DOI: 10.13382/j.jemi.B2205243

多传感器组合导航系统的联邦 UKF 算法研究*

朱璐瑛[1] 孙炜玮[2] 刘成铭[3] 孙兆玮[1]
(1. 烟台南山学院工学院 烟台 265713;2. 海军航空大学 烟台 264001;3. 东海热电有限公司 烟台 265700)

摘 要:多传感器组合导航系统是一种典型的非线性系统,为了提高其滤波精度,本文提出了多传感器组合导航系统联邦 UKF 算法。首先,在建立多传感器组合导航系统的非线性状态方程及线性量测方程的基础上,对标准 UKF 进行了简化;然后,以简化 UKF 为基础提出了多传感器组合导航系统的联邦 UKF 算法,并设计了姿态融合算法及其故障检测函数以验证该算法的容错性能;最后,以 GNSS/CNS/SINS 多传感器组合导航系统为例进行了仿真验证。仿真结果表明,相对于联邦线性卡尔曼滤波器,联邦 UKF 算法可提高位置及姿态精度约 25.8%、22.2%,同时继承了联邦线性卡尔曼滤波器的容错性能。

关键词: 联邦 UKF;简化 UKF;多传感器组合导航;姿态融合;容错性能
中图分类号: TN966; V249.3 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 590.35

Research on federal UKF algorithm for multi-sensor integrated navigation system

Zhu Luying[1] Sun Weiwei[2] Liu Chengming[3] Sun Zhaowei[1]
(1. Engineering College, Yantai Nanshan University, Yantai 265713, China; 2. Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China; 3. Donghai Thermal Power Co., Ltd., Yantai 265700, China)

Abstract: Multi-sensor integrated navigation system is a typical nonlinear system, a federated UKF algorithm is proposed to improve its filtering accuracy in this paper. Firstly, the standard UKF is simplified on the basis of establishing nonlinear state equation and linear measurement equation of multi-sensor integrated navigation system. Then, based on this simplified UKF, the federated UKF algorithm of multi-sensor integrated navigation system is proposed, the attitude fusion algorithm is designed, and the fault detection function is designed simply in order to verify the fault-tolerant performance of the algorithm. Finally, the GNSS/CNS/SINS multi-sensor integrated navigation system is taken as an example for simulation verification. The simulation results show that the federated UKF algorithm can improve the position and attitude accuracy by 25.8% and 22.2% when compared with the federated linear Kalman filter, and inherit the fault-tolerant performance of the federated linear Kalman filter.

Keywords: federal UKF; simplified UKF; multi-sensor integrated navigation system; attitude fusion; fault-tolerant performance

0 引 言

无迹卡尔曼滤波器(UKF)是一种典型的非线性滤波方法,由于没有经过线性化处理、没有忽略高阶项,因此在目标跟踪、组合导航等非线性系统得到广泛的应用[1-3]。在组合导航系统领域,UKF 目前主要在 GNSS/SINS 组合导航系统得到深入的研究[4-5],主要原因如下:1)GNSS/SINS 组合导航系统是一种理想的导航系统,在各领域得到深入的研究;2)由于位置和速度是标准的矢量,基于位置与速度融合的 GNSS/SINS 组合导航系统的 UKF 样点采集、样点均值计算及样点方差计算容易,同时量测更新中量测值的一步预测误差计算也较容易。然而,对 UKF 在多传感器组合导航系统中的研究较少,原因如下:1)标准 UKF 的计算过程过于复杂,其时间更新过程与量测更新过程均是典型的非线性运算;2)由于三维姿态角不是标准的矢量,为此对于姿态融合,对应的 UKF 样点采集、样点均值、样点方差及量测值一步预测误

收稿日期: 2022-03-08 Received Date: 2022-03-08
*基金项目:国家自然科学基金(60874112,61673208)、山东省自然科学基金(2016ZRA06068)项目资助

差的计算需进行特殊的设计。

文献[6-8]提出了基于 UKF 及基于改进自适应高阶容积卡尔曼滤波的 GNSS/CNS/SINS 多传感器组合导航系统滤波方法,但其状态方程及量测方程均采用了线性化处理,为此该方法没有充分发挥非线性滤波的优势;文献[9]在发射惯性坐标系下提出了基于 UKF 的 GNSS/CNS/SINS 多传感器组合导航系统滤波方法,虽说该方法的状态方程是非线性的,但是其量测方程采用集中处理方式,不利于系统的容错处理,同时该方法对姿态的样点采集等相关问题没有给予介绍。文献[10]针对深空探测任务提出了基于联邦无迹粒子滤波器(UPF)的组合导航滤波算法,该方法对非线性滤波方法在多传感器组合导航系统中的应用进行了研究,然而当出现粒子退化现象时该方法的滤波精度得不到保证。

为此,本文为了充分发挥 UKF 算法的优势,根据各导航系统的工作原理,在给出多传感器组合导航系统非线性状态方程及线性量测方程的基础上,首先对标准 UKF 进行简化,然后设计了联邦 UKF 算法,并对其容错性能进行了验证。

1 组合导航系统模型

基于非线性滤波算法的组合导航系统常把导航参数作为被估计的状态,其状态方程采用捷联惯性导航系统的机械编排方程。导航坐标系选取为“东北天”地理坐标系,其状态方程可表示为[11-12]:

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{X}}(t)=f(\boldsymbol{X}(t),\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b},\boldsymbol{f}^{b},t)\\ \boldsymbol{X}(t)=[\gamma\quad\theta\quad\varphi\quad v_E\quad v_N\quad v_U\quad\lambda\quad L\quad H]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{X}(t)$ 代表系统状态向量;γ、θ、φ 分别代表横滚角、俯仰角和航向角;v_E、v_N、v_U 分别代表东向速度、北向速度和天向速度;λ、L、H 分别代表经度、纬度和高度;$\boldsymbol{\omega}_{ib}^{b}$ $\boldsymbol{f}^{b}$ 分别代表陀螺仪及加速度计的输出信息;t 代表时间。

目前,常用的辅助导航传感器可直接或间接输出与式(1)对应的速度、位置及姿态导航参数,如 CNS 的输出可转换为地理系下的三维姿态、GNSS 可输出三维速度及三维位置、景象与地形匹配系统提供水平位置信息(经度与纬度)、气压高度表输出高度等。为此,上述辅助导航传感器对式(1)进行观测时,其对应的量测矩阵为常值矩阵。

假设多传感器组合导航系统具有 N 个上述类型的辅助导航传感器,每个辅助导航传感器构成一个子滤波器,并且子滤波器与主滤波器的状态方程和状态变量与式(1)相同,则第 $j(j=1,\cdots,N)$ 个子系统的量测方程可以表示为[13]:

$$\boldsymbol{Z}^{j}(t)=\boldsymbol{H}^{j}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}^{j}(t)\tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{Z}^{j}(t)$、$\boldsymbol{H}^{j}(t)$ 为第 j 个子系统的量测向量、量测矩阵;$\boldsymbol{V}^{j}(t)\sim N(0,\boldsymbol{R}^{j}(t))$ 为量测噪声向量。

2 组合导航滤波算法模型

2.1 组合导航简化 UKF 算法设计

标准 UKF 算法是一种典型的非线性滤波器,在处理状态方程和量测方程均是非线性的非线性系统时具有优势。假设状态向量、系统噪声及量测噪声的维数分别为 L_x、L_w、L_v,且增广状态向量可表示为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}^{a}=[\boldsymbol{X}\quad\boldsymbol{W}\quad\boldsymbol{V}]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\chi}^{a}=[(\boldsymbol{\chi}^{X})^{\mathrm{T}}\quad(\boldsymbol{\chi}^{W})^{\mathrm{T}}\quad(\boldsymbol{\chi}^{V})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{X}^{a}$、$\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 分别代表增广状态向量、系统状态向量、系统噪声向量和量测噪声向量;$\boldsymbol{\chi}^{a}$ $\boldsymbol{\chi}^{X}$ $\boldsymbol{\chi}^{W}$ 和 $\boldsymbol{\chi}^{V}$ 分别代表 $\boldsymbol{X}^{a}$、$\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{V}$ 的采样点向量。

根据式(3),如果系统噪声及量测噪声维数较高,则增广状态向量的维数也将增大,进而增加了滤波算法的计算量。以系统(1)为例,状态向量的维数为 9;如果仅取陀螺及加速度计的一阶马尔科夫误差作为系统噪声,则系统噪声的维数为 6;子滤波器仅考虑 GNSS,则量测噪声的维数为 6;此时,增广状态向量的维数为 21。在多传感器组合导航系统的集中滤波模式下,如果考虑多个子滤波器,则增广状态向量的维数进一步增加,此时必须考虑系统的实时性问题。

本文首先对标准 UKF 的量测更新过程进行简化,然后提出了联邦 UKF 算法。简化 UKF 具体步骤如下。

1)初始化

根据式(1)、(2)的特点,仅将状态向量、系统噪声增广为增广状态向量[14]:

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}^{a}=[\boldsymbol{X}\quad\boldsymbol{W}]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\chi}^{a}=[(\boldsymbol{\chi}^{X})^{\mathrm{T}}\quad(\boldsymbol{\chi}^{W})^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{X}^{a}$ 和 $\boldsymbol{\chi}^{a}$ 的维数定义为 L_a,且 $L_a=L_x+L_w$。

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{X}}_0=E[\boldsymbol{X}_0]\\ \boldsymbol{P}_0=E[(\boldsymbol{X}_0-\hat{\boldsymbol{X}}_0)(\boldsymbol{X}_0-\hat{\boldsymbol{X}}_0)^{\mathrm{T}}]\\ \hat{\boldsymbol{X}}_0^{a}=E[\boldsymbol{X}^{a}]=\left[\hat{\boldsymbol{X}}_0^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{0}\right]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{P}_0^{a}=E[\boldsymbol{X}^{a}]=\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_0&\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0}&\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}\end{cases}\tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{Q}$ 为系统噪声矩阵。

样点计算可表示为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\chi}_{0,k-1}^{a}=\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}^{a}\\ \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^{a}=\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}^{a}+\left(\sqrt{(L_a+\lambda)\boldsymbol{P}_{k-1}^{a}}\right)_i,\quad i=1,\cdots,L_a\\ \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^{a}=\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1}^{a}-\left(\sqrt{(L_a+\lambda)\boldsymbol{P}_{k-1}^{a}}\right)_i,i=L_a+1,\cdots,2L_a\end{cases}\tag{6}$$

权值计算表示如下：

$$\begin{cases} W_0^m = \dfrac{\lambda}{L_a + \lambda} \\ W_0^c = \dfrac{\lambda}{L_a + \lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^m = W_i^c = \dfrac{1}{2(L_a + \lambda)}, \quad i = 1, \cdots, 2L_a \end{cases} \tag{7}$$

其中，$\lambda = \alpha^2(L_a + \kappa) - L_a$；$\alpha$、$\beta$ 和 κ 均为比例因子。

2)时间更新方程

简化 UKF 的时间更新过程与标准 UKF 的类同：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X = f(\boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^X, \boldsymbol{\omega}_{ib}^b, \boldsymbol{f}^b, \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^W) \\ \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1} = \sum_{i=0}^{2L_a} W_i^m \boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X \end{cases} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{P}_{k\mid k-1} = \sum_{i=0}^{2L_a} W_i^c [\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X - \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1}] [\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X - \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1}]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

3)量测更新方程

标准 UKF 的量测方程为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z}_{i,k\mid k-1} = h(\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X, \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^V) \\ \hat{\boldsymbol{Z}}_{k\mid k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \boldsymbol{Z}_{i,k\mid k-1} \end{cases} \tag{10}$$

基于式(2)中量测方程为线性，且标准 UKF 中量测噪声样点均值为 0，则有如下简化的 UKF 量测方程：

$$\boldsymbol{Z}_{i,k\mid k-1} = h(\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X, \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^V) = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X + \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^V \tag{11}$$

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_{k\mid k-1} = \boldsymbol{H} \cdot \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X + \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \boldsymbol{\chi}_{i,k-1}^V = \boldsymbol{H} \cdot \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1} \tag{12}$$

简化 UKF 量测更新方程可表示如下：

$$\boldsymbol{P}_{ZZ} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_{k\mid k-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{P}_{XZ} = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1} \cdot \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

4)滤波更新方程

简化 UKF 滤波更新方程与标准 UKF 的类同，即：

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{XZ} \cdot \boldsymbol{P}_{ZZ}^{-1} \\ \hat{\boldsymbol{X}}_k = \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{Z}_k - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k\mid k-1}) \\ \boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{P}_{ZZ}\boldsymbol{K}_k^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{P}_{XZ}^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{15}$$

2.2　多传感器组合导航联邦 UKF 算法设计

联邦 UKF 算法是将联邦滤波思想[15-17]与简化 UKF 进行有机结合，其初始化过程与式(4)~(7)相同，状态向量一步预测方程与式(8)相同，而状态向量一步预测协方差矩阵表示如下：

$$\boldsymbol{P}_{k\mid k-1}^j = (\beta_j)^{-1} \sum_{i=0}^{2L_a} W_i^c [\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X - \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1}] [\boldsymbol{\chi}_{i,k\mid k-1}^X - \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1}]^{\mathrm{T}} = (\beta_j)^{-1}\boldsymbol{P}_{k\mid k-1} \tag{16}$$

其中，β_j 代表子滤波器 j 的信息分配系数。

多传感器组合导航系统联邦 UKF 的量测更新过程及滤波更新过程分别表示如下：

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_{k\mid k-1}^j = \boldsymbol{H}^j \cdot \hat{\boldsymbol{X}}_{k\mid k-1} \tag{17}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{ZZ}^j = \boldsymbol{H}^j \cdot \boldsymbol{P}_{k\mid k-1}^j \cdot (\boldsymbol{H}^j)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}^j \\ \boldsymbol{P}_{XZ}^j = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1}^j \cdot (\boldsymbol{H}^j)^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_k^j = \boldsymbol{P}_{XZ}^j \cdot (\boldsymbol{P}_{ZZ}^j)^{-1} \\ \delta\hat{\boldsymbol{X}}_{j\,k\mid k} = \boldsymbol{K}_k^j(\boldsymbol{Z}_k^j - \hat{\boldsymbol{Z}}_{k\mid k-1}^j) \\ \boldsymbol{P}_{k\mid k}^j = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1}^j - \boldsymbol{K}_k^j\boldsymbol{P}_{ZZ}^j(\boldsymbol{K}_k^j)^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{P}_{k\mid k-1}^j - \boldsymbol{K}_k^j(\boldsymbol{P}_{XZ}^j)^{\mathrm{T}} \end{cases} \tag{19}$$

由以上分析，则多传感器组合导航系统的联邦 UKF 滤波算法结构如图 1 所示[12]。

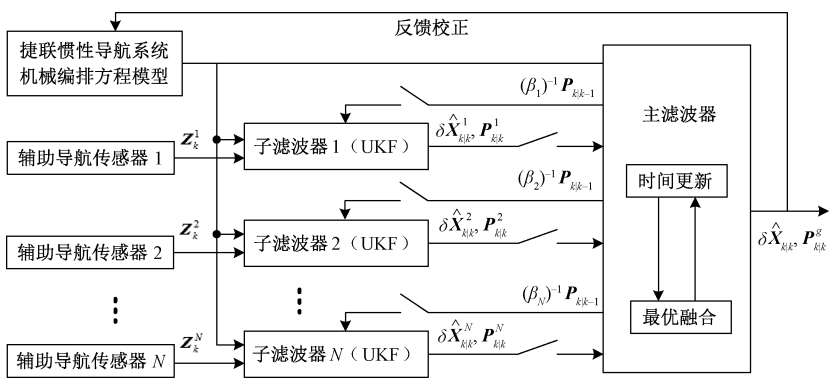

图 1　多传感器组合导航系统的联邦 UKF 算法示意图

Fig. 1　Federal UKF algorithm diagram for multi-sensor integrated navigation system

该算法主要采用了融合-重置式结构，主滤波器进行时间更新，并按照信息分配原则给各子滤波器分配信息；而各子滤波器进行时间更新与量测更新，并进行故障检测。主滤波器完成全局融合后，对捷联惯性导航系统进行反馈校正。

其全局融合算法如下：

$$\boldsymbol{P}_{k|k}^{g}=[(\boldsymbol{P}_{k|k}^{1})^{-1}+(\boldsymbol{P}_{k|k}^{2})^{-1}+\cdots+(\boldsymbol{P}_{k|k}^{N})^{-1}]^{-1} \tag{20}$$

$$\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k}=\boldsymbol{P}_{k|k}^{g}[(\boldsymbol{P}_{k|k}^{1})^{-1}\delta\hat{\boldsymbol{X}}1_{|k}^{k}+(\boldsymbol{P}_{k|k}^{2})^{-1}\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k}^{2}+\cdots+(\boldsymbol{P}_{k|k}^{N})^{-1}\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k}^{N}] \tag{21}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k}=\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1}+\delta\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k} \tag{22}$$

2.3 联邦 UKF 故障检测函数设计

本小节的目的是验证联邦 UKF 的容错性能。根据以上联邦 UKF 算法模型,可以定义每个局部 UKF 的残差为[18]:

$$\boldsymbol{v}_k^j=\boldsymbol{Z}_k^j-\hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1}^j=\boldsymbol{Z}_k^j-\boldsymbol{H}^j\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} \tag{23}$$

在无故障发生时,子滤波器的残差是零均值高斯白噪声,其方差为:

$$\boldsymbol{S}_k^j=\boldsymbol{H}^j\boldsymbol{P}_{k|k-1}^j(\boldsymbol{H}^j)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}^j \tag{24}$$

则定义归一化新息为:

$$T_k^j=(\boldsymbol{v}_k^j)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{S}_k^j)^{-1}\boldsymbol{v}_k^j \tag{25}$$

对 $\boldsymbol{v}_k^j$ 作二元假设:H_0^j、H_1^j 分别是与第 j 个子导航传感器对应的子系统无故障发生、有故障发生两种情况,则有:$H_0^j:\boldsymbol{v}_k^j\sim N(0,\boldsymbol{S}_k^j)$;$H_1^j:\boldsymbol{v}_k^j\sim N(\nabla,\boldsymbol{S}_k^j)$。

T_k^j 服从自由度为 m^j 的 χ^2 分布,并且[19]:

$$P[T_k^j>T_D^j\mid H_0^j]=\alpha^j \tag{26}$$

其中,T_D^j 代表检测门限,α^j 代表显著性水平。

2.4 姿态融合算法设计

当子导航传感器输出姿态时,对应的子滤波器采取姿态融合方式。姿态样点采集、方差的计算步骤:

1)选取当前姿态向量为第 1 个样点,记作 $\boldsymbol{a}_0=[\gamma_0\quad\theta_0\quad\phi_0]^{\mathrm{T}}$,其对应的姿态矩阵为 $\boldsymbol{C}_{n_0}^b$;2)根据式(6)中的 $\pm\left(\sqrt{(L_a+\lambda)\boldsymbol{P}_{k-1}^a}\right)_i$ 项的前 3 行,得到平台角误差向量 $\boldsymbol{\Phi}_j^n=[\varphi_{xj}\quad\varphi_{yj}\quad\varphi_{zj}]^{\mathrm{T}}$,其对应的误差转换矩阵 $\boldsymbol{C}_{n_0}^{n_j}(j=1,2,\cdots,2L_a)$ 可表示为[20]:

$$\boldsymbol{C}_{n_0}^{n_j}=\begin{bmatrix}1&\phi_{zj}&-\phi_{yj}\\-\phi_{zj}&1&\phi_{xj}\\\phi_{yj}&-\phi_{xj}&1\end{bmatrix} \tag{27}$$

3)分布在姿态角 $\boldsymbol{a}_0$ 两边的 $2L_a$ 个采样点所对应的方向余弦矩阵为 $\boldsymbol{C}_b^{n_j}=\boldsymbol{C}_b^{n_0}\cdot\boldsymbol{C}_{n_0}^{n_j}$,进行姿态计算可得姿态采样点;4)假设姿态均值所对应的方向余弦矩阵为 $\bar{\boldsymbol{C}}_n^b$,并选取 $\bar{\boldsymbol{C}}_b^n=\boldsymbol{C}_b^{n_0}$,利用步骤 3)计算的 $2L_a$ 个姿态采样点依次计算出平台角误差向量 $\boldsymbol{\varphi}_j$,则 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 对应的转换矩阵为 $\boldsymbol{C}_{n_0}^{n_j}=[\boldsymbol{C}_b^{n_0}]^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{C}_b^{n_j}$;5)平台角误差向量 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 的均值可表示为 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}=\sum_{j=0}^{2L_a}W_j^m\boldsymbol{\varphi}_j$;6)把 $\boldsymbol{\varphi}_j$ 和 $\bar{\boldsymbol{\varphi}}$ 代入到式(9)可得到姿态角协方差矩阵。

同理,对于姿态融合,式(19)中的姿态值一步预测误差 $(\boldsymbol{Z}_k^j-\hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1}^j)$ 也不是姿态角的单纯线性减法运算,必须借助于姿态角对应的姿态矩阵得到。假设 $\hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1}^j$ 对应的姿态矩阵为 $\hat{\boldsymbol{C}}_{n(k|k-1)}^b$,而 $\boldsymbol{Z}_k^j$ 对应的姿态矩阵为 $\boldsymbol{C}_{n(k)}^b(=[\boldsymbol{C}_{b(k)}^n]^{\mathrm{T}})$,则有:

$$\boldsymbol{C}_n^{n'}=\boldsymbol{C}_{b(k)}^n\cdot[\boldsymbol{C}_{n'(k|k-1)}^b]^{\mathrm{T}} \tag{28}$$

根据式(27)的定义,可以得到:

$$(\boldsymbol{Z}_k-\hat{\boldsymbol{Z}}_{k|k-1})\triangleq\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}_n^{n'}(2,3)\\\boldsymbol{C}_n^{n'}(3,1)\\\boldsymbol{C}_n^{n'}(1,2)\end{bmatrix} \tag{29}$$

其中,$\boldsymbol{C}_n^{n'}(2,3)$ 代表矩阵 $\boldsymbol{C}_n^{n'}$ 的第 2 行第 3 列元素。

3 仿真分析

为了验证本文算法在多传感器组合导航系统中的有效性及性能,以 GNSS/CNS/SINS 多传感器组合导航系统为例,并在 MATLAB 环境下进行了仿真验证。

假设 GNSS 对应子滤波器 1,其量测方程为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}^1(t)=\boldsymbol{H}^1(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}^1(t)\\\boldsymbol{Z}^1(t)=[v_E\quad v_N\quad v_U\quad\lambda\quad L\quad H]^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{H}^1(t)=[\boldsymbol{0}_{6\times3}\quad\boldsymbol{I}_{6\times6}]\end{cases} \tag{30}$$

假设 CNS 对应子滤波器 2,量测方程为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{Z}^2(t)=\boldsymbol{H}^2(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{V}^2(t)\\\boldsymbol{Z}^2(t)=[\gamma\quad\theta\quad\varphi]^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{H}^2(t)=[\boldsymbol{I}_{3\times3}\quad\boldsymbol{0}_{3\times6}]\end{cases} \tag{31}$$

3.1 仿真条件

以飞行器作为仿真对象,初始姿态设为载体水平且航向角为 90°,初始位置(118°、29°、50 m);捷联解算周期为 0.02 s;各子滤波器的滤波周期均为 1 s。滤波初始参数设置如下:三维位置误差均为 5 m、三维速度误差均为 0.1 m/s、三维姿态角误差均为 0.5°。设定陀螺随机游走驱动噪声及加速度计白噪声均为 1°/h;加速度计随机游走驱动噪声及陀螺白噪声均为 10^{-4} g。CNS 测量误差为 300″,GNSS 位置误差及测速误差分别为 8 m 及 0.2 m/s,二者采样周期为均 1 s。飞行器飞行航迹包含各种机动过程,仿真时间为 3 600 s,如图 2 所示。

3.2 多传感器组合导航联邦 UKF 性能分析

基于上述条件,在相同的导航传感器仿真原始数据下,图 3~5 分别给出基于联邦 UKF 及基于联邦线性卡尔曼滤波器[15-17](联邦线性 KF)的 GNSS/CNS/SINS 多传感器组合导航的位置误差、速度误差及姿态误差对比曲线。对比图 3~5 中同一类导航参数误差,联邦 UKF 的滤波效

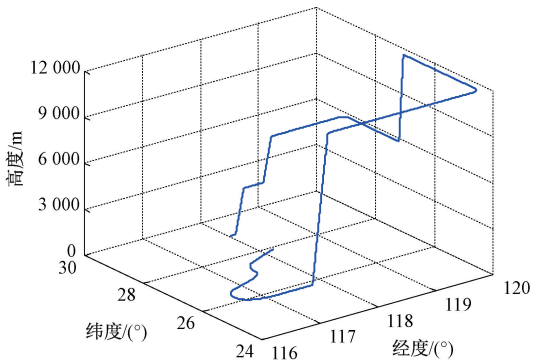

图 2　载体飞行轨迹

Fig. 2　Flight trajectory of carrier

果优势比较明显。

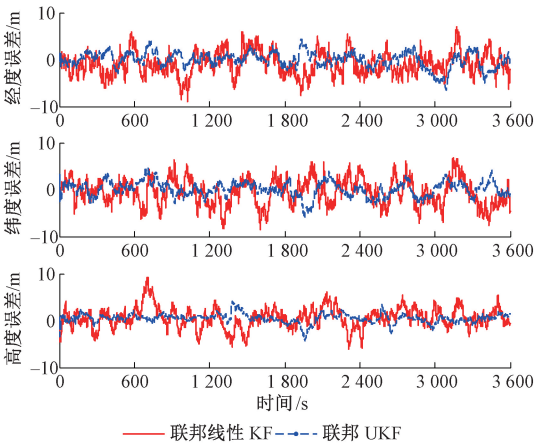

图 3　位置误差对比曲线

Fig. 3　Position error comparison curve

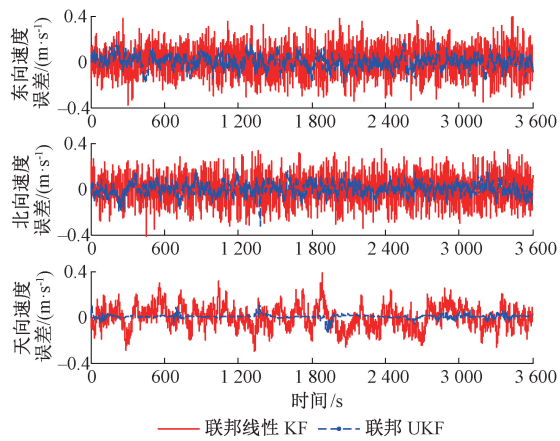

图 4　速度误差对比曲线

Fig. 4　Velocity error comparison curve

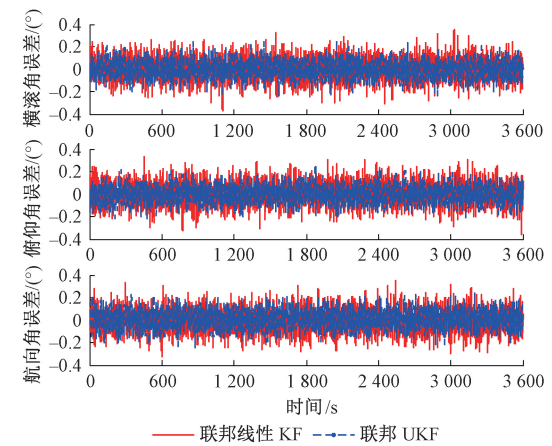

图 5　姿态误差对比曲线

Fig. 5　Altitude error comparison curve

为了更详细体现本文算法的性能，表 1 列出基于联邦 UKF 算法及联邦线性卡尔曼滤波的多传感器组合导航实验结果统计对比数据。从表 1 可以更明显看出联邦 UKF 的优势，相对于常规联邦滤波算法，本文算法得到的位置、速度及姿态精度分别提高 25.8%、38.8% 及 22.2%。

表 1　实验结果数据统计对比

Table 1　Statistical comparison of experimental results

算法类型	统计量	经度误差/m	纬度误差/m	高度误差/m	东向速度误差/($m\cdot s^{-1}$)	北向速度误差/($m\cdot s^{-1}$)	天向速度误差/($m\cdot s^{-1}$)	横滚角误差/(°)	俯仰角误差/(°)	航向角误差/(°)
联邦 UKF 算法	最大值	5.06	4.56	4.19	0.19	0.18	0.10	0.26	0.24	0.24
	最小值	−7.04	−6.11	−4.29	−0.18	−0.33	−0.13	−0.24	−0.22	−0.24
	均方差	1.57	1.47	1.17	0.073	0.077	0.042	0.07	0.07	0.07
常规联邦滤波算法	最大值	7.01	6.51	9.24	0.47	0.35	0.39	0.35	0.34	0.35
	最小值	−9.35	−8.53	−6.39	−0.38	−0.45	−0.29	−0.37	−0.36	−0.32
	均方差	2.46	2.27	1.96	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09

3.3　联邦 UKF 容错性能仿真

为了验证联邦 UKF 的容错性能，以图 2 航迹为基础进行了前 1 000 s 的仿真，在时间区间 401～700 s 期间，GNSS 的位置及速度加入硬故障，硬故障大小为正常误差的 5 倍(相对于随机误差的倍数)。

取式(26)中 $\alpha^j = 0.005(j = 1,2)$，此时子滤波器 1 和

子滤波器 2 的检测门限分别是 18.5 和 12.8。图 6~8 为采用故障隔离算法后得到的组合导航系统速度误差、位置误差与姿态误差,而图 9 为各子滤波器的残差故障检测函数结果。从图 6~8 可以看出,当 GNSS 发生故障后,系统能快速检测到该故障并进行隔离,隔离后系统可以获得较好的导航精度。

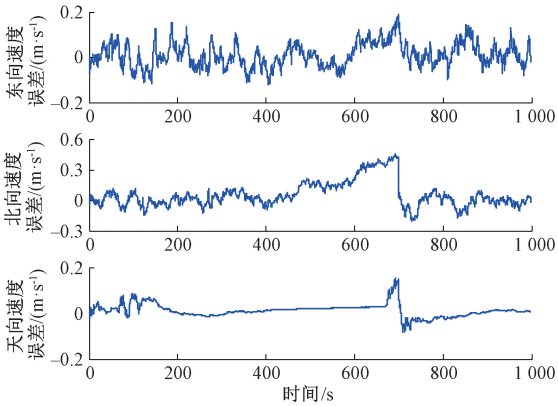

图 6 GNSS 硬故障时基于联邦 UKF 的组合导航速度误差

Fig. 6 Integrated navigation's speed error based on federated UKF when hard fault in GNSS

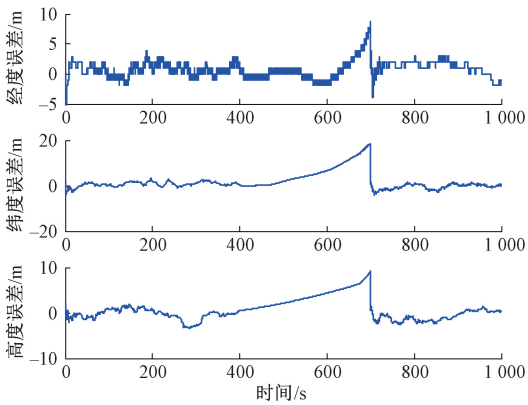

图 7 GNSS 硬故障时基于联邦 UKF 的组合导航位置误差

Fig. 7 Integrated navigation's position error based on federated UKF when hard fault in GNSS

4 结 论

多传感器组合导航系统的状态方程具有典型的非线性特性,而常用的各辅助导航传感器对应的量测方程具有线性特性。为此,本文首先对标准 UKF 算法进行简化进而降低了该算法的复杂度,在建立多传感器组合导航系统非线性状态方程及各子滤波器线性量测方程的基础

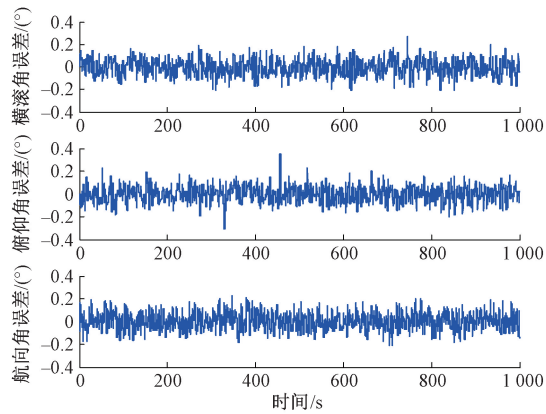

图 8 GNSS 硬故障时基于联邦 UKF 的组合导航姿态误差

Fig. 8 Integrated navigation's altitude error based on federated UKF when hard fault in GNSS

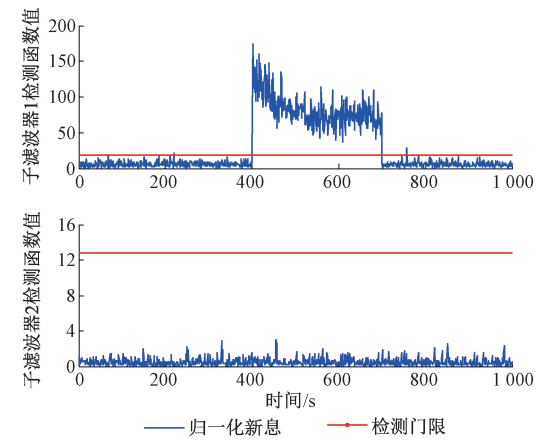

图 9 GNSS 硬故障时子滤波器残差故障检测函数值

Fig. 9 Sub-filters residual fault detection function value when hard fault in GNSS

上,结合联邦滤波算法流程提出了联邦 UKF 算法并给出了算法的计算步骤。通过实例仿真证明,该算法可行、且具有滤波精度高的优势。

为了验证本文算法的容错性能,设计了故障检测函数,实例仿真结果表明该算法对子系统发生的故障能实时检测并隔离;当子系统恢复正常后,整个系统也迅速恢复到正常状态。由于本文的研究重点不在故障检测算法的研究,而仅在于验证该算法有无容错性能,所以仅对硬故障进行了仿真研究。

参考文献

[1] HLINA O, MEYER F, HLAWATSC H, et al. Sigma point belief propagation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(2): 145-149.

[2] INAM U, YU S, XIN S. A localization based on

unscented Kalman filter and particle filter localization algorithms[J]. IEEE Access, 2020, 8: 2232-2245.

[3] CUI B B, CHEN X Y, TANG X H. Improved cubature Kalman filter for GNSS/INS based on transformation of posterior sigma-points error[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(11):2975-2987.

[4] YE W, LI J L, FANG J C, et al. EGP-CDKF for performance improvement of the SINS/GNSS integrated system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3601-3609.

[5] 沈凯, 刘庭欣, 左思琪, 等. 复杂城市环境下 GNSS/INS 组合导航可观测度分析及鲁棒滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 252-261.
SHEN K, LIU T X, ZUO S Q, et al. Observability analysis and robust fusion algorithms of GNSS/INS integrated navigation in complex urban environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 252-261.

[6] HU H D, HUANG X L. SINS/CNS/GPS integrated navigation algorithm based on UKF[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1): 102-109.

[7] 孟阳, 高杜生, 高兵, 等. 基于 UKF 的 INS/GNSS/CNS 组合导航最优数据融合方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(6): 746-751.
MENG Y, GAO D SH, GAO B, et al. UKF-based optimal data fusion method for integrated INS/GNSS/CNS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(6): 746-751.

[8] 李伟, 郝顺义, 黄国荣, 等. 改进自适应 ADMCC-HCKF 算法及在 SINS/CNS/GNSS 中的应用[J]. 电子测量及仪器学报, 2021, 35(8): 79-65.
LI W, HAO SH Y, HUANG G R, et al. Improved adaptive ADMCC-HCKF algorithm and application in SINS/ CNS/GNSS integrated navigation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 79-65.

[9] 潘加亮, 熊智, 王丽娜, 等. 一种简化的发射系下 SINS/GPS/CNS 组合导航系统无迹卡尔曼滤波算法[J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 485-491.
PAN J L, XIONG ZH, WANG L N, et al. A simplified UKF algorithm for SINS/GPS/CNS integrated navigation system in launch inertial coordinate system[J]. Acta Armamentarh, 2015, 36(3): 485-491.

[10] 张伟, 张晓, 王伟, 等. 基于联邦 UPF 的火星环绕器测角测距组合导航算法研究[J]. 中国科学. 技术科学, 2020, 50(9): 1175-1184.
ZHANG W, ZHANG X, WANG W, et al. Mars orbiter integrated navigation algorithm for angle and range measurement based on federal UPF[J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(9): 1175-1184.

[11] 李荣冰, 刘建业, 赖际舟, 等. Sigma-Point 直接式卡尔曼滤波惯性组合导航算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1018-1022.
LI R B, LIU J Y, LAI J ZH, et al. Sigma-point direct Kalman filtering algorithm for inertial integrated navigation system[J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 1018-1022.

[12] 马晓杰, 林雪原, 孙巧妍. 一种改进的 UKF 滤波算法在 BDS/SINS 组合导航系统中的应用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(4): 351-356.
MA X J, LIN X Y, SUN Q Y. Improved UKF algorithm of BDS/SINS integrated navigation system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4): 351-356.

[13] 戴卿, 隋立芬, 田源, 等. 变分优化的高斯混合滤波及其在导航中的应用[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2019, 44(5): 699-705.
DAI Q, SUI L F, TIAN Y, et al. Gaussian mixture filter based on variational bayesian learning optimization and its application to integrated navigation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(5): 699-705.

[14] 占荣辉, 张军, 欧建平, 等. 非线性滤波理论与目标跟着应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
ZHAN R H, ZHANG J, OU J P, et al. Nonlinear Filtering Theory with Target Tracking Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.

[15] 林雪原, 李荣冰, 高青伟. 组合导航及其信息融合方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
LIN X Y, LI R B, GAO Q W. Integrated Navigation and its Information Fusion Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.

[16] 崔展博, 景博, 焦晓璇, 等. 基于联邦卡尔曼滤波器的容错组合导航系统设计[J]. 电子测量及仪器学报, 2021, 35(11): 143-153.
CUI ZH B, JING B, JIAO X X, et al. Design of fault-tolerant integrated navigation system based on federated Kalman filter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 143-153.

[17] 姚晓涵, 陈帅, 杨博, 等. 基于联邦滤波的异质异步多传感器组合导航算法[J]. 航天控制, 2021, 39(5): 27-31.
YAO X H, CHEN SH, YANG B, et al. Integrated navigation algorithm for heterogeneous and asynchronous multi-sensor based on federated filter[J]. Aerospace Control, 2021, 39(5): 27-31.

[18] 苗岳旺, 周巍, 田亮, 等. 基于信息 χ2 检测的扩展抗差卡尔曼滤波及其应用[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2016, 41(2):269-273.
MIAO Y W, ZHOU W, TIAN L, et al. Extended robust Kalman filter based on innovation chi-square test algorithm and its application [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(2): 269-273.

[19] 赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS 单系统及多系统组合完好性分析[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2020, 45(1):72-80.
ZHAO ANG, YANG Y X, XU Y Y, et al. Integrity analysis of GNSS single system and multi-system combination[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1):72-80.

[20] 李群生, 赵剡, 鲁浩, 等. 捷联惯导/天文导航/合成孔径雷达组合导航系统[J] 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2667-2674.
LI Q SH, ZHAO Y, LU H, et al. Strapdown inertial navigation/celestial navigation/synthetic aperture radar integrated navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2667-2674.

作者简介

朱璐瑛,2005 年于青岛大学获得学士学位,2009 年于烟台大学获得硕士学位,现为烟台南山学院讲师,主要研究方向为导航技术及其信息处理。
E-mail: 563883971@qq.com

Zhu Luying received her B. Sc. degree from Qingdao University in 2005 and her M. Sc. degree from Yantai University in 2009 respectively. Now she is a lecturer in Yantai Nanshan University. Her main research interests include navigation technology and its information processing.

孙炜玮(通信作者),2012 年于烟台大学获得学士学位,2015 年于辽宁师范大学获得硕士学位,现为海军航空大学讲师,主要研究方向为导航技术、目标识别。
E-mail: s353375092@126.com

Sun Weiwei (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Yantai University in 2012 and her M. Sc. degree from Liaoning Normal University in 2015 respectively. Now she is a lecturer in the Institute of Information Fusion of Naval Aviation University of China. Her main research interests include navigation technology and target recognition.