

基于 UPF 的 GPS/SINS 组合导航系统设计

李妍妍, 张 伟

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 611731)

摘 要: 建立了 GPS/INS 非线性误差模型, 利用 UPF 滤波算法实现了该组合系统定位功能, 一方面针对 UKF 估计误差协方差极易非正定的问题进行了正定化处理; 另一方面在粒子滤波环节针对重采样导致的粒子多样性降低的问题, 增加了 MCMC 移动步骤. 实验结果表明: 应用 UPF 实现的组合导航系统定位精度明显优于 EKF 和 UKF, 且定位误差波动幅度较小, 既能够满足非线性系统的导航精度要求, 又能够满足定位系统对滤波稳定性的要求.

关键词: 非线性系统; 无迹粒子滤波; GPS; INS; 组合导航

中图分类号: TN967.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)09-0080-04

The Design of GPS/SINS Integrated Navigation System Based on UPF

LI Yan-yan, ZHANG Wei

(Research Institute of Electronic Science & Technology, University of Electronic Science
Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The un-linear error model with GPS/INS has been built, and the UPF has used to make the function of position of integrated navigation realized. In order to solve the problem of the non-positive definite of estimation error covariance in UKF, the positive processing has been adopted. In additional, MCMC has been adopted to decrease the particles impoverishment. The experiment results show that: UPF has better accuracy than UKF and EKF, and the fluctuation of the error is rather small, which make the accuracy and robust requirements of the navigation system on satisfied.

Key words: un-linear system; unscented particle filter; GPS; INS; integrated navigation

1 引言

在 GPS/SINS 组合导航系统中, SINS 误差方程非线性特性极为明显^[1]. 如果仍然采用基于线性、高斯模型假设的传统 kalman 滤波融合算法, 将难以得到良好的定位性能. 针对 GPS/INS 组合导航系统非线性特性带来定位精度降低的问题, 文献[2-4]中详细讨论了将 GPS/SINS 非线性系统线性化的处理过程, 并将 EKF 算法实现了定位; 文献[5]中建立了以伪距/伪距率为观测量的数学模型, 并利用 UKF 算法实现了 GPS/SINS 组合导航定位. 文献[6-7]中分析了无迹粒子滤波(UKF)算法的原理, 并针对状态方程或观测方程的非线性程度, 分析了 UKF 滤波过程的异同. 工程实践证明: 针对非线性

系统, 由于 UKF 利用 UKF 滤波粒子逼近重要性密度函数, 并摆脱了模型必须服从高斯分布的限制, 且重采样过程能有效降低粒子退化机率, 与文献[1-4]中算法相比, 具有较高的精度和实用性. 但是 UKF 在滤波过程中估计误差协方差极易失去正定性, 在下一刻提取 sigma 采样点将面临失败, 最终导致无法确保滤波过程顺利进行. 本文研究了以位置/速度作为观测量的 GPS/SINS 组合导航非线性系统, 设计了基于该非线性系统设计一种应用 UPF 实现的组合导航定位系统. 在 UPF 设计中, 一方面针对上述提到的 UKF 滤波估计误差协方差非正定的问题, 加入了正定化处理过程, 既充分发挥了 UPF 的优点, 又解决了 UKF 容易非正定的问题; 另一方面为了解决粒子滤波重采样导致的粒子多样性减少的

现象,引入在每个粒子上增加一个其稳定分布作为后验概率密度的MCMC移动步骤,以实现粒子的崎岖化.最后,将仿真结果与基于GPS/SINS非线性模型的EKF和UKF进行了对比.

2 GPS/SINS组合导航系统数学模型

基于位置速度的GPS/SINS组合导航系统是将GPS输出的位置/速度和SINS位置/速度的差值作为观测量,将SINS的系统误差作为状态误差,完成系统数学模型构建.然后进行滤波,实现系统误差估计.最后,将滤波估计的系统误差反馈并修正SINS系统,实现定位精度的提高.因此从原理上GPS/SINS组合导航系统设计,主要包括两部分:数学模型的建立和高精度滤波器的设计,而数学模型建立又细化为系统状态方程和观测方程的构建.

2.1 系统状态方程

由于GPS接收机解算给出的位置和速度误差一般是时间相关的色噪声^[1],在实际中往往难以建模,因此本设计中的GPS/SINS组合导航系统状态仅考虑SINS的误差,即将SINS的误差模型作为系统状态.目前,理论比较成熟的误差模型是以东北天(ENU)地理坐标系为导航坐标系下误差模型^[2],SINS的主要误差如下:

$$\mathbf{X} = [\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z, \delta v_x, \delta v_y, \delta v_z, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]^T,$$

式中, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ 为数学平台姿态角误差, $\delta v_x, \delta v_y, \delta v_z$ 分别代表 ENU 三个方向的速度误差, $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 分别表示纬度、经度和高度的误差, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 分别表示三个轴向的陀螺仪的随机漂移, $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 分别表示三个轴向的加速度计的随机漂移.

(1) 数学平台姿态角误差:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}^n &= \delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n - (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \varphi + \\ &\quad C_b^n (\omega_{fb}^b + \epsilon^b) \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 速度误差方程:

$$\begin{aligned} \dot{\delta v}^n &= \delta C_b^n \hat{f}^b - (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) \hat{v}^n - \\ &\quad (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \delta v^n + C_b^n \nabla^b + \delta g^n \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 位置误差方程

$$\begin{aligned} \dot{\delta L} &= \frac{\delta v_y}{R_M + h} \\ \dot{\delta \lambda} &= \frac{\sec L}{R_N + h} \delta v_x + \frac{v_x}{R_N + h} \delta L \sec L \tan L \\ \dot{\delta h} &= \delta v_z \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~(3)中参数的设置或求解参看文

献[2].

(4) 陀螺仪和加速度计误差模型

事实上惯性器件误差包括安装误差、刻度因子误差和随机误差等误差,本文仅考虑随机误差,即陀螺仪和加速计上的三维随机误差,表示为

$$\mathbf{W} = [\omega_{\epsilon_x}, \omega_{\epsilon_y}, \omega_{\epsilon_z}, \omega_{\nabla_x}, \omega_{\nabla_y}, \omega_{\nabla_z}]^T$$

由误差方程表达式可知,系统具有非线性特性外,由于导航参数是随着时间而变化的,因此该系统是时变非线性系统.将上述误差方程写成 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{G}\mathbf{W}$,即得到了状态方程的矩阵表示形式.其中 $\mathbf{G}$ 为系统状态噪声转移矩阵,表示为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 3} \end{bmatrix}_{16 \times 6}$$

2.2 观测方程

由于系统采用间接式融合结构,因此测量为GPS定位位置/速度与SINS提供的位置/速度差值,即 $\mathbf{Z} = [(\mathbf{p}_{INS} - \mathbf{p}_{GPS})_{3 \times 1} \quad (\mathbf{v}_{INS} - \mathbf{v}_{GPS})_{3 \times 1}]$,根据其于状态的关系,将观测方程写成 $\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V}$ 的形式,其中 $\mathbf{H}$ 为观测阵,表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 6} & \text{diag}(\mathbf{R}_M, \mathbf{R}_N \cos L, 1) & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \text{diag}(1, 1, 1) & \mathbf{0}_{3 \times 9} \end{bmatrix}_{6 \times 15}$$

3 无迹粒子滤波过程

从滤波过程上讲,无迹粒子滤波过程是UKF和PF的组合过程.根据无迹粒子滤波原理,粒子滤波的采样点是从UKF滤波状态输出和估计误差协方差中抽取的,即只有UKF完成了滤波才能进行粒子过程,因此从某种意义上讲UKF滤波过程可以认为是UKF和标准PF有特定处理顺序的相对独立滤波过程的级联形式.然而在工程应用中,UKF的估计误差协方差极易非正定,利用非正定的估计误差协方差进行下一个时刻sigma点抽取,会导致抽取过程失败,进而影响整个滤波过程的进行.为了避免上述问题,UKF滤波过程中对估计误差协方差阵进行了正定化处理.为了有效降低计算量,考虑到算法复杂度,采用应用工程中常用简单而有效处理方法,即 $\mathbf{P} = (\mathbf{P} + \mathbf{P}^T)/2$.在粒子滤波迭代过程中,采样MCMC方法,在每个粒子上增加一个稳定分布作为后验概率密度的MCMC移动步骤,增加了粒子多样性,有效避免了粒子贫化现象.将UPF作为两种相对独立滤波过程的级联形式,滤波过程如下:

3.1 UKF 滤波过程

Step1: 初始化. $k = 0$ 时, $\hat{X}_0, P_0$

Step2: 计算 Sigma 采样点

$$\chi_{j, k-1}^a = \begin{bmatrix} \hat{X}_{j, k-1} \\ \hat{X}_{j, k-1} + (\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_j \\ \hat{X}_{j, k-1} - (\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_j \end{bmatrix}$$

式中, n 表示系统状态维数, 由 1 讨论可知状态信息维数为 $n=15$, 故 Sigma 采样点个数为 $2n+1=31$, 采样点对应权值:

一阶统计量权值: $w_0 = \lambda/(n+\lambda)$, 二阶统计量

权值:

$$w_0^{(\phi)} = \lambda/(n+\lambda) + (1-\alpha^2+\beta)$$

$$w_j^{(\phi)} = w_j^{(m)} = 1/(2(n+\lambda))$$

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n,$$

$$\beta = 2, \kappa = 0, (\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}})_j \text{ 表示第 } j \text{ 列.}$$

Step3: 滤波过程

For $k = 1:N$ (仿真时刻)

For $j = 0:2n$ (sigma 采样点数)

(1) 时间更新:

$$\chi_j^a(k/k-1) = f(\chi_j^a, k/k-1, \chi_j^a, k-1)$$

$$\hat{X}(k, k-1) = \sum_{j=0}^{2n} w_j^m \chi_j^a, k-1$$

$$P_{k, k-1} = Q + \sum_{j=0}^{2n} w_j^c (\chi_j^a, k/k-1 -$$

$$\hat{X}_{k/k-1})(\chi_j^a, k/k-1 - \hat{X}_{k/k-1})^T$$

$$\mathbb{Z}_{j, k/k-1}^a = H(\chi_j^a, k-1)$$

$$\hat{Z}_{k/k-1} = \sum_{j=0}^{2n} w_j^m \mathbb{Z}_{j, k/k-1}^a$$

$$P_{z, k/k-1} = R + \sum_{j=0}^{2n} w_j^c (\mathbb{Z}_{j, k/k-1}^a - \hat{Z}_{k/k-1})(\mathbb{Z}_{j, k/k-1}^a$$

$$- \hat{Z}_{k/k-1})^T$$

(2) 状态更新:

$$K = P_{k/k-1} P_{z, k/k-1}^{-1}$$

$$\hat{X}(k/k) = \hat{X}(k, k-1) + K(Z_k - \hat{Z}_{k/k-1})$$

$$P_{k, k} = P_{k, k-1} - K P_{z, k/k-1} K^T$$

$$P_k = (P_{k/k} + P_{k/k}^T)/2$$

End

End

3.2 粒子滤波过程

将 3.1 节中得出的状态 $\hat{X}(k/k)$ 和估计误差协方差 P_k 作为粒子滤波采样点, 进行采样点的更新.

(1) 初始化.

(2) 滤波过程

For $k = 1:N$ (仿真时刻)

For $i = 1:N_1$ (粒子数)

Step1: 采样

用 UKF 的滤波估计值更新粒子集合 $\{\chi_{k-1}^i, P_{k-1}^i\}$, 用采样粒子模拟高斯分布, 作为采样函数为, 即:

$$q(\chi_k^i | \chi_{0:k-1}^i, Z_{1:k}) = N(\chi_{k-1}^i, P_{k-1}^i)$$

Step2: 权重更新

$$w_k^i = w_{k-1}^i \frac{p(Z_k | \chi_k^i) p(\chi_k^i | \chi_{k-1}^i)}{q(\chi_k^i | \chi_{0:k-1}^i, Z_{1:k})}$$

Step3: 权重归一化

$$w_k^i = w_{k-1}^i / \sum_{i=1}^{N_1} w_k^i$$

Step4: 重采样. 从离散分布的 $\{\chi_k^{(i)}, w_k^i\}$ 中进行 N 次重采样, 得到重采样粒子 $\{\chi_k^{(i*)}, 1/N\}$.

Step5: MCMC 过程

① 生成一个随机数 u , u 满足 $u \sim U_{[0-1]}$;

② 从马尔科夫链中进行采样:

$$\chi_k^{(i*)} \sim p(\chi_k | \chi_{k-1}^{(i*)})$$

③ if $\min\left[1, \frac{p(Z_k | \chi_k^{(i*)})}{p(Z_k | \chi_k^{(i*)})}\right] \geq u$, 进行 MCMC 移

动: $\chi_{0:k}^{(i*)} = (\chi_k^{(i*)}, \chi_k^{(i*)})$

else $\chi_{0:k}^{(i*)} = \chi_k^{(i*)}$

Step6: 输出结果.

$$X(k) = \sum_{i=1}^{N_1} w_k^i \chi_k^i$$

$$P(k) = \sum_{i=1}^{N_1} w_k^i (\chi_k^i - X(k))(\chi_k^i - X(k))^T$$

End

End

4 仿真结果分析

根据仿真结果, 与 EKF 和 UKF 相比, 利用 UPF 实现的 GPS/SINS 定位精度有很大程度的提高.

(1) 分析定位误差图可知, 利用 EKF 和 UKF 实现的 GPS/INS 组合导航系统定位误差分别在 ± 10 m 和 ± 7 m 以内, 而利用 UKF 设计的 GPS/SINS 组合系统, 将位置误差限定在了 ± 3.5 m 以内. 此外, 从定位误差分析表可知: 相对于 EKF 定位精度提高了 70% 左右; 相对于 UKF, 定位精度提高了 40% 左右. 因此, UKF 实现组合导航定位能够满足定位精度的要求.

(2) 分析定速误差图, 与 EKF 实现 GPS/SINS 组合导航定位相比, UKF 和 UPF 定速精度有很大

的提高,从误差范围上看,EKF 将定速误差限定在了 $\pm 5\text{ m/s}$ 以内,从定位误差分析表可知,相较于 UKF,UPF 的定速精度略差,但较于 EKF 其定速精度提高了左右.因此从定位和定速两方面综合考虑,利用 UPF 实现的 GPS/SINS 组合导航系统都能够保证定位精度的需求.

(3)根据定位结果图及误差限定范围的分析可知,UPF 实现的 GPS/SINS 定位精度,定位误差波动幅度较小,且滤波器收敛速度较快,表明该算法满足定位稳定性要求.

5 结束语

本文讨论了 GPS/SINS 组合导航系统的非线性特性,并建立了与之相适应的数学模型.为了弥补常见非线性滤波算法的不足,详尽分析了 UPF 能够有效解决非线性问题的原因和特点,并逐步细化了滤波过程,最后利用该滤波器实现了 GPS/INS 组合导航系统定位.实验结果表明利用 UPF 设计 GPS/SINS 组合导航系统能够满足定位精度和滤波稳定性的要求.

参考文献:

[1] Jacques Georgy, Aboelmagd Noureldin, Michael JKo-

renberg, et al. Modeling the stochastic drift of a MEMS-Based gyroscope in gyro/Odometer/GPS integrated navigation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(4):856-872.

[2] 罗建军,马卫华.组合导航原理与应用[M].西安:西北工业大学出版社,2010.
 [3] 秦永元.惯性导航[M].北京:科学出版社,2006.
 [4] 毋建宏.基于多传感器 Kalman 滤波器的 GPS/IMU 数据融合算法设计[J].微电子学与计算机,2005,22(6):77-79.
 [5] 鲍其莲,周媛媛.基于 UKF 的 GPS/SINS 伪距(伪距率)组合导航系统设计[J].中国惯性技术学报,2008,16(1):78-81.
 [6] Merwe R V,Doucet A,De Freitas N,et al. The unscented particle filter, Technical Report CUED/F2INPENG/PR380[R]. Cambridge University, Engineering Department,2000.
 [7] 曲彦文,张二华,杨静宇.改进的无迹粒子滤波算法[J].控制理论与应用,2010,27(9):1152-1158.

作者简介:

李妍妍 女,(1984—),硕士研究生.研究方向为组合导航及信息融合.
 张伟 男,(1974—),研究员,博士(后).研究方向为雷达信号与信息处理及系统仿真.

(上接第 79 页)

表 3 插值单元性能结果

Frequency/ MHz	Throughput			
	Mblocks 8×8/s	HDTV/ (Frames/s)	FULL HD/ (Frames/s)	QHDTV/ (Frames/s)
213	5.916	390.2	179.4	51.7

5 结束语

本文在传统的运动补偿亮度半像素插值算法的基础上提出一种性能较好的、易于实现的新的插值算法,并对该算法进行了硬件结构的设计和 FPGA 的实现.本文将传统算法重中的 6 阶滤波器改换成 4 阶滤波器,并使用了流水线的并行处理方式.改进后的频率可达到 213 MHz,获得了较好的处理速率,硬件单元和时钟周期数也有所减少,该算法的硬件复杂度降低.但改进算法滤波器阶数的降低也造成了运算精度的降低,需要进一步解决.

参考文献:

[1] Osterman J, Bormas J, List J, et al. Video coding with H.264/AVC: tools, performance, and complexity[J]. IEEE Circuits and Systems Society, 2004, 4

(1):7-28.

[2] Wiegani T, Sullivan G J, Bjontegaard G, et al. Overview of the H.264/AVC video coding standard[J]. IEEE Circuits and Systems Society, 2003, 13(7):560-576.
 [3] Song Y, Liu Z Y, Goto S, et al. A VLSI architecture for motion compensation interpolation in H.264/AVC [C]//Proceedings of the 6th International Conference on ASIC. Shanghai, 2005:279-282.
 [4] Yalcin S, Hamzaoglu I. A high performance hardware architecture for half-Pixel accurate H.264 motion estimation[C]//Very Large Scale Integration. Nice, France,2006:63-67.
 [5] Correa, Dornelles, Schoenknecht. A high performance hardware architecture for the H.264/AVC half-pixel interpolation unit[C]//Programmable Logic Conference (SPL). Ipojuca, 2010:81-86.

作者简介:

王巍 男,(1967-),博士,教授,硕士生导师.研究方向为集成电路设计.
 胡洁 女,(1990-),硕士研究生.研究方向为数字视频处理及 FPGA 设计.