

多源导航系统软、硬故障检测新方法研究

杨 镜¹, 华 冰², 熊 智²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 高新技术研究院, 江苏 南京 210016)

摘 要:故障检测和隔离对提高无人机的导航精度和可靠性有重要意义。针对残差卡方算法对小值软故障灵敏度差,改进序贯概率比(SPRT)算法无法判断故障结束时间的缺陷,提出了一种联合故障检测算法。该算法依靠残差卡方算法判断故障结束时间,从而及时对改进 SPRT 算法检测值进行修正,使改进 SPRT 算法能继续检测非第一次故障。改进 SPRT 算法对故障的灵敏度高,且残差卡方算法能准确判别故障结束时间。仿真结果表明,该综合算法对小值软故障、大值阶跃故障都有很好的检测效果,有效提高了系统的故障检测能力及灵敏度,增强了组合导航系统的可靠性。

关键词:残差卡方算法;改进序贯概率比(SPRT)算法;组合导航;联合故障检测

中图分类号:V448 **文献标识码:**A

New Method for Soft and Hard Fault Detection in Multi-source Navigation System

YANG Jing¹, HUA Bing², XIONG Zhi²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Frontier Science of Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Fault detection and isolation are very important to improve the UAV navigation accuracy and reliability. The residual chi-square algorithm is poor sensitive for small values of soft fault and improved SPRT algorithm can't judge the ending time of the fault, so this paper presents an integrated fault detection algorithm. If the residual chi-square algorithm determined the fault ending, the improved SPRT algorithm detection value is corrected on time. As a result, the improved SPRT algorithm can detect faults after the first time. Because of the improved SPRT algorithm is of high sensitivity to fault and residual chi-square algorithm can accurately distinguish the fault ending time, the simulation results show that this integrated algorithm has good detecting effect for small values of soft fault or large values step fault. Therefore, this integrated algorithm can effectively improve the ability and sensitivity of the system fault detection and enhance the reliability of the integrated navigation system.

Key words: residual chi-square algorithm; improved SPRT algorithm; integrated navigation; integrated fault detection

0 引言

无人机的全程高精度导航需融合多种导航信息源^[1],正是由于引入了多个导航设备,从而加大了多源组合导航系统出现故障的概率。因此,一个有效的多源组合导航系统,除能提供高精度的导航信息外,当某个或某些导航设备发生故障时,也必须能快速、准确地定位故障发生的子系统,同时进行隔离及系统的重构。

目前组合导航系统的故障检测方法主要包括数据变化率检验法、模糊识别判断法及神经网络法等^[2-4]。文献[5]对残差 χ^2 检验法进行了改进,运用

模糊逻辑和加权平均处理检验阈值,可根据突变信号的大小自动调节检测时间的长短;文献[6]认为任何一个封闭的系统都可用函数模型来正确描述,提出了一种基于模型的故障检测算法;文献[7]认为设备故障将引起状态估计精度的下降,对因观测量引入的故障,利用残差 χ^2 检验法能很快检测并隔离,但由于故障隔离存在延迟,子滤波器估计值中存在短暂的异常值;文献[8]针对组合导航系统观测量信息无冗余且观测量可能存在故障的情形,提出了一种基于状态 χ^2 检验与自适应概率神经网络(AP-NN)相结合的组合导航故障诊断方法。

收稿日期:2013-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61203188);中央高校基本科研业务费专项资金基金资助项目(NS2012128)

作者简介:杨镜(1988-),女,江苏南通人,硕士生,主要从事惯性技术及组合导航的研究。

在组合导航系统中,常用残差 χ^2 检验法,如文献[5]、[7]研究了组合导航系统中的故障检测问题,但残差 χ^2 检验法对缓变故障不灵敏,因此文献[9]使用序贯概率比(SPRT)法进行组合导航系统故障检测。但SPRT法具有局限性,在故障结束后其监测值需要一定的时间才能恢复正常,特别是系统存在多次故障发生时,算法的灵敏性变得很差。因此,本文针对无人机导航系统多组合,故障类型多的特点,分析了系统故障的几种类型,深入研究了残差 χ^2 检测法和SPRT检测法的优缺点,提出一种残差 χ^2 -改进SPRT联合故障检测算法。仿真结果表明,该法对软、硬故障有很好的检测效果,能较好地应用于多源组合导航系统。

1 多源组合导航系统模型

1.1 多源组合导航系统结构

为有效满足无人机对多源组合导航的性能需求,采用容错联邦滤波结构进行多信息组合导航,其结构如图1所示。惯性导航子系统负责完成惯性导航解算,输出惯性导航信息;在此基础上,利用各辅助导航系统分别输出的载体位置、姿态等信息,与惯导进行信息融合,并构建相应的子滤波系统。组合导航系统中的故障检测模块(FDI)则实现对各子系统的故障检测,并决定是否对故障子系统进行隔离,以便主滤波器对正常的子系统进行重组,使部分导航传感器故障导致子系统失效后,综合导航系统仍能继续工作,确保系统具有较强的容错性。

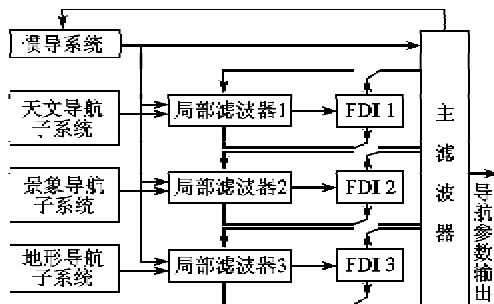


图1 多源组合导航系统结构图

1.2 多源组合导航系统故障分析

组合导航系统量测信息来源于各个导航传感器,当传感器处于非正常工作状态或发生故障时,都会输出错误的导航信息,进而影响到导航系统的性能。导致不同类型传感器出现故障的原因很多,但不同故障源引起的传感器输出故障信息具有一般性,主要可分为两类:

1) 软故障。软故障是一种随时间变化的故障信息,随着时间增大,其故障值也逐渐增大。故障值

和时间一般满足线性或二次方关系,软故障信息都是从较小值开始,然后逐渐增大,增大的快慢视故障系数而定。当系数较小时,故障信息会长时间保持小量,加大了故障检测和隔离的难度,因此,对小值软故障检测的灵敏度高低成为衡量检测算法好坏的重要指标之一。

2) 硬故障。硬故障信息与系统运行时间无关,一般表现为较大的阶跃值,硬故障是一种突变故障,对系统影响较大,因此需要在第一时间被准确检测出来并隔离,确保导航系统的正常工作。

2 基于残差卡方和改进SPRT算法的故障检测方法

2.1 残差卡方故障检测算法

针对多源组合导航系统的特点,采用一种 χ^2 检验法来确定系统量测信息的有效性,该方法并不确定造成故障的具体原因,而仅是实时地确定一组测量值的有效性,是一种系统级的故障检测算法^[10-12]。 χ^2 检验法主要包括状态 χ^2 检验法和残差 χ^2 检验法,而残差 χ^2 检测算法因算法实现简单,对大值的传感器故障信息有较好的检测效果等特点,成为传感器故障检测领域应用最广泛的检测算法之一。

组合导航系统中,对于每个局部滤波器,基于卡尔曼滤波器的残差值为

$$\gamma_i(k) = Z_i(k) - H_i(k)\hat{X}_i(k/k-1) \quad (1)$$

式中: $Z_i(k)$ 为量测量; $H_i(k)$ 为量测量与状态量之间的观测系数矩阵; $\hat{X}_i(k/k-1)$ 为系统状态量一步预测值。

在系统正常工作时, $\gamma_i(k)$ 为零均值高斯白噪声。于是得到方差为

$$A_i(k) = H_i(k)P_i(k/k-1)H_i^T(k) + R_i(k) \quad (2)$$

式中: $P_i(k/k-1)$ 为系统状态一步预测误差估计协方差阵; $R_i(k)$ 为量测噪声阵。

当系统出现故障后, $\gamma_i(k)$ 均值不再为0。因此可利用 $\gamma_i(k)$ 检测结果是否为0来判断系统是否出现故障。

对 $\gamma_i(k)$ 作以下二元假设:

H_0 : 无故障

$$E\{r_i(k)\} = 0, E\{r_i(k)r_i^T(k)\} = A_k \quad (3)$$

H_1 : 有故障

$$E\{r_i(k)\} = \mu, E\{[r_i(k) - \mu][r_i(k) - \mu]^T\} = A_k \quad (4)$$

其故障检测函数为

$$\lambda_i(k) = \gamma_i^T(k) A_i^{-1}(k) \gamma_i(k) \quad (5)$$

$\lambda_i(k)$ 函数服从自由度为 m 的 χ^2 分布, 即 $\lambda_i(k) \sim \chi(m)$, m 为观测矩阵 $Z_i(k)$ 的维数, 故障判断准则为

$$\begin{cases} \lambda_i(k) \geq T_D & \text{有故障} \\ \lambda_i(k) < T_D & \text{无故障} \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_D 为设定的故障门限值, 由误警率 P_f 查表获得。

2.2 改进 SPRT 故障检测算法

上文研究的残差 χ^2 检测算法对缓慢渐变的小值软故障信息检测灵敏度低, 无法满足无人机对组合导航系统高精度和高可靠性的需求。传统的 SPRT 故障检测算法检测值会出现负值, 导致故障检测时间延迟, 降低了实时性^[13]。针对该缺陷, 当检测量 x 为正态分布时, 提出了改进的 SPRT 故障检测算法。

设某未知正态随机变量 x 的 k 次序贯独立样本为 $\{x_i | i=1, 2, \dots, k\}$, 则由概率论与数理统计原理可得近似有 $x \sim N(\bar{x}_k, \sigma_k^2)$, 样本均值 \bar{x}_k 和方差 σ_k^2 分别表示为

$$\bar{x}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad (7)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_k)^2 \quad (8)$$

\bar{x}_k 是指无故障及有故障时的均值。

假定状态变量 x 的量测实际值为 x^* , 无故障状态时, $x^* = x_0$, x_0 为无故障情况下的真实值; 有故障状态时, $x^* = \bar{x}_k$ 。若定义 $H_0: x^* = x_0$; $H_1: x^* = \bar{x}_k$, 则量测序列 x_1, x_2, \dots, x_k 必属于两个样本类 H_0 (正常类) 和 H_1 (故障类) 之一, 同时其概率密度函数为

$$p(x_i | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \exp\left[-\frac{(x_i - x_0)^2}{2\sigma_k^2}\right] \quad (9)$$

$i=1, 2, \dots, k$

$$p(x_i | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \exp\left[-\frac{(x_i - \bar{x}_k)^2}{2\sigma_k^2}\right] \quad (10)$$

$i=1, 2, \dots, k$

于是可得其似然比:

$$L(k) = \exp\left[\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - x_0)^2 - (x_i - \bar{x}_k)^2}{2\sigma_k^2}\right] \quad (11)$$

对式(11)取自然对数, 得到对数似然比为

$$\lambda(k) = \ln\left\{\exp\left[\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - x_0)^2 - (x_i - \bar{x}_k)^2}{2\sigma_k^2}\right]\right\} = \sum_{i=1}^k \frac{(x_i - x_0)^2 - (x_i - \bar{x}_k)^2}{2\sigma_k^2} \quad (12)$$

对式(12)继续化简后得

$$\lambda(k) = \frac{k(\bar{x}_k - x_0)^2}{2\sigma_k^2} \quad (13)$$

当系统正常工作时, 随着 k 的增加, 样本均值 \bar{x}_k 逐渐逼近 x_0 , 即 $\lambda(k) \rightarrow 0$ 。当系统出现故障时, 随着 k 的增加, 样本均值 \bar{x}_k 仍逐渐逼近故障情况下的真值, 但该真值不同于 x_0 。通过分析可见, $\lambda(k)$ 不可能出现负值, 因此不存在检测延时的缺陷。

综上所述, 得到似然比 $\lambda(k)$ 的递推计算公式:

$$\begin{cases} \lambda(k) = \frac{k(\bar{x}_k - x_0)^2}{2\sigma_k^2} \\ \bar{x}_k = \frac{k-1}{k}\bar{x}_{k-1} + \frac{1}{k}x_k \\ \sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 + \frac{k-1}{k}(\bar{x}_{k-1} - x_k)^2 \end{cases} \quad (14)$$

若已知变量 x 的先验方差为 σ^2 , 则可用其代替 σ_k^2 , 故得

$$\lambda(k) = \frac{k(\bar{x}_k - x_0)^2}{2\sigma^2} \quad (15)$$

若变量 x 的先验方差未知, 则可用实时计算的样本方差来代替。

Wald 序贯概率算法中给出了 2 个检测阈值, 分别为 $T(H_0)$ 和 $T(H_1)$ 。对于上述改进算法, 仅需设定一个检测阈值 $T(H_1)$ 。 $T(H_1)$ 的计算与 Wald 算法一致, 即由 P_f 和漏警率 P_m 确定:

$$T(H_1) = \ln\left(\frac{1-P_m}{P_f}\right) \quad (16)$$

于是故障判决准则为

$$\begin{cases} \lambda(k) \geq T(H_1) \rightarrow \text{判决 } H_1 \text{ 为真, 有故障} \\ \lambda(k) < T(H_1) \rightarrow \text{继续检测} \end{cases} \quad (17)$$

2.3 联合故障检测算法

改进的 SPRT 故障检测函数在计算故障检测值时采用了迭代递推的方法, 充分利用了前一时刻的检测值, 因此当系统发生故障后, 故障检测值迅速增大到检测阈值, 且不可能出现负值, 对小值缓变软故障具有很高的灵敏性。但 SPRT 法的迭代递推性也有缺陷: 当故障消失后, 故障检测值需要较长时间才能恢复到检测阈值以下。因此, 改进的 SPRT 法无法准确获知故障的结束时间, 也不能检测出非第一次故障信息。残差 χ^2 检测算法仅跟当前时刻

的检测值有关,不具有递推叠加特性,因此能准确及时地判断出故障结束时间。因此提出一种结合二者特性的残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法,方案设计如图 2 所示。

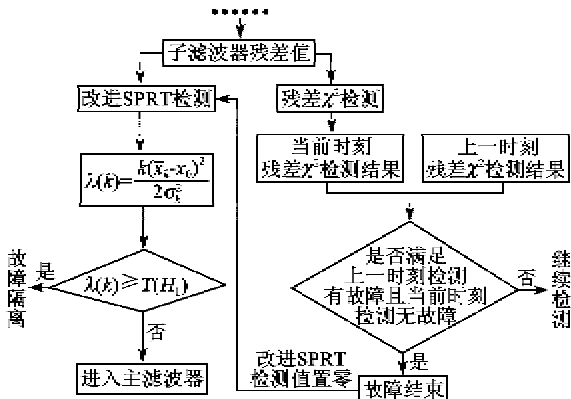


图 2 残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法方案

子滤波器残差值分别进行改进 SPRT 检测和残差 χ^2 检测,当残差 χ^2 检测算法判断出故障结束时,将改进 SPRT 检测值置 0,弥补改进 SPRT 检测算法不能及时判断出故障结束时间的缺陷。当改进 SPRT 检测值未达到设定的阈值时,则判定系统正常,子滤波器的滤波值直接进入主滤波器;当改进 SPRT 检测值超过设定的阈值时,则判定系统出现故障,立即对该子系统进行故障隔离,并利用剩余的导航子系统重新构造联邦滤波结构,从而保证整体系统不因单一的传感器故障而无法正常工作,当检测到故障子系统输出信息恢复正常后,再重新将其滤波信息送入联邦滤波器参与数据信息融合。

3 仿真分析

针对上述研究的联合故障检测算法,结合无人机的飞行特性进行仿真,以天文导航系统故障为例,验证理论研究的正确性及残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法的优越性。

3.1 仿真条件设置

设计飞行航迹,包括爬升、平飞和转弯等各种飞行状态,初始位置为北纬 20°、东经 110°、飞行高度为 500 m;飞机的初始速度为 0,航向正北。设置捷联惯性导航系统仿真参数,陀螺常值漂移为 0.01 (°)/h,陀螺白噪声误差为 0.01 (°)/h,陀螺一阶马尔科夫漂移误差为 0.01 (°)/h,陀螺一阶马尔科夫相关时间为 3 600 s,加速度计一阶马尔科夫偏置误差为 0.001 m/s²,加速度计一阶马尔科夫相关时间为 1 800 s。卡尔曼滤波器工作初始值为水平姿态角误差 0.083°,航向角误差为 0.001 7°,速度误

差为 0.6 m/s,位置误差为 50 m,卡尔曼滤波周期为 1 s。本文仿真的天文导航系统,其姿态误差均方差值为 0.001 7°。

对于导航系统中常见的故障信息,选择小值斜坡软故障和大值阶跃硬故障。对天文导航系统注入故障信息,通过故障检测算法对子滤波器输出信息进行检测。设置的具体故障信息如表 1 所示。表中 t 为系统运行时间, t_0 为故障开始时刻。

表 1 天文导航系统故障仿真参数

故障变量	故障时间段/s	故障类型	故障值大小/(°)
横滚、俯仰、航向	300~500	斜坡故障	0.1×(t-t ₀)
横滚、俯仰、航向	800~850	阶跃故障	20 倍量测噪声

3.2 残差卡方故障检测算法仿真及分析

根据仿真条件进行仿真,通过分析残差 χ^2 检测故障值来分析验证残差 χ^2 检测算法对传感器故障信息的检测性能。

由 2.1 节可知,残差 χ^2 故障检测函数 $\lambda_i(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布,对于天文辅助导航系统 $m=3$,设定 $P_f=0.1$,查 χ^2 分布表得检测阈值为 6.251。残差 χ^2 检测算法的故障检测值如图 3 所示,检测结果如表 2 所示。

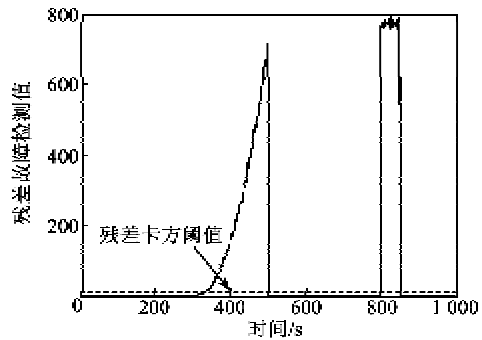


图 3 残差 χ^2 故障检测值

表 2 残差 χ^2 检测算法的检测结果

故障类型	开始时间/s	故障检出时间/s	故障判断结果
斜坡故障	300	323	延迟 23 s
阶跃故障	800	800	正确且无延迟

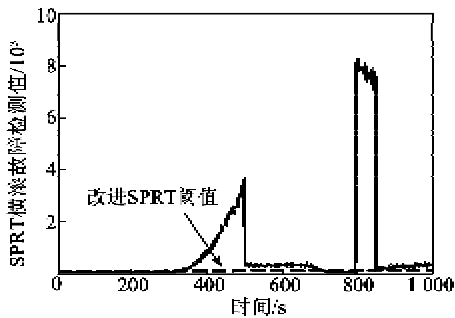
因残差 χ^2 故障检测算法的检测值仅与当前时刻的检测值有关,不具有递推叠加特性,因此只有当残差达一定数值后,故障检测值才会达到检测阈值。由图 3 及表 2 可看出,针对天文导航系统(CNS)的缓慢渐变软故障和大值阶跃故障,残差 χ^2 故障检测算法均可检测出故障信息且能及时判断故障结束时间。对于 300~500 s 加入的小值缓变软故障,残差

χ^2 检测算法检测灵敏度较低,在本次仿真条件下延迟 23 s;对于 800~850 s 加入的大值阶跃故障,残差 χ^2 检测算法能准确及时地检测出故障信息。

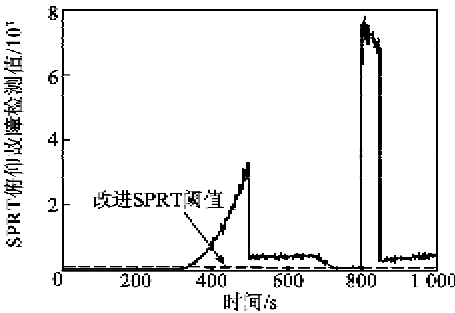
无故障隔离时,带有故障信息的 CNS 数据值会继续进入主滤波器进行滤波,从而导致整个系统的导航结果被污染,系统导航精度降低;当加入故障检测隔离后,系统根据检测出的故障信息对有故障的 CNS 数据进行隔离,不进入主滤波器进行滤波,从而保证整个导航系统依然能正常工作,系统导航精度不会明显下降。

3.3 改进 SPRT 故障检测算法仿真及分析

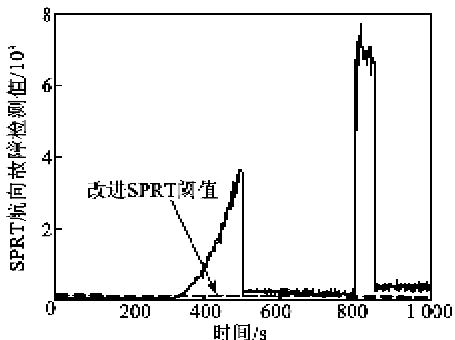
由于改进 SPRT 检测是一种对单个状态变量进行检测的算法,因此需分别对横滚、俯仰、航向信息进行检测。 $P_f=0.1, P_m=0.1$,根据式(16)求得检测阈值为 2.197。SPRT 检测算法的故障检测值如图 4 所示,检测结果如表 3 所示。



(a) 改进SPRT横滚故障检测值



(b) 改进SPRT俯仰故障检测值



(c) 改进SPRT航向故障检测值

图 4 改进 SPRT 故障检测值曲线

表 3 改进 SPRT 检测算法的检测结果

故障类型及 开始时间/s	故障检出时间/s	故障判断 结果
斜坡故障 300	横滚	305
	俯仰	306
	航向	303
阶跃故障 800	检测失败	检测失败

由图 4 及表 3 可得:

1) 对于 300~500 s 间注入的缓慢渐变小值软故障,本次仿真延迟了 6 s,改进的序贯概率比故障检测算法能快速检测出故障,这是因为改进的 SPRT 法在计算故障检测值时采用了迭代递推法,充分利用了之前时刻的检测值,当系统发生故障后,故障检测值可较迅速地增大到检测阈值。

2) 对于 800~850 s 间注入的大值阶跃故障,改进的 SPRT 检测算法无法正确检测出故障信息,这是由 SPRT 法故障检测值的迭代递推特性引起的。改进的 SPRT 法成功地检测出了第一次故障信息,当故障信息消失后,故障检测值需较长时间恢复到检测阈值以下。图 4 中 500~800 s 时间段,故障检测值逐渐减小,但依然大于检测阈值,故系统判断为有故障状态,800 s 时系统又注入了新的故障,此时故障检测值又会随着新的故障信息进一步增大。如此,采用改进的 SPRT 方法无法准确获知故障的结束时间,也不能检测出非第一次故障状态。

3.4 联合故障检测算法仿真及分析

根据残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法方案,对设置的故障进行检测,将 χ^2 检测值,改进 SPRT 检测值和联合故障检测状态值进行对比,设置 3 个姿态角的故障一样,以横滚角故障检测结果为例进行分析,如图 5 所示,其中综合检测故障状态图中,系统无故障时输出值为 0,有故障时输出值为 1。其检测结果如表 4 所示。

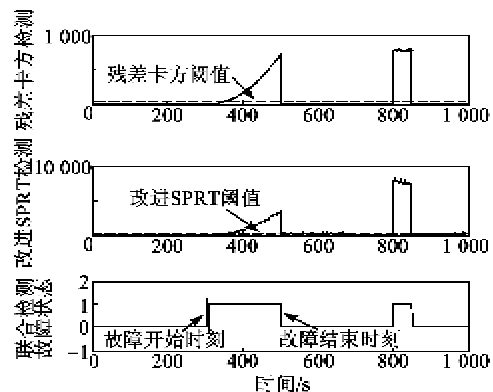


图 5 横滚故障检测结果对比

表4 残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测结果

检测算法	故障类型及开始时间/s	故障检出开始时间/s	故障检出结束时间/s	故障判断结果	
残差 χ^2 -改进 SPRT 综合 检测算法	斜坡故障,300	横滚	305	500	延迟 5 s
		俯仰	306	500	延迟 6 s
		航向	303	500	延迟 3 s
检测算法	阶跃故障,800	横滚	800	850	正确
		俯仰	800	850	正确
		航向	800	850	正确

由图5和表4可得:

1) 对于300~500 s间注入的缓慢渐变小值软故障,改进 SPRT 故障检测算法能正确检测出故障,比残差 χ^2 检测算法具有更高的灵敏性。本次仿真中,对于相同软故障信息,残差 χ^2 检测算法延迟23 s,改进的 SPRT 检测算法仅延迟6 s,残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法综合了改进 SPRT 算法对软故障灵敏的优点,对于300 s开始的缓慢渐变小值软故障,联合故障检测算法仅延迟了6 s。

2) 对于800~850 s间注入的大值阶跃故障,本次仿真中,改进 SPRT 检测算法检测失败,而残差 χ^2 检测算法检测准确,残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法综合了残差 χ^2 检测算法对故障结束时间判断准确的优点,及时对改进 SPRT 检测值进行了修正,在本次仿真中,联合故障检测算法准确的检测出800 s开始的大值阶跃故障。

通过使用残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法,融合了残差 χ^2 检测和改进 SPRT 检测的优点,可有效克服单一故障检测算法的不足,满足多源导航系统对阶跃和斜坡等多种类型故障检测的实时和准确性的要求。

4 结束语

本文结合无人机多源导航系统组合多,故障类型多的特点,深入研究了基于卡尔曼滤波残差的系统级故障检测算法:残差 χ^2 检测算法、改进 SPRT 检测算法,分析了各检测算法存在的不足,提出了残差 χ^2 -改进 SPRT 联合故障检测算法,运用残差 χ^2 算法判断故障结束时间,对改进 SPRT 检测值进行及时置0,使得改进 SPRT 算法能对非第一次故障进行检测,该联合故障检测算法对小值缓变软故障很敏感,且能准确检测出大值阶跃故障。仿真结果表明,该联合故障检测算法提高了系统故障检测的性能,保证了导航系统的正常工作,为无人机高精度高可靠性工作提供了保障。

参考文献:

- [1] 袁信,俞济祥,陈哲. 导航系统[M]. 北京:航空工业出版社,1993:250-262.
- [2] 彭蓉,秦永元. 自适应滤波方法在陀螺软故障检测中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(1): 81-85.
- [3] 樊春玲,金志华,田蔚凤. 基于小波模糊神经网络的陀螺仪故障诊断技术[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1):141-144.
- [4] 翁海娜,房建成,杨功流. 基于调频高斯小波变换的导航传感器故障诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4):477-480.
- [5] 刘建业,李丹,熊智. 一种改进的残差 χ^2 检验方法在联邦 UKF 滤波器中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12):2568-2573.
- [6] LUGHOFFER E, KLEMENT E P, LUJAN J M, et al. Model-based fault detection in multi-sensor measurement systems[C]//NJ, USA: 2004 2nd International IEEE Conference on Intelligent Systems' Proceedings. Piscataway, IEEE, 2004, 1:184-189.
- [7] 张同双,陈锋,李晓勇,等. 航天测量船 INS/GPS/DVL 组合导航系统容错滤波方法[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(5):21-23.
- [8] 连远锋,李国和,吴发林,等. 基于遗传 PNN 网络的组合导航故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1):121-126.
- [9] JARMANKD, SMITHLE, CARLSONDK. Sequential probability ratio test for long-term radiation monitoring[J]. Nuclear Science, IEEE Transactions, 2004, 51(4): 1662-1666.
- [10] LEE W, PARK C G. A Fault detection method of redundant IMU using modified principal component analysis[J]. Int'l J of Aeronautical & Space Sci, 2012, 13(3): 398-404.
- [11] 刘国良,张迎春,强文义,等. 组合导航系统故障检测方法的比较研究[J]. 控制工程, 2006, 13(2):117-119.
- [12] CORK L, WALKER R. Sensor fault detection for UAVs using a nonlinear dynamic model and the IMM-UKF algorithm[C]//Adelaide, Qld; IEEE 2007 Information Decision and Control, 2007:230-235.
- [13] 刘昆明,曾庆华. 序贯概率比检验用于残差检测的一种改进方法[J]. 电光与控制, 2009, 16(8):36-39.