SINS/GNSS/CNS组合导航自适应容错联邦滤波方法

张 闯¹, 赵修斌¹, 庞春雷^{1†}, 冯 波², 高 超¹

(1. 空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院,陕西 西安 710051)

摘要: 针对子系统发生缓变故障会影响联邦滤波器精度的问题,分析了信息分配因子对子滤波器精度和鲁棒 性、全局估计精度以及故障检测效率的影响. 在此基础上,研究了一种自适应容错联邦滤波方案. 通过对量测噪声 阵进行自适应调节来降低未检测出来的故障信息对故障子滤波器和全局估计精度的影响,进而提升无故障子滤波 器的精度和系统重构能力;根据子滤波器故障检测函数值来动态调节信息分配因子,可进一步提升故障检测效率. 仿真结果表明,相比于传统的容错联邦滤波,该方法能有效降低故障信息对滤波精度的影响,具有较高的全局估计 精度.

关键词:组合导航;联邦滤波;信息分配因子;容错

引用格式: 张闯, 赵修斌, 庞春雷, 等. SINS/GNSS/CNS组合导航自适应容错联邦滤波方法. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1469 – 1476

DOI: 10.7641/CTA.2019.80482

Adaptive fault tolerance federated filter method for SINS/GNSS/CNS integrated navigation

ZHANG Chuang¹, ZHAO Xiu-bin¹, PANG Chun-lei^{1†}, FENG Bo², GAO Chao¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China;

2. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University,

Xi'an Shaanxi 710051, China)

Abstract: The gradual fault that occurs on the subsystem will have a bad influence on the accuracy of federated filter. To solve this problem, the influence of information sharing factor on the robustness and accuracy of local filters, the accuracy of global estimation, and the fault detection rate is investigated. On this basis, an adaptive fault tolerance federated filter scheme is presented. First, the measurement noise covariance matrix is adjusted adaptively to reduce the influence of missed detection fault on the faulty sub-filter and global estimation, which can improve the precision of normal sub-filter and the reconstruction ability of system in return. Then, the information sharing factor is adjusted dynamically basing on the fault detection function to further improve the fault detection performance. The simulation results show that, when compared with the traditional fault tolerance federated filter, this method can reduce the influence of fault on filter accuracy effectively, and has better global accuracy.

Key words: integrated navigation; federated filter; information sharing factor; fault tolerance

Citation: ZHANG Chuang, ZHAO Xiubin, PANG Chunlei, et al. Adaptive fault tolerance federated filter method for SINS/GNSS/CNS integrated navigation. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1469 – 1476

1 引言

联邦滤波具有设计灵活、计算量小等优势,因此被 广泛应用于多传感器容错组合导航中^[1-3]."信息分 配"是联邦滤波器设计中的一个关键问题,直接影响 联邦滤波器的容错性和精度等性能^[4-5]. Carlson最早 提出的信息分配原则是固定平均分配的^[6];为进一步 提高联邦滤波器的性能,有学者开展了动态信息分配 方法的研究^[7-10]. 其中, 文献[7]利用残差的理论协方 差与估计的协方差之间的差异来构建自适应分配因 子, 文献[8]推导了联邦滤波器子滤波器与自适应滤波 器之间的等价性, 在此基础上构建了自适应联邦滤波 器, 文献[9]提出了基于子滤波器估计误差协方差阵的 动态分配方法, 文献[10]提出了基于模糊技术的信息 分配法. 但这些方法主要适用于系统无故障情况.

收稿日期: 2018-06-29; 录用日期: 2019-01-11.

[†]通信作者. E-mail: chunleipcl@163.com; Tel.: +86 29-84791331.

本文责任编委: 胡德文.

国家自然科学基金项目(61601506)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61601506).

在联邦滤波中,多采用系统级的故障检测法,当某 一子系统被检测出故障后,直接隔离该故障系统,利 用剩余的无故障子系统进行重构以实现容错处理.但 是,缓变的软故障需要积累到一定程度后才能被检测 到,此时系统的全局估计已受故障污染,且由于反馈 重置使得其他无故障子系统也被污染.利用受污染的 子滤波器进行重构,故障信息的影响会在较长时间内 持续.针对该问题,文献[11-12]从提高无故障子滤波 器的鲁棒性角度出发,研究了几种自适应动态信息分 配方法,提升了联邦滤波器的快速重构能力; 文献[13] 提出了一种新的容错联邦滤波结构,通过构造时变的 量测噪声和信息分配参数来取代传统的故障隔离及 重构模块,提高了组合导航系统在子系统故障期间的 性能.但是以上方法没有分析信息分配因子对故障子 滤波器检测效率的影响,而在实际中尽快检测并隔离 故障子系统对于降低故障对全局的污染、提升全局估 计精度具有十分重要的意义.

因此,为提高捷联惯导(strapdown inertial navigation system, SINS)/全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)/天文导航系统(celestial navigation system, CNS)组合导航性能,本文首先分析 了信息分配因子对子滤波器精度和鲁棒性、全局估计 精度以及故障检测效率的影响.在此基础上提出了一 种新的自适应容错联邦滤波方案,通过对系统量测噪 声阵和信息分配因子自适应调节,降低了故障观测量 对全局状态估计影响,提升了故障检测效率和全局估 计精度.

2 联邦滤波原理

联邦滤波是一种并行两级结构的分散化滤波,每 个局部传感器与公共参考系统构成一个子系统,由一 个子滤波器来处理.主滤波器将各个子滤波器的状态 估计信息进行融合,得到全局最优估计,同时,按照信 息分配准则将系统融合后的信息分配给各子滤波器. 联邦滤波器的一般结构如图1所示.





设有n个子系统,主滤波器和子滤波器具有相同的 状态变量,则系统状态方程和第i个子滤波器的量测方 程可表示为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1,k} X_k + \Gamma_{k+1,k} W_k,$$
(1)

$$Z_{k+1}^{i} = H_{k+1}^{i} X_{k+1} + V_{k+1}^{i}, \qquad (2)$$

式中: W_k的协方差矩阵为Q, Vⁱ_{k+1}的协方差矩阵为 R_i. 联邦滤波包括信息分配、子滤波器时间更新和量 测更新、主滤波器信息融合3个过程, 具体方程如下:

1) 信息分配.

$$\begin{cases} \left(Q_{k}^{i}\right)^{-1} = \beta_{i}Q^{-1}, \\ \left(P_{k}^{i}\right)^{-1} = \beta_{i}\left(P_{k}^{g}\right)^{-1}, \quad \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} = 1, \\ \hat{X}_{k}^{i} = \hat{X}_{k}^{g}. \end{cases}$$
(3)

子滤波器时间更新和量测更新.
 时间更新:

$$\bar{X}_{k+1/k}^{i} = \Phi_{k+1,k} \hat{X}_{k}^{i}, \tag{4}$$

$$\bar{P}_{k+1/k}^{i} = \Phi_{k+1,k} P_{k}^{i} \Phi_{k+1,k}^{\mathrm{T}} + \Gamma_{k+1,k} Q_{k}^{i} \Gamma_{k+1,k}^{\mathrm{T}}.$$
 (5)

量测更新:

$$K_{k+1}^{i} = P_{k+1}^{i} (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}} R_{i}^{-1},$$
(6)

$$X_{k+1}^{i} = X_{k+1/k}^{i} + K_{k+1}^{i} (Z_{k+1}^{i} - H_{k+1}^{i} X_{k+1/k}^{i}), \quad (7)$$

$$P_{k+1}^{\circ})^{-1} = (P_{k+1/k}^{\circ})^{-1} + (H_{k+1}^{\circ})^{-1} R_i^{-1} H_{k+1}^{\circ}.$$
(8)

3) 主滤波器信息融合.

$$(P_{k+1}^{g})^{-1} = \sum_{i=1}^{n} (P_{k+1}^{i})^{-1},$$
(9)

$$\hat{X}_{k+1}^{g} = P_{k+1}^{g} \sum_{i=1}^{n} \left(P_{k+1}^{i} \right)^{-1} \hat{X}_{k+1}^{i}.$$
 (10)

3 信息分配因子对滤波器性能的影响分析 3.1 信息分配因子对子滤波器精度的影响

当子滤波器和主滤波器具有相同的状态量和状态 方程时,子滤波器i的一步预测协方差矩阵可写为

$$\bar{P}_{k+1/k}^{i} = \beta_{i}^{-1} \bar{P}_{k+1/k}^{g}, \qquad (11)$$

式中 $\bar{P}_{k+1/k}^{g}$ 为k+1时刻主滤波器的状态一步预测协方差矩阵,有

 $\bar{P}_{k+1/k}^{g} = \Phi_{k+1,k} P_{k}^{g} \Phi_{k+1,k}^{T} + \Gamma_{k+1,k} Q \Gamma_{k+1,k}^{T},$ 相应的状态一步预测为 $\bar{X}_{k+1/k}^{g} = \Phi_{k+1,k} \hat{X}_{k}^{g}.$ 将式(11)代入式(8), 可得

$$(P_{k+1}^i)^{-1} = (\bar{P}_{k+1/k}^g)^{-1} \beta_i + (H_{k+1}^i)^{\mathrm{T}} R_i^{-1} H_{k+1}^i.$$
(12)

由上式可知,信息分配因子 β_i 越大, $(P_{k+1}^i)^{-1}$ 越大, P_{k+1}^i 越小,子滤波器估计精度越高.反之, β_i 越小, P_{k+1}^i 越大,子滤波器估计精度越低.实际上,信息分配 因子反映了子滤波器对融合信息的利用程度, β_i 越大, 对融合信息的利用权重越大,融合精度越高.

3.2 信息分配因子对子滤波器鲁棒性的影响

对于子滤波器i,其状态估计可表示为

$$\hat{X}_{k+1}^{i} = \bar{X}_{k+1/k}^{i} + K_{k+1}^{i}(Z_{k+1}^{i} - H_{k+1}^{i}\bar{X}_{k+1/k}^{i}) =$$

张闯等: SINS/GNSS/CNS组合导航自适应容错联邦滤波方法

$$[(\bar{P}_{k+1/k}^{g})^{-1} + \beta_{i}^{-1}(H_{k+1}^{i})^{T}R_{i}^{-1}H_{k+1}^{i}]^{-1} \times (\bar{P}_{k+1/k}^{g})^{-1}\bar{X}_{k+1/k}^{g} + [\beta_{i}(\bar{P}_{k+1/k}^{g})^{-1} + (H_{k+1}^{i})^{T}R_{i}^{-1}H_{k+1}^{i}]^{-1}(H_{k+1}^{i})^{T}R_{i}^{-1}Z_{k+1}^{i} = w_{x}\bar{X}_{k+1/k}^{g} + w_{z}Z_{k+1}^{i},$$
(13)

其中:

$$w_{\mathbf{x}} = [(\bar{P}_{k+1/k}^{\mathbf{g}})^{-1} + \beta_{i}^{-1}(H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}}R_{i}^{-1}H_{k+1}^{i}]^{-1} \times (\bar{P}_{k+1/k}^{\mathbf{g}})^{-1},$$

$$w_{\mathbf{z}} = [\beta_{i}(\bar{P}_{k+1/k}^{\mathbf{g}})^{-1} + (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}}R_{i}^{-1}H_{k+1}^{i}]^{-1} \times (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}}R_{i}^{-1}.$$

可以看出w_x代表了子滤波器估计对全局一步预测 的利用程度,即受全局反馈重置的影响程度;w_z代表 了子滤波器对自身量测信息的利用程度.β_i越大,w_x 越大,w_z越小,子滤波器对全局融合估计的利用程度 越大,对自身的量测信息利用程度越小.

当子滤波器i的量测 Z_{k+1}^i 发生故障而未被检测隔 离时,全局融合估计 $\bar{X}_{k+1/k}^g$ 已被污染,对于其他无故 障子滤波器j来说,若信息分配因子 β_j 越大,其受反馈 重置的影响越大,故障子滤波器对它的污染越严重; 反之,信息分配因子 β_j 越小,其对自身量测利用越大, 受故障子滤波器污染越小.

3.3 信息分配因子对全局估计结果的影响

将式(11)和式(8)代入式(9),可得k+1时刻全局融 合估计误差协方差矩阵为

$$(P_{k+1}^{g})^{-1} = \sum_{i=1}^{n} (P_{k+1}^{i})^{-1} =$$

$$(\bar{P}_{k+1/k}^{g})^{-1} \sum_{i=1}^{n} \beta_{i} + \sum_{i=1}^{n} (H_{k+1}^{i})^{T} R_{i}^{-1} H_{k+1}^{i} =$$

$$(\bar{P}_{k+1/k}^{g})^{-1} + \sum_{i=1}^{n} (H_{k+1}^{i})^{T} R_{i}^{-1} H_{k+1}^{i}.$$
(14)

将式(7)-(8)代入式(10), 有k + 1时刻全局融合状态估计为

$$\hat{X}_{k+1}^{g} = P_{k+1}^{g} \sum_{i=1}^{n} (P_{k+1}^{i})^{-1} \hat{X}_{k+1}^{i} = P_{k+1}^{g} [(P_{k+1}^{g})^{-1} \bar{X}_{k+1/k}^{i} + \sum_{i=1}^{n} (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}} R_{i}^{-1} (Z_{k+1}^{i} - H_{k+1}^{i} \bar{X}_{k+1/k}^{i})].$$
(15)

由式(14)-(15)可以看出, $\hat{X}_{k+1}^{g} 和 P_{k+1}^{g}$ 都与信息分 配因子 β_i 无关, 也就是说, 信息分配因子不会影响全 局估计的最优性. 当某一子系统发生故障而未被隔离 时, 会污染全局估计, 且对全局估计的污染程度不受 信息分配因子影响. 因此, 若要提升全局估计精度, 一 方面可以从降低故障观测对故障子系统的影响着手, 提升故障子系统的精度从而来保证全局估计的精度; 另一方面通过调节信息分配因子使得故障子系统能 够更快地检测并隔离故障.

3.4 信息分配因子对故障检测效率的影响

组合导航系统常采用基于残差的χ²检验法来进行 故障检测,该方法通过检验残差向量是否服从已知均 值和方差的高斯分布来判断系统是否出现故障.

对于子滤波器i, k时刻的状态一步预测为

$$\bar{X}_{k/k-1}^{i} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}^{g}.$$
(16)

一步预测协方差矩阵为

$$\bar{P}_{k/k-1}^{i} = \beta_{i}^{-1} \bar{P}_{k/k-1}^{g}.$$
(17)

残差向量为

$$v_k^i = Z_k^i - H_k^i \bar{X}_{k/k-1}^i.$$
(18)

残差序列协方差矩阵为

$$P_{vk}^{i} = H_{k}^{i} \bar{P}_{k/k-1}^{i} (H_{k}^{i})^{\mathrm{T}} + R_{i}.$$
 (19)

构造故障检测函数为

$$\Lambda_k^i = (v_k^i)^{\rm T} (P_{\rm vk}^i)^{-1} v_k^i.$$
(20)

由残差统计特性可知, Λ_k^i 服从自由度为n的 χ^2 分 布^[14], 其中n为观测向量的维数. 设虚警概率为 α ,则 有 $P\{\Lambda_k^i > T_d^i\} = \alpha$, T_d^i 为由虚警概率得到的门限.则故障判别准则为

$$\begin{cases} \Lambda_k^i > T_d^i, \; \bar{f}$$
在故障,
 $\Lambda_k^i \leqslant T_d^i, \; \bar{f}$ 不存在故障. (21)

由式(20)可知,故障检测函数与残差及其协方差 矩阵有关,残差越大,协方差矩阵越小,故障检测函数 越大,故障越容易被检测出来.对于缓变的软故障,由 于刚开始故障幅值较小,受量测噪声的影响故障检测 函数波动较大,不能准确判断故障起始时刻,只有当 故障幅值达到一定程度后才能给出故障告警信息而 不发生漏警现象.因此,对于信息分配因子对故障检 测效率的影响,从以下两阶段进行分析:

 1) 故障被检测隔离前信息分配因子对故障检测 效率的影响分析.

由式(16)可知,故障隔离前各子系统的状态估计 由全局融合结果反馈得到,且与信息分配因子无关, 因此,故障检测函数只与残差协方差有关.

由式(19)-(20)可知,故障检测函数与残差协方差 负相关,残差协方差与状态一步预测协方差正相关. 式(17)表明,状态一步预测协方差与信息分配因子负 相关,也就是说,子滤波器信息分配因子越大,状态一 步预测协方差越小,残差协方差也越小,故障检测函 数越大,越容易检测出故障;反之,子滤波器信息分配 因子越小,越不容易检测出故障.

2) 故障检测隔离后信息分配因子对故障检测效 率的影响分析.

当判断故障后,故障子系统被隔离,无故障子系统的滤波估计结果参与融合,并将融合结果反馈给故障

子系统用于下一时刻的检测.

由式(12)–(13)可知,对于无故障子系统而言,信息 分配因子越大, P_{k+1}^{i} 越小,子滤波器估计精度越高,但 是 \hat{X}_{k+1}^{i} 受故障滤波器的影响越大,由前面的分析可 知,只有当 P_{k+1}^{i} 和 \hat{X}_{k+1}^{i} 同时减小时,故障检测函数才 会越大,才能更快地检测出故障.因此,调节信息分配 因子虽然能够改变子滤波器的故障检测效率,但是由 于信息分配因子对无故障子滤波器状态估计及协方 差的影响不具有一致性,因而难以准确判断故障检测 效率的变化情况.

4 SINS/GNSS/CNS自适应容错联邦滤波

4.1 SINS/GNSS/CNS组合导航模型

1) 组合导航系统状态方程.

选取东北天坐标系为导航坐标系,状态变量选取为SINS、陀螺和加速度计的误差共计15维,可得系统的状态方程为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t).$$
 (22)

状态变量为

$$X = \begin{bmatrix} \phi_{\rm E} & \phi_{\rm N} & \phi_{\rm U} & \delta v_{\rm E} & \delta v_{\rm N} & \delta v_{\rm U} \\ \delta L & \delta \lambda & \delta h & \varepsilon_{\rm x} & \varepsilon_{\rm y} & \varepsilon_{\rm z} & \nabla_{\rm x} & \nabla_{\rm y} & \nabla_{\rm z} \end{bmatrix}^{\rm T},$$
(23)

式中: $\phi_{\rm E}$, $\phi_{\rm N}$, $\phi_{\rm U}$ 为数学平台失准角; $\delta v_{\rm E}$, $\delta v_{\rm N}$, $\delta v_{\rm U}$ 分别为载体东向、北向和天向的速度误差; δL , $\delta \lambda$, δh 分别为纬度、经度和高度误差; $\varepsilon_{\rm x}$, $\varepsilon_{\rm y}$, $\varepsilon_{\rm z}$ 为陀螺随 机常值零偏; $\nabla_{\rm x}$, $\nabla_{\rm y}$, $\nabla_{\rm z}$ 为加速度计随机常值零偏.

2) SINS/GNSS子系统量测方程.

选取SINS和GNSS输出的位置和速度之差作为滤 波观测量,则SINS/GNSS子系统量测方程可表示为



图 2 自适应容错联邦滤波结构

Fig. 2 Structure of adaptive fault tolerance federated filter

1) 故障检测与容错.

由第3.4节可知,故障在检测隔离前,故障检测函 数与信息分配因子成正比,当信息分配因子为1时, $\begin{bmatrix} V_{\rm v}(t) \\ V_{\rm p}(t) \end{bmatrix} = H_1(t)X(t) + V_1(t), \quad (24)$

式中:

$$\begin{split} H_{\rm v}(t) &= \begin{bmatrix} 0_{3\times 3} & I_{3\times 3} & 0_{3\times 9} \end{bmatrix}, \\ H_{\rm p}(t) &= \\ \begin{bmatrix} 0_{3\times 6} & {\rm diag}\{R_{\rm M}\!+\!h, (R_{\rm N}\!+\!h)\cos L, 1\} & 0_{3\times 6} \end{bmatrix}, \end{split}$$

 $R_{\rm M}, R_{\rm N}$ 分别为地球子午圈和卯酉圈曲率半径, $V_{\rm v}(t)$ 和 $V_{\rm p}(t)$ 为量测噪声,分别对应GNSS的速度和位置误差.

3) SINS/CNS子系统量测方程.

选取SINS和CNS输出的姿态之差作为滤波观测量.则SINS/CNS子系统的量测方程可表示为

$$Z_2(t) = H_2(t)X(t) + V_2(t),$$
(25)

式中: $V_2(t)$ 为量测噪声, 对应**CNS**的姿态测量误差, $H_2 = [H_{\phi} \ 0_{3 \times 12}]$, 其中 H_{ϕ} 为惯导数学平台误差角到 姿态误差角之间的转换矩阵^[15–16], 且有

$$H_{\phi} = -\frac{1}{\cos\theta} \begin{bmatrix} \sin\varphi & \cos\varphi & 0\\ \cos\varphi\cos\theta & -\sin\varphi\cos\theta & 0\\ \sin\varphi\sin\theta & \cos\varphi\sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix}, (26)$$

式中 φ 和 θ 分别为航向角和俯仰角.

4.2 自适应容错联邦滤波方案

由第3节分析可知, 残差检验法对于缓变的软故障 会存在一定的检测延时, 在故障被检测隔离前会污染 全局估计, 且污染程度不受信息分配因子的影响; 为 快速检测出故障、降低故障子滤波器对全局估计的影 响, 提升系统鲁棒性和重构能力, 设计了如图2所示的 自适应容错联邦滤波结构.



残差协方差矩阵 \bar{P}^i_{vk} ,即

$$\bar{P}_{vk}^{i} = H_k \bar{P}_{k/k-1}^{g} H_k^{T} + R_i.$$
(27)

新的故障检测函数为

$$\bar{A}_{k}^{i} = v_{ik}^{\mathrm{T}} (\bar{P}_{\mathrm{v}k}^{i})^{-1} v_{ik}.$$
(28)

显然, $\bar{\Lambda}_k^i > \Lambda_k^i$.

此外,故障在被检测出来之前,会影响子滤波器 精度,进而会对全局估计结果造成影响.为降低缓 变故障对全局估计的污染,在此引入自适应滤波.

当观测量中出现缓变软故障时,会改变残差的统计特性,而残差的统计特性与量测噪声阵有关,因此,可以根据残差统计特性的变化对量测噪声阵进行自适应调节.

由式(19)可知,子滤波器*i*在*k*时刻的残差协方差 矩阵的理论值为

$$P_{vk}^{i} = H_{k}^{i} P_{k/k-1}^{i} (H_{k}^{i})^{\mathrm{T}} + R_{i}.$$
 (29)

利用一段窗口内的残差序列,可以得到其极大 似然估计值为

$$\hat{P}_{vk}^{i} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} v_{k-j} v_{k-j}^{\mathrm{T}}, \qquad (30)$$

其中N为估计窗口长度.则量测噪声阵自适应估计 值为

$$\hat{R}_{k}^{i} = \hat{P}_{vk}^{i} - H_{k}^{i} P_{k/k-1}^{i} \left(H_{k}^{i}\right)^{\mathrm{T}}.$$
 (31)

显然, $\hat{R}_k^i > R_k^i$. 则调节后的增益矩阵可表示为

$$\hat{K}_{k+1}^{i} = \bar{P}_{k+1/k}^{i} (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}} \times [H_{k+1}^{i} \bar{P}_{k+1/k}^{i} (H_{k+1}^{i})^{\mathrm{T}} + \hat{R}_{k}^{i}]^{-1}.$$
(32)

由上式可以看出, $\hat{K}^i_{k+1} < K^i_{k+1}$, 即通过自适应 调节量测噪声协方差矩阵减小了增益矩阵, 降低了 故障观测的利用程度, 从而提高子滤波器估计精度.

2) 动态信息分配.

由第3.4节可知,故障隔离后,故障子系统的检测 效率受无故障子系统的状态估计及其协方差矩阵影 响,且与信息分配因子有关.通过上一节对量测噪 声矩阵的自适应调节可有效降低故障对故障子系统 状态估计的影响,提升全局估计和无故障子系统精 度.由式(13)(15)可知,当各子滤波器都具有较高的 估计精度时,信息分配因子对各滤波器状态估计的 影响也就越小,各滤波器状态估计与全局估计相 当.

由式(14)可知,故障隔离后全局估计精度主要取 决于一步预测精度,而一步预测协方差与上一时刻 无故障子滤波器的精度正相关,无故障子滤波器精 度越高,即Pⁱ滤越小,P^g_{k+1/k}越小,全局估计协方差 P_{k+1}^{g} 越小;另外,由第3.4节分析可知,当状态估计 一定时,隔离故障子系统后故障检测效率只与无故 障子滤波器估计协方差矩阵 P_{k}^{i} 有关,且 P_{k}^{i} 越小,故 障检测效率越高,而 P_{k+1}^{i} 与 β_{i} 成负相关, β_{i} 越大, P_{k}^{i} 越小.也就是说无故障子系统的信息分配因子越大, 故障隔离后全局估计精度和故障检测效率越高.因 此,可以根据子滤波的故障程度来自适应调节信息 分配因子.

设第i个子滤波器的故障检测函数为 $\bar{\Lambda}_{k}^{i}$,由误警率 α 确定的检测门限为 T_{di} ,则有

$$\beta_i = \frac{T_{\mathrm{d}i}/\bar{A}_k^i}{\sum\limits_{i=1}^N T_{\mathrm{d}i}/\bar{A}_k^i},\tag{33}$$

式中 $\bar{\Lambda}_k^i/T_{di}$ 为检测函数与检测门限的比值,在一定 程度上反映了子滤波器的故障程度,该值越大故障 程度越严重.利用式(33)对信息分配因子进行自适 应调节,可以看出故障程度越大的子滤波器分配的 信息因子越小,而正常子滤波器可以分配到更大的 信息因子.由第3.4节的分析可知,该方法能够进一 步提升故障检测效率及全局估计精度.

综上所述,本文方法的具体步骤可总结如下:

1) *k*时刻各子滤波器利用主滤波器分配和重置的参数进行卡尔曼滤波时间更新.

2) 故障检测. 为提高故障检测效率, 利用主滤 波器的一步预测协方差阵 \bar{P}^{g}_{kk-1} 代替反馈重置后子 滤波器解算的一步预测协方差阵来解算残差协方差 阵 \bar{P}^{i}_{vk} 和故障检测函数值 $\bar{\Lambda}^{i}_{k}$.

3) 若故障检测函数小于门限值,则判定该子系统无故障,为防止因故障值过小未被检测出来造成漏警现象,导致滤波精度下降,采用自适应滤波对量测噪声阵进行在线调节,降低故障观测的影响. 在完成全局融合估计后,按照本文的动态信息分配方法对各子滤波器参数进行重置.

4) 若故障检测函数大于门限值,则判定该子系统故障,该子滤波器的结果不参与融合估计,全局估计结果为另一正常子系统的滤波估计.同时,该故障子系统的状态被重置为全局估计结果.

5) k时刻的故障检测与容错处理完成,下一时 刻返回步骤1.

5 仿真及分析

模拟飞机机动飞行,仿真轨迹包括匀加速、爬升、转弯、匀速平飞、俯冲等运动状态,假设陀螺随机常值漂移为0.1(°)/h,加速度计随机常值漂移为 10 μg,输出频率为100 Hz, CNS输出频率为1 Hz,姿态测量误差为5″, GNSS位置误差为10 m,速度误差 为0.1 m/s, 卡尔曼滤波周期为1 s. 仿真飞行时间为 1600 s. 误警概率 α =0.01, 则GNSS/SINS子系统的 检测门限为 T_d^1 =16.812, CNS/SINS子系统的检测门 限为 T_d^2 =11.345.

为验证本文方法的有效性,分别采用如下3种方 案进行处理:

方案 I 平均分配原则的传统联邦滤波(信息 在各子滤波器间平均分配,检测到故障后隔离故障 子系统).

方案 II 平均分配原则的带故障容错的联邦滤 波(在方案 I 的基础上引入了自适应滤波, 对量测噪 声阵进行自适应调节).

方案Ⅲ 本文自适应容错联邦滤波.

仿真试验1考虑CNS系统存在软故障,假设CNS 系统姿态输出在400 s时刻开始发生缓变故障,故障 速率为0.4(")/s,持续时间为200 s.

该故障模式下, CNS/SINS子滤波器在3种方案 下的故障检测统计量对比如图3所示.为更加直观 地表现各方案的检测效果,重点对比了故障刚发生 初期和故障隔离发生后一段时间的检测结果,分别 如图3(a)和3(b)所示.



Fig. 3 Comparison of fault detection statistics

由图3(a)可知,故障刚开始发生时,由于故障幅 值较小,各方案的检测统计量差别不大,随着时间 的推移,故障幅值逐渐增大,方案 II 和方案III由于 采用了容错处理,降低了故障观测对滤波估计结果 的影响,因此检测统计量略高于方案 I.由图3(b)可 知,随着故障幅值越来越大,采用容错处理的方案 II 和方案III其故障检测统计量明显大于方案 I,且 漏警数更少.与方案 II 相比,方案III采用了自适应 动态分配信息因子,具有更高的检测效率,检验统 计量略高于方案 II,故障漏警更少.

该故障模式下3种方案的姿态解算误差如图4所 示. 由图4可知, 当CNS姿态测量发生缓变故障时, 采用平均分配准则的联邦滤波器在故障期间其姿态 精度明显下降, 最大误差接近10"; 采用平均分配准 则带故障容错的联邦滤波其姿态精度有较大改善, 姿态误差在5"内. 采用本文的自适应容错联邦滤波 能够进一步降低故障信息对状态估计的影响, 具有 更高的姿态精度, 最大误差在3"内.



仿真试验 2 考虑到GNSS系统存在软故障, 假 设GNSS系统水平位置在600 s时刻开始发生缓变故 障, 故障速率为0.6 m/s, 故障持续时间为200 s. 该故 障模式下, GNSS/SINS子滤波器在3种方案下的故 障检测统计量对比如图5所示.

由图5可知,故障刚开始发生时,各方案的检测统计量差别不大,随着故障幅值逐渐增大,方案II和方案III由于采用了容错处理,降低了故障观测对滤波估计结果的影响,因此检测统计量略高于方案

Ⅰ.随着故障幅值越来越大,采用容错处理的方案 Ⅱ和方案Ⅲ其故障检测统计量明显大于方案Ⅰ,且 漏警数更少.与方案Ⅱ相比,方案Ⅲ具有更高的检 测效率,故障漏警更少.



该故障模式下3种方案的水平位置和速度解算 结果如图6所示.







由图6可知,当GNSS水平位置量测发生缓变故障时,采用平均分配原则的联邦滤波器其水平位置和速度误差随时间增大而较快变大,位置和速度误差最大值分别约为18 m和0.07 m/s;加入容错处理的联邦滤波器可有效降低故障对全局估计的影响,滤波估计精度明显改善,位置误差在6 m以内,速度误差在0.03 m/s内;而采用本文的自适应联邦滤波器具有更好的故障检测隔离效果,因而精度更高,位置误差和速度误差控制在3 m和0.015 m/s以内.

在算法时间性能分析方面,对3种方案1600次融 合解算所需的时间进行了统计,测试平台为Intel (R) Core (TM) i5-6500 CPU (3.20 GHz)计算机和MAT-LAB 8.2编程环境.两组仿真试验下3种方案的耗时 对比如表1所示.

表 1 各方案耗时对比 Table 1 Comparison of the elapsed time of

试验编号	融合耗时/s		
	方案 I	方案 II	方案III
试验1	0.609	0.922	0.971
试验2	0.606	0.921	0.968

由表1可以看出,3种方案耗时相差不大,其中方案 I 耗时最短,方案 II 在滤波过程中加入了量测噪 声自适应调节功能,相比于方案 I 耗时有所增加; 方案III在方案 II 的基础上引入了动态信息分配策 略,其计算量略有增加.但总体来说3种方案计算量 差别不大. 由以上两组仿真试验可以看出,当某一子系统 发生缓变故障时,对故障进行容错处理可降低故障 子系统对全局估计的影响,提升全局估计精度和故 障检测效率,在此基础上通过自适应信息分配,给 予故障程度低的子系统更大的信息分配因子可进一 步提升故障检测效率和全局估计精度,实现对缓变 故障的有效容错处理.

6 结论

缓变的软故障在检测时存在滞后性,为提高子 系统发生缓变软故障条件下SINS/GNSS/CNS组合 导航系统的性能,本文研究了一种自适应容错联邦 滤波方法.该方法采用自适应滤波对量测噪声阵进 行自适应调节,来降低未被检测出来的故障信息对 全局估计和无故障子滤波器的污染;同时,根据子 滤波器的故障程度来动态调节信息分配因子,进一 步提升故障检测效率.仿真结果表明,相比于传统 的容错联邦滤波器,在保证算法实时性的同时,该 方法可有效降低缓变故障对状态估计精度的影响, 对于提升复杂条件下组合导航系统的自主容错能力 具有一定的参考意义.

参考文献:

- [1] HU G G, GAO S S, ZHONG Y M, et al. Matrix weighted multisensor data fusion for INS/GNSS/CNS integration. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(6): 1011 – 1026.
- [2] DENG H, LIU G B, CHEN H M, et al. The application of federated Kalman filtering in SINS/GPS/CNS integrated navigation system. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*, 2012, 2(2): 12 – 19.
- [3] MAIER A, KIESEL S, TROMMER G F. Performance analysis of federated filter for SAR/TRN/GPS/INS integration. *Gyroscope and navigation*, 2011, 2(4): 293 – 300.
- [4] XIONG Z, CHEN J, WANG R, et al. A new dynamic vector formed information sharing algorithm in federated filter. *Aerospace Science* and Technology, 2013, 29(1): 37 – 46.
- [5] HUANG J, YAN B. Federated filter based on dynamic information allocation with unscented Kalman filter. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics.* Jinan: Atlantis Press, 2015: 911 – 916.
- [6] CARLSON N A. Federated square filter for decentralized parallel processes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(3): 517 – 524.
- [7] WANG Q Y, CUI X F, LI Y B, et al. Performance enhancement of a USV INS/CNS/DVL integration navigation system based on an adaptive information sharing factor federated filter. *Sensors*, 2017, 17(2), 239 – 264.
- [8] LI Z K, GAO J X, WANG J, et al. PPP/INS tightly coupled navigation using adaptive federated filter. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 137 148.

- [9] LI Yanhua, FANG Jiancheng. A multi model adaptive federated filter and it's application in INS/CNS/GPS integrated navigation system. *Aerospace Control*, 2003, 21(2): 31 – 38.
 (李艳华, 房建成. 一种多模型自适应联邦滤波器及其在组合导航系 统中的应用. 航天控制, 2003, 21(2): 31 – 38.)
- [10] WAN Jianru, PEI Wei, CHEN Xi. Method for adaptive information fusion based on the fuzzy assessment theory for integrated navigation system. System Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 308 – 311.
 (万健如, 裴玮, 陈曦. 基于模糊评判的组合导航自适应信息融合方 法. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 308 – 311.)
- [11] WU Xunzhong, ZHOU Jun, QIU Kai. Study of a robust federated filtering algorithm based on fault factor function. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(1): 57 60.
 (吴训忠,周军,邱恺. 基于故障因子函数的鲁邦联邦滤波算法研究. 宇航学报, 2006, 27(1): 57 60.)
- [12] HU Jian, MA Dawei, CHENG Xianghong, et al. Information sharing method in federated filter and its application in transfer alignment. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(2): 224 229.
 (胡健, 马大为, 程向红, 等. 联邦滤波信息分配方法及其在传递对准中的应用. 南京理工大学学报, 2011, 35(2): 224 229.)
- [13] XIONG Zhi, SHAO Hui, HUA Bing, et al. An improved fault tolerant federated filter with fault isolation. Acta Aeronautics et Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 929 938.
 (熊智, 邵慧, 华冰, 等. 改进故障隔离的容错联邦滤波. 航空学报, 2015, 36(3): 929 938.)
- [14] LIU Y T, XU X S, LIU X X, et al. A fast gradual fault detection method for underwater integrated navigation systems. *The Journal of Navigation*, 2016, 69(1): 93 – 112.
- [15] ZHANG Ke, LIU Haipeng, LI Hengnian, et al. SINS/GPS/CNS integrated navigation federal filtering algorithm. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(2): 226 230.
 (张科,刘海鹏,李恒年,等. SINS/GPS/CNS组合导航联邦滤波算法. 中国惯性技术学报, 2013, 21(2): 226 – 230.)
- [16] YANG Chun, ZHANG Lei, GUO Jian, et al. Fault-tolerant integrated navigation algorithm using chi-square test with two state propagators and fuzzy adaptive filter. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(4): 500 511.
 (杨春,张磊,郭建,等.采用双状态传播卡方检验和模糊自适应滤波的容错组合导航算法. 控制理论与应用, 2016, 33(4): 500 511.)

作者简介:

张 闯 博士研究生,主要从事多传感器组合导航技术研究,

E-mail: zhangchuanglw@163.com;

```
赵修斌 教授,博士生导师,主要从事卫星导航及组合导航技术研
```

究, E-mail: zhaoxiubin926@163.com;

庞春雷 副教授,主要从事卫星导航定位测姿及卫星/惯性组合导 航研究, E-mail: chunleipcl@163.com;

冯 波 讲师,主要从事惯性导航与组合导航技术研究, E-mail: fengbo876@163.com;

高 超硕士研究生,主要从事组合导航技术研究, E-mail: gao_ 2017@163.com.