

引用格式:王勇军,李智,孙山林,等.轻小型无人机遥感组网飞行的高程安全监测冗余容错算法研究[J].地球信息科学学报,2019,21(4):542-551.
[Wang Y J, Li Z, Sun S L, et al. Research on the redundancy fault-tolerant algorithm of altitude safety monitoring for remote sensing networking flight of light and small UAVs[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(4):542-551.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180502

轻小型无人机遥感组网飞行的高程安全监测冗余容错算法研究

王勇军^{1,2}, 李智², 孙山林², 马兴元¹, 晏磊^{2,3*}

1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004; 2. 桂林航天工业学院 无人遥测重点实验室, 桂林 541004;
3. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室(北京大学), 北京 100871

Research on the Redundancy Fault-tolerant Algorithm of Altitude Safety Monitoring for Remote Sensing Networking Flight of Light and Small UAVs

WANG Yongjun^{1,2}, LI Zhi², SUN Shanlin², MA Xingyuan¹, YAN Lei^{2,3*}

1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Telemetry, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004 China
3. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Application (Peking University), Beijing 100871, China;

Abstract: To satisfy the altitude safety monitoring for remote sensing networking flight of light and small Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), a multi-source information redundancy measurement scheme based on INS/GPS/ barometer is designed in this paper. By analyzing the requirement of UAV reliability and fault tolerance in the complex and changeable working environment of remote sensing network application, the federated filtering algorithm is adopted to fuse the redundant information of multi-sensor. In this paper, the structure and algorithm of federated filtering are analyzed, and the principle of selecting information allocation coefficients with good fault-tolerance and high filtering accuracy is obtained. Then a Pignistic probabilistic transformation fault-tolerant information allocation method based on information entropy is proposed. This algorithm can obtain a clear and accurate fault probability distribution, from which the system fault probability is determined by information entropy. Then the weight ratio of each subsystem of the group measurement system is obtained by combining the value principle of information allocation coefficient. Simulation results show that different information allocation coefficients mainly affect the estimation error and fault-tolerant performance of subsystems, but which have little influence on the fusion estimation error of federated main filter. It shows that the fault-tolerant information allocation method in this paper can provide reliable allocation coefficients for each subsystem component. The fixed-altitude hovering experiment on the multi-rotor UAV platform proves that this method can

收稿日期:2018-10-15;修回日期:2019-03-05.

基金项目:“广西特聘专家”专项经费;广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139251);广西科技重大专项(桂科AA172 04086);广西自然科学基金重点项目(2016GXNSFDA380031);国家重点研发计划项目(2017YFB0503004-4). [**Foundation items:** "Guangxi Specially-invited Experts" Special Funds; Guangxi Natural Science Foundation, No.2015GXNSFBA139251; Guangxi Science and Technology Projects, No. AA17204086; Key Projects of Guangxi Natural Science Foundation, No.2016GXNSFDA380031; National Key Research and Development Plan, No.2017YFB0503004-4.]

作者简介:王勇军(1985-),男,山东聊城人,博士生,副教授,主要从事小型无人机组组合导航技术研究。

E-mail: dongwang@guat.edu.cn

*通讯作者:晏磊(1956-),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事无人机遥感系统和ITS研究。E-mail: liyan@pku.edu.cn

be used to reduce the altitude error of UAV to one quarter of the traditional federated filtering algorithm, which further proves that this method can be used to improve the accuracy and fault-tolerance of the UAV altitude safety monitoring system.

Key words: light and small UAVs; multi-source information fusion; altitude monitoring; fault tolerance; entropy of information; networking flight; altitude safety

***Corresponding author:** YAN Lei, E-mail: lian@pku.edu.cn

摘要:针对轻小型无人机遥感组网飞行的高程安全要求,本文设计了基于INS/GPS/气压计的多源信息冗余容错测量方案。通过分析轻小型无人机遥感组网应用时复杂多变的工作环境对可靠性与容错能力的要求,采用了联邦滤波算法进行多传感器冗余信息融合。本文分析了联邦滤波结构及算法,通过计算得出了系统容错性好以及滤波精度高的信息分配系数取值原则,并在此基础上提出一种基于故障特征信息熵的Pignistic概率转换容错信息分配方法。该算法可得到清晰准确的故障概率分布,根据此概率分布运用信息熵来确定系统故障概率,进而结合信息分配系数的取值原则得出组合测量系统各个子系统的权重比。通过算例仿真验证了不同信息分配系数主要影响子系统的估计误差和容错性能,而对联邦主滤波器的融合估计误差影响较小,说明了本文的容错信息分配方法能够为各子系统分量提供可靠的分配系数。在旋翼无人机平台上的定高悬停实验证明了该方法能将无人机高程误差减小为传统联邦滤波算法的四分之一,进一步说明了该方法能提高无人机高程安全监测系统的精度及容错性。

关键词:轻小型无人机;多源信息融合;容错性;信息熵;组网飞行;高程安全

1 引言

多旋翼无人机相较传统航测型固定翼无人机具有场地要求小、可多次快速起飞航测等优点,在轻小型无人机遥感组网系统中得到越来越多的应用^[1]。但是此类遥测无人机大多属于低成本无人机,其位置与姿态系统(POS)较少采用差分GPS,特别是高程值存在误差过大现象,严重影响到无人机遥感组网飞行安全和航测作业,同时也增大了航测事后处理复杂度^[2-3]。为保障无人机高程安全监测系统的可靠性和准确性,本文结合无人机的INS/GPS/气压计提出了多源信息融合的冗余容错测量方案。

容错控制技术最早是由美籍匈牙利数学家冯·诺依曼提出的,主要思想是通过采用缜密的设计和质量控制方法来尽量减少故障出现的概率,以冗余资源为代价来换取可靠性^[4]。而在轻小型无人机遥感组网系统中,复杂多变的工作环境对无人机的可靠性与容错能力提出了更高的要求,使用冗余容错飞行控制技术是提高安全可靠的重要途径之一^[5]。由于单一的导航测量模式无法实现小型无人机遥感组网系统对导航参数的高可靠性和高精度的测量,只能通过采用多传感器容错导航技术来提高组合测量系统的性能^[6],采用具有不同工作特性的导航传感器系统构成自适应的容错多传感器的自主导航系统,进一步提升轻小型无人机

的综合性能,从而保证其能够准确可靠地完成航测、组网等任务。

合理的冗余设计将大大提高系统的可靠性,但同时也增加了系统的复杂度和设计的难度,如何选择合理而有效的信息融合方法是本文的研究重点。随着联邦卡尔曼滤波理论和容错控制理论的出现,使得以惯性导航系统为基础的惯性/多传感器组合测量技术得到了迅猛发展^[7],相比于集中卡尔曼滤波算法,联邦滤波算法计算量大大的减少,而测量精度并没有明显的损失^[8]。在轻小型无人机组组合测量系统中,采用联邦滤波算法进行信息融合,其主滤波器通常采用固定信息分配系数的方式对各个子系统进行信息分配与重置。而在多源信息融合测量系统中,若其中一个子系统发生故障,对各个子系统的信息分配系数进行动态调节能够减小故障子系统对无故障子系统的污染程度,从而提高子系统的滤波精度,因此为改善故障系统的容错性及滤波精度,信息系数的动态分配成为了融合滤波算法的研究热点^[9-11]。李兆铭等^[12]采用了误差协方差矩阵的Frobenius范数来自适应确定信息分配系数,以达到提高信息融合精度的目的;邓中亮等^[13]分析了不同信息分配系数的取值对子滤波器滤波效果的影响,并提出了一种根据精度因子及载噪比来计算信息分配系数的方法;尹露等^[14]首先通过估计各子系统的测量噪声,得到子系统可信度并配置置信因子,进而根据置信因子对各子滤波器进行信

息分配,以获得最优滤波估计。上述研究都在一定程度上实现了对系统信息的动态分配,比固定的信息分配原则在容错性上有一定的改善,但其都是把所有的状态变量作为一个整体在考虑^[15],并没有把分配系数具体到单一的状态变量,难以兼顾滤波精度和系统容错性。

本文从滤波精度和容错性2个方面出发,对联邦滤波算法进行了分析,得出能提高组合导航系统容错性及子系统滤波精度的信息分配系数取值原则。鉴于传统联邦滤波结构中的故障隔离模块会将检测到的故障隔离掉^[16],从而造成故障子系统的有用信息丢失的缺点,本文采用了不带故障隔离模块的联邦滤波结构。在此基础上,提出了一种基于信息熵的Pignistic概率转换容错信息分配方法来提高无人机高程融合测量系统的精度及容错性。

2 信息分配系数对融合滤波精度的影响

2.1 多源信息融合的低成本测量方案

Carlson于1988年提出了一种基于分散化滤波思想的联邦滤波理论,该理论描述的联邦滤波结构是由一个公共主系统和若干子系统共同组成,从而构成了组合导航系统。其中各个子系统的量测量分别通过子滤波器中的kalman滤波算法得到局部估计结果,这些结果再由主滤波器进行融合处理,即可得到系统的全局最优估计^[17-18]。有反馈式的联邦滤波结构还需要通过信息分配把全局最优估计和系统噪声分配给各个子滤波器。因此,本文以无人机的惯性导航系统(INS)为主参考系统,结合GPS和气压计实现了多源信息高程测量方案,如图1所示。

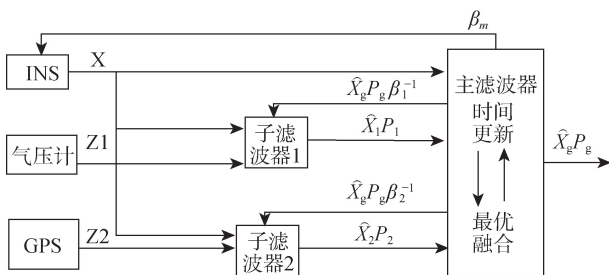


图1 多源高程信息融合系统联邦滤波器结构

Fig. 1 Federated filter structure for multi-source altitude information fusion systems

2.2 联邦滤波算法信息分配系数分析

信息分配过程是联邦滤波算法中的重要一环,信息分配系数的不同将直接改变联邦滤波器的性能,它也是联邦滤波自适应改进的主要着力点,因此得出提高系统容错性的信息分配系数取值原则尤为重要。

对于系统的离散状态空间模型可描述为:

$$\begin{cases} X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma(k, k-1)W(k-1) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X(k)$ 为 t_k 时刻的状态向量; $Z(k)$ 为量测向量; $\Phi(k, k-1)$ 为 t_{k-1} 时刻到下一时刻 t_k 的状态转移矩阵; $\Gamma(k-1)$ 为噪声驱动矩阵; $H(k)$ 为量测矩阵; $W(k)$ 和 $V(k)$ 为高斯白噪声矩阵; $W(k)$ 为系统噪声矩阵,其协方差矩阵 $Q(k)$, $V(k)$ 为量测噪声向量,其协方差矩阵 $R(k)$ 。

联邦滤波算法可概括为信息分配、时间更新、量测更新和估计融合4个过程:

(1) 信息分配和重置过程: 将全局最优结果 ($X_g(k)$) 及系统噪声方差 ($Q_g(k)$)、预测误差方差 ($P_g(k)$) 通过信息分配系数 β_i 分配给各个子滤波器,其中全局最优结果重置给各个子系统 ($X_i(k)$):

$$\begin{aligned} Q^{-1}(k) &= \beta_i(k)Q_g^{-1}(k) \\ P_i^{-1}(k) &= \beta_i(k)P_g^{-1}(k) \\ \hat{X}_i(k) &= \hat{X}_g(k) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, β_i ($i=1, 2, \dots, n, m$) 为各个子滤波器的信息分配系数,还需满足 $\sum_{i=1}^n \beta_i + \beta_m = 1$ 。

(2) 信息时间更新过程: 将系统状态与估计误差协方差按系统转移矩阵进行转移,在各个子滤波器和主滤波器中独立进行。

$$\hat{X}_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}_i(k-1) \quad (3)$$

$$P_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P_i(k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (4)$$

(3) 信息测量更新过程: 此过程只在子滤波器中进行,主滤波器不参与测量。

$$P_i^{-1}(k) = P_i^{-1}(k, k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k) \quad (5)$$

$$P_i^{-1}(k)\hat{X}_i(k) = P_i^{-1}(k, k-1)\hat{X}_i(k, k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k) \quad (6)$$

(4) 信息融合: 将各个子滤波器的局部滤波结果送入主滤波器进行融合。

$$\hat{X}_g = P_g \sum_{i=1}^{n, m} P_i^{-1} \hat{X}_i \quad (7)$$

$$P_g = \left(\sum_{i=1}^{n,m} P_i^{-1} \right)^{-1} \quad (8)$$

由以上各式可推得 $k+1$ 时刻主滤波器的最优融合结果。则可导出组合测量的融合结果为:

$$\begin{aligned} \hat{X}_g(k+1) &= P_g(k+1) \sum_{i=1}^{n,m} P_i^{-1}(k+1) \hat{X}_i(k+1) \\ &= P_g(k+1) \sum_{i=1}^{n,m} \left(P_g^{-1}(k+1, k) \Phi(k+1, k) \right. \\ &\quad \left. \hat{X}_g(k) + H_i^T(k+1) R_i^{-1}(k+1) Z_i(k+1) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

现设有一个联邦滤波系统,主滤波器只起融合作用,不参与量测,2个子系统气压计、GPS分别用a和b表示,假设,子系统a在 $k+1$ 时刻发生故障,设量测值为: $Z_a(k+1)$, 则 $k+1$ 时刻子系统a的量测值包含有一定的故障量。令 $Z_a(k+1) = Z_{ar}(k+1) + \gamma$, 其中 $Z_{ar}(k+1)$ 为真实值, γ 为故障量。子系统b正常。则最后主滤波器的融合结果为:

$$\hat{X}_{gr}(k+1) = \hat{X}_g(k+1) + P_g(k+1) H_a^T(k+1) R_a^{-1}(k+1) \gamma \quad (10)$$

$k+2$ 时刻无故障子滤波器b的滤波结果为:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{br}(k+2) &= \left\{ P_b(k+2) \beta_b(k+1) P_g^{-1}(k+2, k+1) \times \right. \\ &\quad \left. \Phi(k+2, k+1) \hat{X}_{gr}(k+1) \right\} + \\ &\quad \left\{ P_b(k+2) H_b^T(k+2) \times \right. \\ &\quad \left. R_b^{-1}(k+2) Z_b(k+2) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)带入式(11)得:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{br}(k+2) &= \left\{ P_b(k+2) \beta_b(k+1) P_g^{-1}(k+2, k+1) \times \right. \\ &\quad \left. \Phi(k+2, k+1) \hat{X}_g(k+1) \right\} + \\ &\quad \left\{ P_b(k+2) H_b^T(k+2) R_b^{-1}(k+2) Z_b(k+2) \right\} + \\ &\quad \left\{ P_b(k+2) \beta_b(k+1) P_g^{-1}(k+2, k+1) P_g(k+1) \times \right. \\ &\quad \left. \Phi(k+2, k+1) H_a^T(k+1) R_a^{-1}(k+1) \gamma \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{令 } \hat{X}_{br}(k+2) = \hat{X}_b(k+2) + \hat{X}_{br}(k+2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \hat{X}_{br}(k+2) &= P_b(k+2) \beta_b(k+1) P_g^{-1}(k+2, k+1) \\ &\quad \Phi(k+2, k+1) P_g(k+1) H_a^T(k+1) R_a^{-1}(k+1) \gamma \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)为故障子系统a对无故障子系统b造成的污染量。

由式(4)和式(5)得:

$$\begin{aligned} P_b^{-1}(k+2) &= \beta_b(k+1) P_g^{-1}(k+2, k+1) + \\ &\quad H_b^T(k+2) R_b^{-1}(k+2) H_b(k+2) \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)带入式(13)得:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{br}(k+2) &= \left\{ P_g^{-1}(k+2, k+1) + \beta_b^{-1}(k+1) \times \right. \\ &\quad \left. H_b^T(k+2) R_b^{-1}(k+2) H_b(k+2) \right\} \times \\ &\quad \left\{ P_g^{-1}(k+2, k+1) \Phi(k+2, k+1) \times \right. \\ &\quad \left. P_g(k+1) H_a^T(k+1) R_a^{-1}(k+1) \gamma \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

由式(9)及式(15)可知,不同的信息分配系数不会影响主滤波器的状态估计,而会对其他无故障子滤波器的滤波精度会造成影响,且无故障子系统信息分配系数越小所受的污染量越小。因此,在确定滤波精度权重基础上,动态信息分配系数的取值原则主要从容错性方面入手,尽量使无故障子系统信息分配系数小,故障子系统信息分配系数大。基于这一信息分配系数的选取原则,本文提出了一种基于信息熵的 Pignistic 概率转换容错信息分配算法。

3 融合滤波算法信息分配系数的计算

本文研究的信息分配系数主要是基于故障概率分布来计算。该过程首先需要搭建出一个对应的完备故障模板库;其次通过隶属度函数得出故障子系统的故障特征与故障库中各个故障模板的匹配度;再由改进的 Pignistic 概率转换得出准确的故障概率分布,基于此概率分布使用信息熵计算出子系统发生故障的概率;最后结合对联邦滤波理论推导结果中信息分配系数的选取原则,计算出能使系统容错性更好的信息分配系数。

3.1 故障模板的匹配度

在实际的量测或实验中,由于受测量环境、场合、地点等因素的影响,测得的实验数据会具有随机误差和故障模糊性,因此可以从实验数据中提取故障特征来构造隶属度函数,从而与模板隶属度函数库做匹配,得出其隶属于各种运行故障的概率^[19]。由于无人机组组合测量系统的传感器误差可近似为白噪声,其量测值具有高斯分布的形式,因此本文考虑使用正态分布结构来构造隶属度函数。

(1)首先确定模板隶属度函数库:利用实验或仿真手段模拟组合导航中各个子系统的各种故障运行模式。具体做法为在一种故障运行状态模式下的相同时间间隔内连续观测 200 次量测数据,将其作为一组,并进行 5 组测量,然后计算出每组测量值的平均值 M_k 及标准差 σ_k , $k=1, 2, 3, 4, 5$ 。利用 M_k 、

σ_k 构造隶属度函数^[19](此方法同样用于待检子系统隶属度函数的确定)

$$\mu_F(\chi_k) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(\chi_k - M_a)^2}{2\sigma_a^2}\right) & \chi_k < M_a \\ 1 & M_a < \chi_k < M_b \\ \exp\left(-\frac{(\chi_k - M_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) & \chi_k > M_b \end{cases} \quad (16)$$

式中: χ_k 为一种故障状态模式下子系统测量值中的随机一组; $M_a = \min(M_k)$ 、 $M_b = \max(M_k)$; σ_a 、 σ_b 分别为均值为 M_a 、 M_b 的两次测量的标准差。

(2)其次确定待检隶属度函数为,如式(17)。

$$\mu(\chi) = \exp\left(-\frac{(\chi - M)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

σ 、 M 为待检测量值 χ 的标准差和平均值。利用上述方法分别得出各个子系统在不同故障状态模式下的待检隶属度函数和模板隶属函数。图2为一个子系统的多个故障模板隶属度函数所构成的故障模板库及所测数据构造的待检隶属度函数。

其中,待检子系统的故障隶属于各种故障的隶属度可由图2中待检隶属度函数与模板隶属度函数交点的纵坐标大小 μ 来表示。

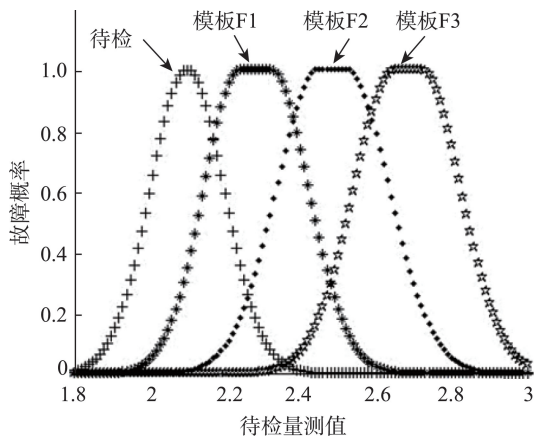


图2 测量子系统故障的待检函数与模板库

Fig. 2 Pending function and template library of the measuring subsystem faults

3.2 故障概率分布计算

3.2.1 Pignistic 概率转换原理

设有一个故障模板集合 Θ , 集合中的故障命题是相互独立且完备而有穷的。对任何一个属于集合 Θ 的命题, 如故障 A, 存在函数 $m(A)$ 表示子系统所测数据隶属于故障 A 的精确信任程度, 称为基本概率分配 (BPA), 且 $m(A)$ 满足: $m(A): 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$,

$\sum_{A \in \Theta} m(A) = 1$, $m(\varphi) = 0$ 。各个故障命题的 BPA 值由其子系统所测数据的隶属度函数与模板库隶属度函数的匹配度表示。

信度函数 $Bel(A)$ 如式(18)所示, 表示子系统所发生的故障隶属于集合中命题 A 的总信任度, 是 A 中所有子集 B 的 BPA 之和。其中 $\forall A \in \Theta$ 。

$$Bel(A) = \sum_{B \in A} m(B) \quad (18)$$

似真函数 $Pls(A)$ 如式(19)所示, 表示不反对子系统所发生故障隶属于故障 A 的信度, 其中 $\forall A \in \Theta$ 。

$$Pls(A) = \sum_{A \cap B \neq \varphi} m(B) \quad (19)$$

综上可知, $Pls(A) \geq Bel(A)$, $Pls(A) - Bel(A)$ 表示子系统故障类型为故障 A 的不确定度, 如图3所示。不确定度产生的原因是 Θ 中出现了多元素命题^[20], 于本文为模糊不清的多可能性故障, 如 $\Theta = \{A \ B \ C \ (A \ B) \ (A \ C) \ (B \ C) \ (A \ B \ C)\}$, 其中 A, B, C 为单元元素命题, 其他为多元素命题。

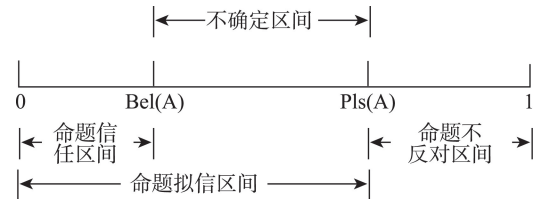


图3 子系统发生 A 故障的信度区间

Fig. 3 Confidence intervals of class A faults in subsystems

由式(18)可知, 对于多元素命题的 Bel 值由其所包含的各故障 BPA 共同分配, 因此要得到每种故障的最终信度值还需对不确定区间的值进行分配以期得到更准确的故障概率分布^[21]。

Pignistic 概率转换定义: Smets 推导出在多元素命题中每个元素出现的概率是一样的, 因此把多元素命题的 BPA 平均分配给所包含的元素^[22]:

$$BetP(A) = \sum_{A \in A_M} \left(\frac{1}{|A_M|} \right) m(A_M) \quad (20)$$

式中: A_M 为论域集合中的一个多元素命题; $|A_M|$ 为多元素命题中的元素个数。

由式(20)得子系统出现 A 类故障的概率为:

$$P(A) = Bel(A) + BetP(A) \quad (21)$$

由上可知 Pignistic 概率转换的目的是为了得出子系统所发生故障隶属于各种故障的概率分布, 但是 Semts 提出的 Pignistic 概率转换方法, 对多元素

命题的BPA采取了平均分配的方式,这会使信息发生丢失,而且只选取了 Bel 值参与分配,没有有效地利用其他数据,从而造成分配结果的不合理及不精确。本文在 Semts 提出的 Pignistic 概率转换方法的基础上做出改进,提出一种改进的概率转换方法。此方法利用了更多的有效信息,实现了BPA到概率分布的准确转换。

3.2.2 Pignistic 概率转换方法改进

Semts 提出的 Pignistic 概率转换方法中仅仅选择了BPA作为转换依据,这种仅使用一种数据做转换的方法是十分片面的。 Bel 值表示对一个命题是否成立的最低信任程度, Pls 表示对一个命题是否成立的最大信任程度,它们在不同的层面上体现了对一个命题的信度,应综合考虑二者贡献,即当 Bel 值相同时,分配因子应该按照 Pls 的比例进行分配;同理,当 Pls 值相同时,应该按照 Bel 的比例进行分配。基于此方法本文设计了一种改进的 Pignistic 概率转换方法。

将含有单元故障 A_i 的所有多元命题 Bel 值重新分配,设这个值为 C_i ,由以上基本定义可知 $C_i = Pls(A_i) - Bel(A_i)$ 。假设分配因子为 ε_i ,则 ε_i 由 Bel 和 Pls 值的比例共同进行分配,即:

$$\varepsilon_i = \frac{Bel(A_i)}{\sum Bel(A_i)} \times \frac{Pls(A_i)}{\sum Pls(A_i)} \quad (22)$$

则子系统故障类型隶属于命题 A_i 的概率为:

$$\begin{aligned} P(A_i) &= Bel(A_i) + \varepsilon_i C_i \\ &= Bel(A_i) + \left(\frac{Bel(A_i)}{\sum Bel(A_i)} \times \frac{Pls(A_i)}{\sum Pls(A_i)} \right) \times \\ &\quad (Pls(A_i) - Bel(A_i)) \end{aligned} \quad (23)$$

3.3 基于信息熵的信息分配系数的确定

信息熵从平均意义上表征了信源整体信息的统计特征,是信源状态不确定性的描述,这使其在故障诊断方面的应用十分广泛^[23-24]。由香农定义的信息熵的计算公式可知,信息熵描述的是信源的平均信息量。

$$\begin{aligned} H(X) &= E[I(x_i)] = E[-\log P(x_i)] \\ &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i) \end{aligned} \quad (24)$$

式中: X 表示随机变量,随机变量的取值为 (X_1, X_2, \dots, X_n) ; $I(x_i)$ 表示 x_i 的信息量; $P(x_i)$ 表示事件 x_i 发生的概率。由式(24)可知, $H(X)$ 为随机变

量 X 的平均信息量,信息量越高,不确定量度越高,概率越小。

由以上改进的 Pignistic 概率转换函数得出更加精确的故障概率分布,通过信息熵计算概率分布不均匀程度,得出子系统故障概率大小,即转换得到的概率分布越不均匀,信息熵越小,则子系统故障概率越大。因此,可得到子系统各种故障的概率分布的信息熵 H_n 跟子系统的故障概率 $P(A_i)$ 的关系。

$$H_n = E[-\log P(A_i)] = -\sum_{i=1}^N P(A_i) \log P(A_i) \quad (25)$$

式中: N 为故障库中单故障命题个数。同时,整个冗余测量系统中的各子系统的故障概率是相互独立的,由上述信息分配系数分析的结论可知:为增强无故障子系统的抗污染能力及滤波结构的容错性,信息分配系数的取值原则应遵循故障概率越大,其信息分配系数越大;故障概率越小,其信息分配系数越小的原则。综上可知,信息分配系数与子系统故障概率的信息熵呈相反关系,结合式(25)得到信息分配系数 β_n :

$$\beta_n = 1 - H_n / \sum_{n=1}^N H_n \quad (26)$$

4 算法验证

4.1 仿真算例

高度测量传感器子系统1和子系统2的线性系统模型如式(27)所示。

$$\begin{cases} X_i(k) = \Phi(k, k-1)X_i(k-1) + W(k) \\ Z_i(k) = H_i(k)X_i(k) + V_i(k) \end{cases} \quad (27)$$

式中: $X_i(k)$ 为子系统以为状态量; $Z_i(k)$ 为子系统量测量;设状态转移矩阵 $\Phi(k, k-1) = 1$;系统协方差和测量协方差分别为: $Q = 0.01$ 、 $R = 0.25$;系统噪声和量测噪声分别为: $W = \text{sqrt}(Q) \times \text{randn}(1, N)$ 、 $V = \text{sqrt}(R) \times \text{randn}(1, N)$;测量系统参数为 $H = 1$ 。

设系统滤波时间为200步,假设子系统2在运行100步后发生故障,再运行50步后恢复正常,系统的主滤波器不进行量测,只起融合作用,即 $\beta_m = 0$ 。

本文通过 simulink 和 MATLAB 编程搭建了无人机置于高度300 m悬停或飞行进行测量时的故障库,进而通过模拟子系统2的故障数据,与故障库做匹配,得出子系统2隶属于各种故障的概率分布。图4为一次模拟结果。

由本文的计算方法可得2个子系统的信息分配系数分别为: $\beta_1 = 0.1417$ 、 $\beta_2 = 0.8583$ 。现由以下3

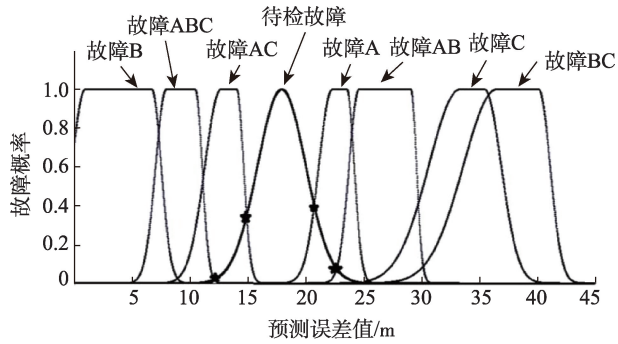


图4 高程测量系统故障库

Fig. 4 Fault library of altitude measurement system

种情况进行仿真：

方法1 故障子系统比无故障子系统信息分配系数小,不妨设: $\beta_1=0.8000$ 、 $\beta_2=0.2000$;

方法2 信息分配系数平均分配: $\beta_1=0.5000$ 、 $\beta_2=0.5000$;

方法3 本文信息系数分配算法: $\beta_1=0.1417$ 、 $\beta_2=0.8583$ 。

仿真结果如图5-图7所示。

(1)由图5可知,方法1、2、3的不同的信息分配系数不会对主滤波器的状态估计精度造成影响。

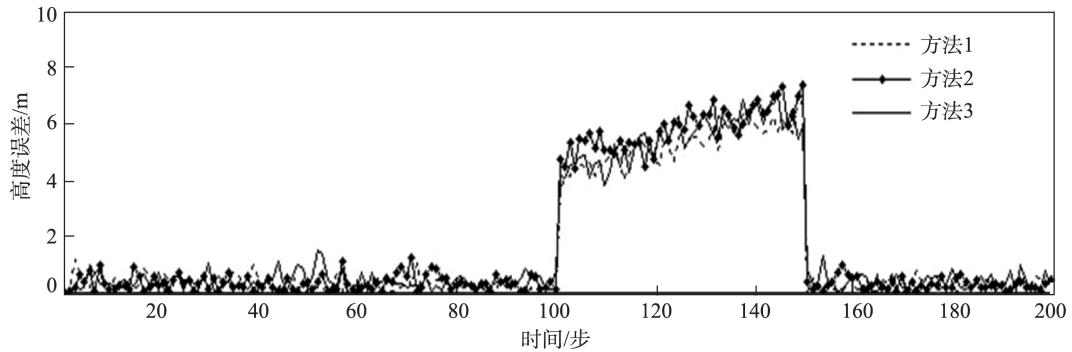


图5 主滤波器高度估计误差

Fig. 5 Height estimation errors of main filters

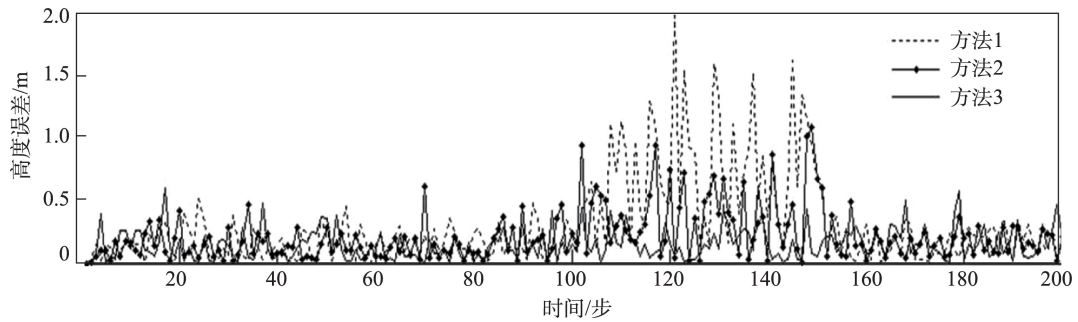


图6 子滤波器1高度估计误差

Fig. 6 Height estimation errors of sub filter 1

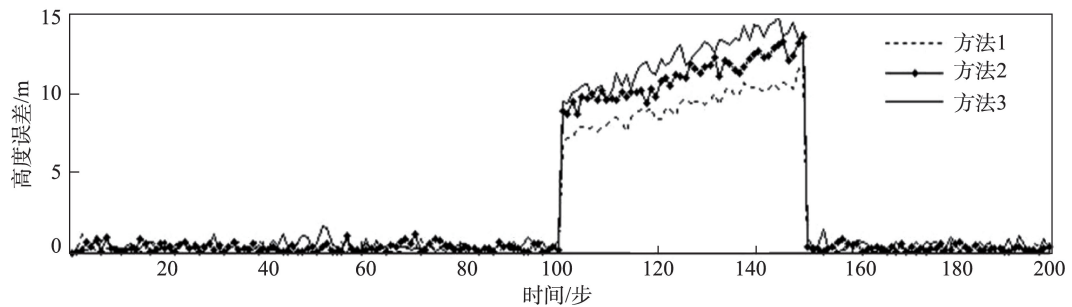


图7 子滤波器2高度估计误差

Fig. 7 Height estimation errors of sub filter 2

(2)由图6可知,相比于方法1、2,本文的信息分配方式在很大程度上减小了故障子系对无故障子系统的污染程度,使无故障子滤波器的平均误差分别减小了1.034 m和0.396 m。

(3)由图7可知,采用以上3种方法识别出的高度平局误差分别为:9.854、10.973和11.447 m,无故障子滤波器的信息分配系数越小则其滤波估计误差越小,故障子滤波器信息分配系数越大,系统容错性越好,采用本文的方法可以更容易识别出子系统故障,通过主滤波器的融合达到了提高联邦滤波系统容错性的目的。

4.2 飞行验证

飞行实验采用无人机遥测重点实验室研制的

六旋翼无人机平台来验证,该飞行平台搭载有惯性导航系统(INS)ADIS16355, GPS/BD 双定位模块S1216,气压计BM1383模块,通过读取它们的数据进行融合滤波,共同完成无人机的高程测量。试验时分别采用传统联邦滤波器固定值系数信息分配策略、协方差信息分配策略^[7]和本文的信息熵分配策略对数据融合滤波,然后由地面设备设置无人机在300 m高度进行悬停,悬停100 s后关闭气压计模块来模拟子系统故障,悬停150 s后重新打开气压计模块,悬停200 s后无人机降落,整个过程通过地面站记录数传电台发回的无人机高度数据信息,实验结束后分别计算出无人机在300 m高度悬停状态下的高程误差,如图8所示。

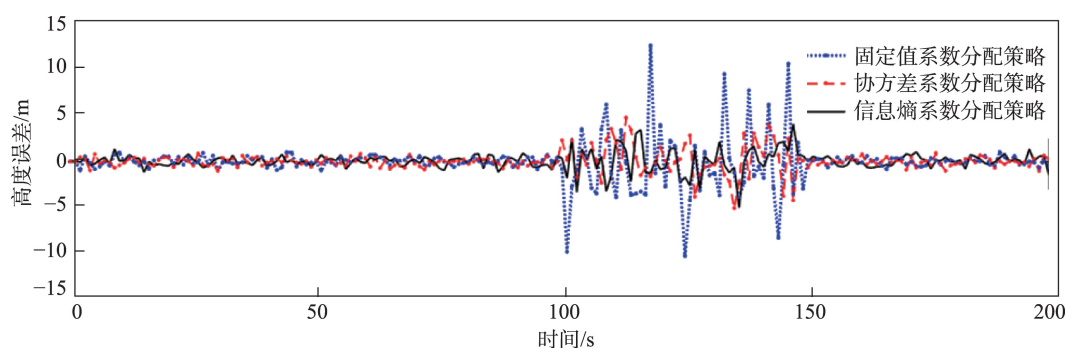


图8 不同信息分配策略下的无人机高程误差

Fig. 8 Elevation error of UAV under different information allocation strategies

由图8和表1可看出,3种信息融合分配策略在无故障时间段内误差大体相当,而在故障时间段内由于传统联邦滤波算法无法自适应调整信息分配系数,其误差主要受GPS/BD定位模块误差影响,远大于其他两种融合策略。本文提出的基于信息熵的Pignistic概率转换容错信息分配策略能更好地兼顾精度和容错性,融合后的高程误差略好于基于误差协方差矩阵的自适应信息分配策略。

表1 不同信息分配策略下的无人机高程误差

Tab. 1 UAV altitude errors under different information allocation strategies (m)

融合滤波算法	无故障高程 均方误差	故障时高程 均方误差
传统联邦滤波算法	0.415	2.096
基于误差协方差矩阵的自适应信息分配算法	0.368	0.568
基于信息熵的概率转换容错信息分配算法	0.357	0.483

5 结论

轻小型无人机遥感具有机动灵活、数据获取周期短等特点,能有效弥补传统遥感手段在数据获取方面的局限性,其结合移动通讯、人工智能等技术建立网络环境下数据驱动的空中移动无人机智能组网体系,实现无人机由单机向组网、人为控制向智能决策的跨越,不仅可以同时起飞多架次具备不同功能的遥感无人机,从而大大提高无人机遥感便捷大范围超高分辨率数据获取能力,而且能最大限度地利用无人航空器组网遥感观测推动对地观测技术发展。

为提高无人航空遥感安全系数,本文针对小型低成本航测无人机飞行的高程安全监测及其容错性设计了多传感器信息融合的测量方案。通过分析多源高程信息联邦滤波融合算法中信息分配、时间更新、量测更新和估计融合过程,得出了有利于

联邦滤波系统容错性的信息系数分配策略。因此,在保证联邦滤波器融合精度不受影响的前提下,通过提高故障子滤波器的分配系数可以有效识别并隔离故障子系统,可减小其对无故障子滤波器的污染程度。另外,本文还通过改进 Pignistic 概率转换方法,基于故障特征得到清晰准确的故障概率分布,然后根据此概率分布运用信息熵来确定系统故障概率,进而结合信息分配系数的取值原则得出组合测量系统各个子系统的权重比。通过算例仿真验证了不同的信息分配系数主要影响子系统的估计误差和容错性能,而对联邦主滤波器的融合估计影响较小这一重要结论。通过六旋翼无人机定高悬停实验进一步证明了该方法能将无人机高程误差减小为传统联邦滤波算法的四分之一,高程测量结果能有效保障轻小型无人机的遥感组网任务。

随着高频次迅捷无人航空器区域组网遥感观测技术的应用,多源信息冗余容错技术不仅要寻求单机的硬件冗余控制和安全可靠性,更会向全网络结构构建方面发展。

参考文献(References):

- [1] 赵培,王光彦,王之顺,等.消费型无人机在低空航测中的可行性应用研究[J].矿山测量,2018,46(3):20-22. [Zhao P, Wang G Y, Wang Z S, et al. Research on the feasibility application of consumer UAV in low-altitude aerial surveying[J]. Mine Survey, 2018,46(3):20-22.]
- [2] 徐志豪.消费级无人机倾斜摄影三维建模可行性研究[J].北京测绘,2018,32(8):897-904. [Xu Z H. Feasibility study on three dimensional modeling of tilting photography for consumer UAV[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018,32(8):897-904.]
- [3] 晏磊,吕书强,赵红颖,等.无人机航空遥感系统关键技术研究[J].武汉大学学报(工学版),2004,37(6):67-70. [Yan L, Lv S Q, Zhao H Y, et al. Research on key techniques of aerial remote sensing system for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2004,37(6):67-70.]
- [4] And D Z, Marta B. From large chemical plant data to fault diagnosis integrated to decentralized fault-tolerant control: Pulp mill process application[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008,47(4):1201-1220.
- [5] 鹿强,吴琳,陈昭,等.海上目标多源轨迹数据关联综述[J].地球信息科学学报,2018,20(5):571-581. [Li Q, Wi L, Chen Z, et al. A review of multi-source trajectory data association for marine targets. Journal of Geo-information Science, 2018,20(5):571-581.]
- [6] Jing L, Wu J, Hou J, et al. Fault-tolerant integrated navigation algorithm of the federal Kalman filter[J]. Advances in Future Computer and Control Systems. 2012,160(1): 621-627.
- [7] Gao B, Hu G, Gao S, et al. Multi-sensor optimal data fusion for INS/GNSS/CNS integration based on unscented Kalman filter[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2018,16(1):129-140.
- [8] Yang C, Shi W Z, Chen W. Correlational inference-based adaptive unscented Kalman filter with application in GNSS/IMU integrated navigation[J]. GPS Solutions, 2018,22(4):100-112.
- [9] 张亮,高井祥,李增科.信息分配系数的自适应滤波在GPS/DR组合导航中的应用[J].测绘科学技术学报,2015, 32(1):18-21. [Zhang L, Gao J X, Li Z K. Application of adaptive filter based on information distribution coefficient to GPS/DR integrated navigation[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015,32(1):18-21.]
- [10] 马传焱,熊智,许建新,等.一种联邦滤波信息共享分配算法[J].中国惯性技术学报,2013,21(3):347-353. [Ma C Y, Xiong Z, Xu J X, et al. Federated filter information sharing allocation algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013,21(3):347-353.]
- [11] 段睿,张小红,朱锋.多源信息融合的组合导航自适应联邦滤波算法[J].系统工程与电子技术,2018,40(2):267-272. [Duan R, Zhang X H, Zhu F. Adaptive federated filter for multi-sources information fusion in integrated navigation system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018,40(2):267-272.]
- [12] 李兆铭,杨文革,丁丹,等.多终端仅测速实时定轨的自适应联邦STCKF算法[J].系统工程与电子技术,2017,39(1):177-182. [Li Z M, Yang W G, Ding D, et al. Adaptive federated STCKF algorithm for satellite orbit determination of multiple hand-held terminals[J]. System Engineering and Electronics Technology, 2017,39(1):177-182.]
- [13] 邓中亮,尹露,杨磊,等.基于联邦卡尔曼的GPS/基站定位信息融合算法[J].北京邮电大学学报,2013,36(6):32-36. [Deng Z L, Yin L, Yang L, et al. Location information fusion algorithm for GPS /Base-Station positioning system based on federated Kalman filter[J]. Journal of Beijing University of Posts & Telecommunications, 2013,36(6): 32-36.]
- [14] 尹露,邓中亮,席岳.基于可信度的多源定位数据融合方法[J].北京邮电大学学报,2014,37(4):34-38. [Yin L, Deng Z L, Xi Y. Credibility based data fusion algorithm

- for multi-positioning system [J]. Journal of Beijing University of Posts & Telecommunications, 2014,37(4):34-38.]
- [15] Zhou W, Wang Q, University H E. The INS/GNSS/CNS integrated navigation system based on vector information distribution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015,47(4):99-103.
- [16] Zhu J Q, Jin W D, Zheng G, et al. High-speed train running gear fault recognition based on information fusion of multi-source[J]. Journal of Vibration & Shock, 2014,33(21):183-188.
- [17] 郭承军.多源组合导航系统信息融合关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018. [Guo C J. Key technical research of information fusion for multiple source integrated navigation system [D]. Chengdu: University of electronic science and technology, 2018.]
- [18] 袁赣南,袁克非,张红伟,等.联邦滤波器信息分配原则的探讨[J].中国航海,2012,35(3):11-15. [Yuan G N, Yuan K F, Zhang W H, et al. Discussion of information sharing principle for federated filter[J]. Navigation of China, 2012,35(3):11-15.]
- [19] 徐晓滨,文成林,王迎昌.基于模糊故障特征信息的随机集度量信息融合诊断方法[J].电子与信息学报,2009,31(7):1635-1640. [Xu X B, Wen C L, Wang Y C. Information fusion algorithm of fault diagnosis based on random set metrics of fuzzy fault features[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(7):1635-1640.]
- [20] Jiang W, Wu C, Jia J, et al. A probabilistic transformation of basic probability assignment (BPA) in D-S evidence theory[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013,31(2):295-299.
- [21] 马丽丽,张芬,陈金广.一种基于Pignistic概率距离的合成公式[J].计算机工程与应用,2015,51(24):61-66. [Ma L L, Zhang F, Chen J G. Synthetic rule of evidence based on Pignistic probability distance[J]. Computer Engineering & Applications, 2015, 51(24):61-66.]
- [22] Smets P. Constructing the Pignistic probability function in a context of uncertainty[J]. Machine Intelligence & Pattern Recognition, 1990,10(1):29-39.
- [23] 钱华明,朱明,陈亮.信息熵在导航传感器故障诊断中的应用研究[J].系统仿真学报,2010,22(S1):216-219. [Qian H M, Zhu M, Chen L. Information entropy for fault diagnosis of inertia navigation[J]. Journal of System Simulation, 2010,22(S1):216-219.]
- [24] 杨可明,魏华锋,刘飞,等.以光谱信息熵改进的N-FINDR高光谱端元提取算法[J].地球信息科学学报,2015,17(8):979-985. [Yang K M, Wei H F, Liu F, et al. Improved N-FINDR algorithm on hyperspectral endmember extraction based on spectral Shannon entropy. 2015,17(8):979-985.]