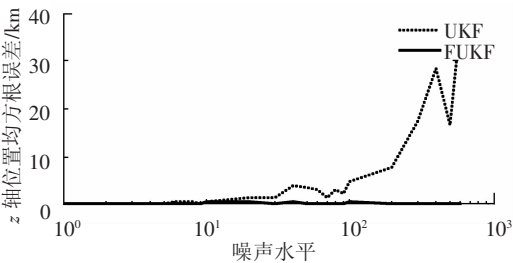


图 6 z 轴位置均方根误差曲线

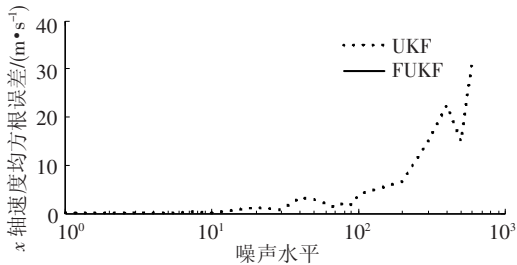


图 7 x 轴速度均方根误差曲线

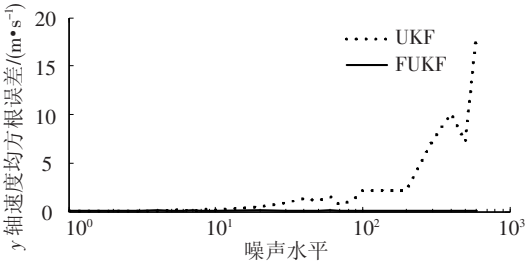


图 8 y 轴速度均方根误差曲线

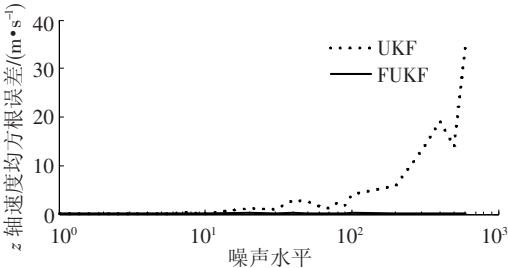


图 9 z 轴速度均方根误差曲线

可见,当噪声水平 $1 \leq N \leq 10$ 时,UKF 估计并未出现明显的误差,此时 UKF 适应了噪声水平的小范围变化;随着噪声水平的提高,当 $10 \leq N \leq 100$ 时,UKF 估计均方根误差出现波动并缓慢增加,此时的导航信息估计精度出现了缓慢的下降;当 $100 \leq N \leq 600$ 时,UKF 估计误差出现了较大波动并急剧上升,此时导航滤波完全发散,无法提供准确的导航信息.与之相反,在不同噪声水平的整个仿真过程中,FUKF 的均方根误差基本保持不变.

为了更好地说明仿真结果,对不同噪声水平下滤波得到的均方根误差求取平均值,结果如表 2 所示.

表 2 均方根误差均值

方法	x/m	y/m	z/m	$v_x/(m \cdot s^{-1})$	$v_y/(m \cdot s^{-1})$	$v_z/(m \cdot s^{-1})$
UKF	5 613.38	2 933.82	5 184.90	4.84	2.24	4.75
FUKF	175.94	124.86	191.79	0.16	0.11	0.17

由表 2 可见,随着系统噪声水平的加强,UKF 方法不能很好地适应噪声变化,甚至出现了严重的发散现象.采用 FUKF 进行的自主导航解算,能较好地适应环境噪声的变化,其输出的导航信息

估计精度基本不受外界不确定噪声的影响,显示出良好的自适应能力.

4 结 论

1)在航天器自主导航过程中,根据残差方差实际值与理论值的比值 α_k ,将滤波过程划分为普通滤波模式和自适应滤波模式,在两种模式下分别设计模糊推理系统,利用模糊推理得到的自适应因子 ε_k 对系统测量方差阵进行在线调整.

2)在普通模式下的调整,可以抑制滤波初始阶段的幅值,使估计过程较快地收敛;在自适应模式下的调整,可以克服不同水平测量噪声的干扰.

3)在航天器自主导航系统中的仿真表明,采用模糊自适应 UKF 方法,能够提高估计精度,克服不确定噪声的干扰.

参考文献:

[1] XIONG Kai, LIU Liangdong, ZHANG Hongyue. Modified unscented Kalman filtering and its application in autonomous satellite navigation [J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(4/5): 238-246.

[2] 张瑜,房建成. 航天器天文导航模糊自适应卡尔曼滤波研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(8): 735-738.

[3] 李建文,郝顺义,黄国荣. 基于通用 FLAC 的模糊自适应 UKF 算法及其应用[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12):1732-1736.

[4] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.

[5] JULIER S J, UHLMANN J K, DURRANT-WHYTE H F. A new approach for filtering nonlinear systems [C]// Proceedings of the American Control Conference. Seattle, Washington: [s. n.], 1995: 1628-1632.

[6] 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.

[7] NING Xiaolin, FANG Jiancheng. An autonomous celestial navigation method for LEO satellite based on unscented Kalman filter and information fusion[J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(2/3): 222-228.

[8] 张共愿,程咏梅,杨峰,等. 预测-校正 EKF 算法在自主导航中的应用[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2227-2230.

[9] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 270-275.

[10] 张德丰. MATLAB 模糊系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 85-120. (编辑 杨 波)