

GNSS/SINS 紧组合导航故障检测与系统重构新方法

张 闯¹, 赵修斌¹, 庞春雷¹, 冯 波¹, 许云达²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 空军大连通信士官学校, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对传统新息 χ^2 检测法不能准确判断故障持续时间而造成的误警、漏警等问题, 提出了一种基于层次滤波器结构的故障检测与系统重构新方法: 利用新息检测法对各主、子滤波器进行故障检测, 通过比较各滤波器检测结果识别出故障卫星号, 将不包含故障星的子滤波器结果反馈到主滤波器及其他子滤波器, 并代替其滤波结果对系统进行重构, 进而辅助新息 χ^2 检测法进行故障检测。试验结果表明, 在单星故障条件下, 相比于传统新息 χ^2 检测法, 新方法减弱了新息 χ^2 检测法的跟踪作用, 实现了对故障星及故障时间的准确判定, 提高了组合导航系统的完好性监测能力。

关键词: 组合导航; 故障检测; 新息 χ^2 检测法; 层次滤波器; 系统重构

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0100-05

A Fault Detection and System Reconstruction Method for GNSS/SINS Tightly-Coupled System

ZHANG Chuang¹, ZHAO Xiu-bin¹, PANG Chun-lei¹, FENG Bo¹, XU Yun-da²

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

2. Dalian Air Force Communication NCO Academy, Dalian 116000, China)

Abstract: The conventional residual chi-square test can not accurately determine the fault duration and thus is easy to cause false alarm and alarm leakage. Aimed at this problem, a fault detection and system reconstruction method based on hierarchical filtering is proposed. The residual chi-square test is used for fault detection of main and sub filters, and the specific failure satellite can be identified by comparing the detection results. Then, the filtering results of the sub filter uncontained the failure satellite are feedback to the main filter and other filters and replace the results of them to reconstruct the system. The results show that: Under the condition of single satellite failure, the novel algorithm can reduce the fault tracing function, determine the failure satellite and fault duration more accurately, and improve the integrity monitoring performance significantly.

Key words: integrated navigation; fault detection; residual chi-square test; hierarchical filter; system reconstruction

0 引言

随着卫星导航系统的广泛运用, 其完好性问题越来越受重视。卫星导航系统的完好性是指当卫星信号发生故障或性能下降时, 系统及时向用户发出告警的能力。目前用户端完好性监测技术主要包括两类: 一是接收机自主完好性监测 (RAIM), 该技术已被广泛研究并逐渐趋于成熟, 但其受观测卫星数目影响较大, 需要至少 5 颗卫星才能完成故障检测, 至少 6 颗卫星才

能进行故障识别, 由于卫星信号容易受到干扰或遮挡, 不能保证在整个时空范围内均有足够的冗余来进行完好性检测^[1-2]; 另一类是其他导航系统辅助 GNSS 完好性监测^[2], 如采用惯性导航系统、气压高度表等外部辅助信息。

目前组合导航系统常用的完好性检测算法有两类^[3]: 一类是基于当前时刻观测量的“快照法”, 如新息 χ^2 检测法^[4]、多解分离算法 (Multiple Solution Separation, MSS)^[5]; 另一类是基于历史观测量的“连续法”, 如自主完好性监测外推法 (Autonomous Integrity Monitored Extrapolation, AIME)^[6-8]、最优故障检测法 (Optimal Fault Detection, OFD)^[9]。根据故障的时间特性, 导航系统故障主要分为阶跃故障和斜坡故障。对

收稿日期: 2016-02-04

修回日期: 2016-04-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61273049)

作者简介: 张 闯 (1992—), 男, 湖北天门人, 硕士生, 研究方向为组合导航技术。

于阶跃故障,常采用新息 χ^2 检测法进行检测,文献[1, 4]对新息检验法的性能进行了仿真分析,结果表明,该方法对阶跃故障和快变的斜坡故障具有较好的检测效果,但对于慢变的斜坡故障检测效果不是很理想,同时该方法只能检测系统故障,无法对故障星进行识别。文献[10]提出了层次滤波器结构的故障检测方法,一定程度上能够对单颗故障卫星进行检测与识别。但是,以上方法对于故障的持续时间都没有进行准确判定,在一定程度上导致检测结果出现了误警和漏警。

针对以上问题,本文提出了一种基于层次滤波器结构的故障检测与系统重构方法。实测数据试验结果表明,在单星故障条件下,该方法具有较好的完好性检测效果。

1 惯性/卫星紧组合导航系统模型

组合导航系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \\ X = [\phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \\ \varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \delta t_u, \delta t_m]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为数学平台失准角; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 分别为载体东向、北向和天向的速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 分别为纬度误差、经度误差和高度误差; $\varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}$ 为陀螺随机常值零偏; $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 为陀螺相关漂移; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加速度计随机常值零偏; δt_u 为与接收机时钟误差等效的距离偏差; δt_m 为与接收机频率误差等效的距离变化率误差。

组合导航系统的观测方程为

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (2)$$

观测量取接收机测量伪距、伪距率与惯导解算伪距、伪距率之差,则上式可写为

$$\begin{bmatrix} Z_p \\ Z_{\dot{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_p \\ H_{\dot{p}} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} V_p \\ V_{\dot{p}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Z_p, Z_{\dot{p}}$ 分别为接收机测量伪距、伪距率与惯导解算伪距、伪距率做差所得到的观测矢量; $H_p, H_{\dot{p}}$ 分别为伪距量测矩阵和伪距率量测矩阵; $V_p, V_{\dot{p}}$ 分别为伪距、伪距率量测噪声。

2 新息 χ^2 检测法

2.1 新息 χ^2 检测法原理

对于离散线性系统,其状态方程和量测方程为

$$X_k = \Phi_{k,k-1}X_{k-1} + \Gamma_{k-1}W_{k-1} \quad (4)$$

$$Z_k = H_kX_k + V_k \quad (5)$$

状态一步预测为

$$\bar{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1}\hat{X}_{k-1} \quad (6)$$

新息向量为

$$y_k = Z_k - H_k\bar{X}_{k/k-1} \quad (7)$$

新息序列协方差矩阵为

$$P_{rk} = H_kP_{k/k-1}H_k^T + R_k \quad (8)$$

构造故障检测函数

$$\Lambda_k = y_k^T P_{rk}^{-1} y_k \quad (9)$$

由新息统计特性可知, Λ_k 服从自由度为 n 的 χ^2 分布,其中, n 为观测向量的维数。设虚警概率为 P_{FA} ,则有 $P\{\Lambda_k > T_d\} = P_{FA}$, T_d 为由虚警概率得到的门限,可查表获得。则故障判别准则为

$$\begin{cases} \Lambda_k > T_d & \text{存在故障} \\ \Lambda_k \leq T_d & \text{不存在故障} \end{cases} \quad (10)$$

表1所示为当误警概率 $P_{FA} = 10^{-5} h^{-1}$ 时,不同卫星颗数所对应的检测门限值。

表1 卫星颗数与检测门限

Table 1 Number of visible satellite and test threshold

观测卫星数量 n (自由度 n)	检测门限 T_d	观测卫星数量 n (自由度 n)	检测门限 T_d
4	28.473	8	37.332
5	30.856	9	39.341
6	33.107	10	41.296
7	35.258		

2.2 新息 χ^2 检测法试验

试验条件:SPAN-CPT型号的紧组合导航产品和NGG703天线各一个,用以输出惯导原始陀螺和加速度计信息以及GPS数据信息,IMU采样频率为100 Hz, GPS数据采样周期为1 Hz,组合周期为1 Hz。

试验方法:利用组合导航产品进行跑车试验,试验时间为500 s,试验过程中观测到8颗卫星,相应的检测门限查表可得 $T_d = 37.332$ 。试验中,选取在第4颗卫星的观测伪距上设置故障,故障模式1:在100~150 s时间段内添加80 m的较大阶跃故障;故障模式2:在230~280 s时间段内添加20 m的较小阶跃故障;故障模式3:在200~280 s时间内添加2 m/s的快变斜坡故障。

3种故障模式下的新息 χ^2 检测结果分别如图1~图3所示。

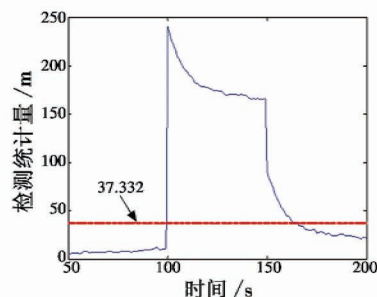


图1 80 m阶跃故障时新息 χ^2 检测结果

Fig. 1 The result of chi-square test for step error about 80 m

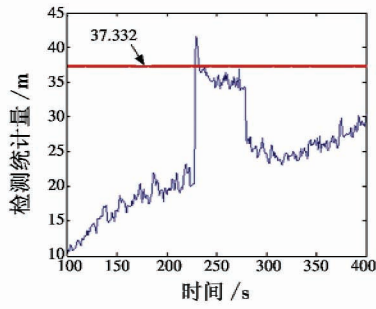


图2 20 m 阶跃故障时新息 χ^2 检测结果

Fig.2 The result of chi-square test for step error about 20 m

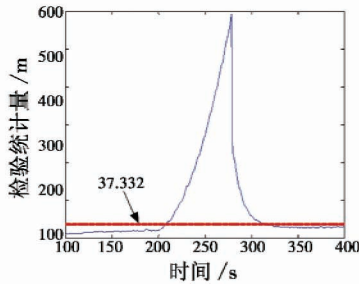


图3 2 m/s 斜坡故障时新息 χ^2 检测结果

Fig.3 The result of chi-square test for 2 m/s ramp failure

由图1、图2可以看出,对于突变的阶跃故障,新息 χ^2 检测法能够及时检测出故障发生的时刻,不存在检测延时,检测效果较好。但在故障发生期间,检验统计量存在很明显的下降趋势,当阶跃故障较小时,存在故障期间检验统计量逐渐低于检测门限而造成漏警现象,当阶跃故障较大时,存在故障结束后检验统计量仍持续高于检测门限而造成误警现象。由图3可以看出,对于快变的斜坡故障,新息 χ^2 检测法能够在较短的时间内及时检测到故障,检验效果较好。但在故障结束后,也存在一段时间内检验统计量高于检测门限而造成误警现象。

通过对上面3种故障模式下的检测结果的分析,究其原因,主要是新息 χ^2 检测法存在着故障跟踪的问题。对于阶跃故障,当检测到故障发生后,受故障影响的状态估计量将会影响到下一时刻的状态预测值,进而导致残差变小,检验统计量出现下降趋势,如图1、图2所示;对于快变的斜坡故障,由于起初故障值较小,无法检测出来,当故障量到达一定程度后,也能被检测出来。对于1和3两种故障模式,当故障突然消失时,由于故障跟踪作用,检验统计量不会立刻下降到门限值以下,而是逐渐减小,慢慢降低,如图1、图3所示。

3 基于层次滤波器结构的故障检测与系统重构

为减小新息 χ^2 检测法存在的故障跟踪问题对故障检测结果的影响,实现对系统完好性的准确检测,本文设计了基于层次滤波器结构的故障检测与系统重构方

法,其原理如图4所示。

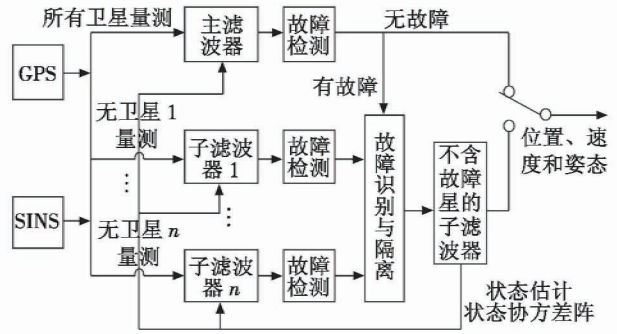


图4 故障检测与系统重构原理图

Fig.4 Schematic diagram of fault detection and system reconstruction

算法的具体实现步骤如下所述。

1) 假设 k 时刻共观测到 n 颗卫星,卫星号从小到大依次编为 $1 \sim n$,主滤波器利用所有卫星的量测信息与惯导组合进行滤波解算,子滤波器分别弃用 $1 \sim n$ 号卫星的量测信息,如子滤波器1采用的卫星编号为 $2 \sim n$,子滤波器2采用的卫星编号为 $1, 3 \sim n$ 。

2) 采用新息 χ^2 检测法分别对主滤波器和各子滤波器进行故障检测,当主滤波器检测到无故障时,判断系统无故障,将其解算结果作为导航输出。

3) 若主滤波器检测到故障,则通过比较各子滤波器的故障检测结果,当只有一个子滤波器未检测到故障时,可以判断该子滤波器弃用的卫星即为故障星。

4) 将不包含故障星的子滤波器解算结果作为导航输出,以实现故障星的隔离;同时,将该子滤波器的状态估计 \hat{X}_k 及其协方差矩阵 P_k 反馈到主滤波器和其余各子滤波器中,作为它们当前时刻的滤波结果,参与下一步滤波解算,对系统进行重构。

5) 下一时刻重复步骤1)~4)。

4 试验结果及分析

采用2节中的跑车试验数据进行本文算法的计算及验证,并与传统的新息 χ^2 检测法进行比较。故障模式设置如下。

1) 故障模式1:在100~150s时间段内向第4颗卫星伪距观测量上添加80m的较大阶跃故障。

2) 故障模式2:在230~280s时间段内向第4颗卫星伪距观测量上添加20m的较小阶跃故障。

3) 故障模式3:在200~280s时间段内向第4颗卫星伪距观测量上添加2m/s的快变斜坡故障。

故障模式1条件下两种方法的检测结果如图5所示。由图可知,对于较大的阶跃故障,传统的新息 χ^2 检测法存在故障结束后,仍有一段时间误警的现象,而采用本文算法进行故障检测,在100s时判断出第4颗卫星出现故障,采用子滤波器4的滤波结果进行系统重

构,辅助新息 χ^2 检测法进行故障检测,能够准确检测到故障发生的起始时刻,给出准确的告警信息。

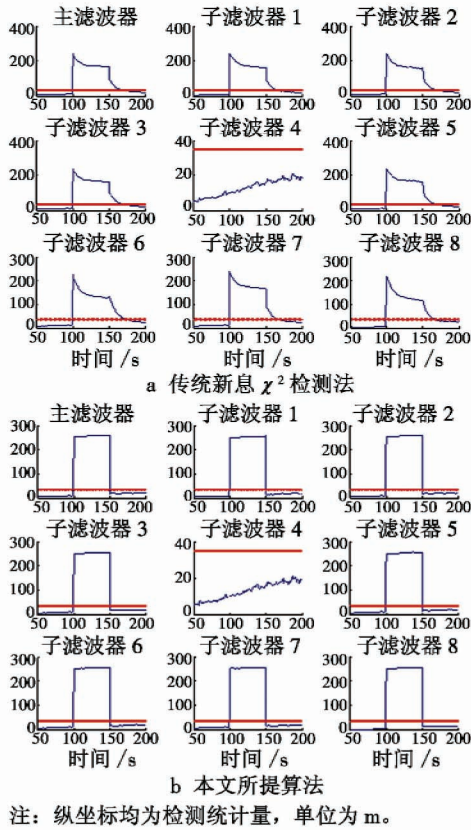


图5 80 m 阶跃故障时检测结果

Fig.5 The results of two methods for step error about 80 m

故障模式2条件下两种方法的检测结果如图6所示。由图可知,传统的新息 χ^2 检测法在检测较小的阶跃故障时,由于方法本身存在的故障跟踪作用,导致在检测到故障后,故障检测统计量出现减小趋势,进而造成了漏警现象,没能准确检测出故障;采用本文算法进行故障检测,在230 s时判断出第4颗卫星出现故障,利用子滤波器4的滤波结果进行系统重构,能够有效减小新息 χ^2 检测的跟踪作用,准确判断故障发生起始时刻及卫星号,并及时给出告警信息。

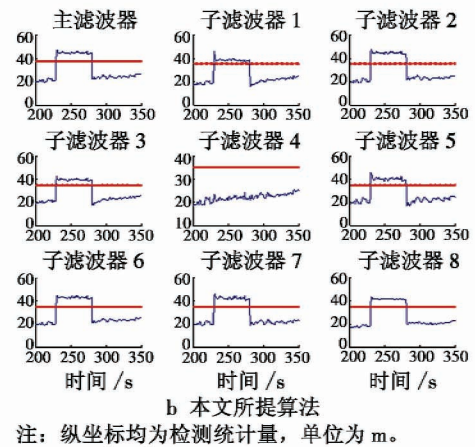
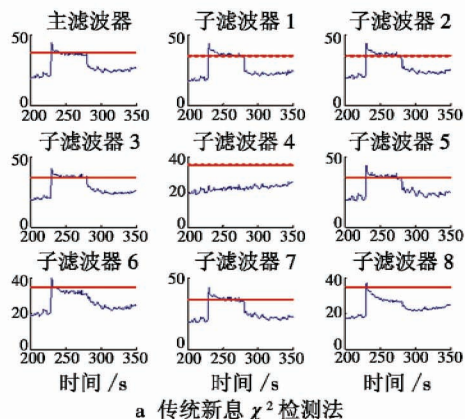


图6 20 m 阶跃故障时检测结果

Fig.6 The results of two methods for step error about 20 m

故障模式3条件下两种方法的检测结果如图7所示。由图可知,传统的新息 χ^2 检测法对于快变的斜坡故障能够在较短的时间内检测出来,但是,在故障结束后,由于其跟踪作用,导致了一段时间内检验统计量高于门限值,造成了误警现象;采用本文算法检测该故障,能够在较短的时间内检测出故障,同时,当故障结束时,能够及时判断出故障消失时刻,消除了误警现象。

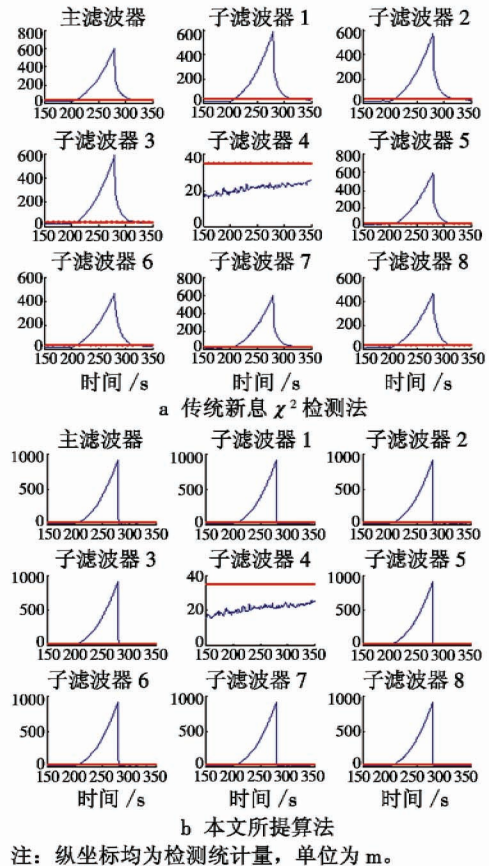


图7 2 m/s 斜坡故障时检测结果

Fig.7 The results of two methods for 2 m/s ramp failure

为定量分析两种方法的检测效果,对3种故障模

式下两种方法各主、子滤波器的故障检测时间及最终的故障告警时间进行了统计,具体结果如表 2 所示。表中: I 指基于层次滤波器的传统新息 χ^2 检测法, II 指本文所提方法;故障检测时间是指各主、子滤波器第一次检测到故障至检验统计量第一次低于门限时的这段时间;故障告警时间是指在主滤波器检测到故障的情况下,只有一个子滤波器未检测出故障的这段时间。

表 2 两方法故障检测结果

Table 2 The fault detection results of two methods

滤波器	故障模式 1 (100 ~ 150 s)		故障模式 2 (230 ~ 280 s)		故障模式 3 (200 ~ 280 s)	
	I	II	I	II	I	II
主	100 ~ 165	100 ~ 150	230 ~ 241	230 ~ 280	209 ~ 315	209 ~ 280
子 1	100 ~ 165	100 ~ 150	230 ~ 248	230 ~ 280	209 ~ 315	209 ~ 280
子 2	100 ~ 168	100 ~ 150	230 ~ 253	230 ~ 280	209 ~ 317	209 ~ 280
子 3	100 ~ 168	100 ~ 150	230 ~ 248	230 ~ 280	209 ~ 317	209 ~ 280
子 4	无	无	无	无	无	无
子 5	100 ~ 168	100 ~ 150	230 ~ 248	230 ~ 280	209 ~ 315	209 ~ 280
子 6	100 ~ 174	100 ~ 150	230 ~ 232	230 ~ 280	210 ~ 317	210 ~ 280
子 7	100 ~ 166	100 ~ 150	230 ~ 248	230 ~ 280	209 ~ 314	209 ~ 280
子 8	100 ~ 166	100 ~ 150	230 ~ 231	230 ~ 280	211 ~ 324	211 ~ 280
告警时间	100 ~ 165	100 ~ 150	230 ~ 231	230 ~ 280	211 ~ 314	211 ~ 280

由表 2 可知,传统新息 χ^2 检测法在 3 种故障模式下都存在误警或漏警现象,没能准确给出告警信息。本文所提方法能够及时检测到阶跃故障发生的起始时刻,也能在较短时间内检测出快变的斜坡故障,并准确判断出故障卫星号和故障结束时间,给出告警信息,检测效果较好。

本文算法之所以对 3 类故障都具有较好的检测效果,主要是在首次检测出故障以后,通过对故障卫星进行隔离,利用剩余正常卫星的观测数据进行滤波解算,得到了较为准确的状态估计及其协方差阵,将该滤波结果反馈到主滤波器和其他各子滤波器,通过采用较为准确的滤波结果代替受故障污染的值进行滤波解算,实现了对故障的有效隔离,消除了故障跟踪作用对滤波结果的影响。

5 结语

传统新息 χ^2 检测法由于没有对系统故障进行有效的隔离,导致其检测结果容易出现误警或漏警现象。针对该问题,本文提出的基于层次滤波器结构的故障

检测与系统重构方法,将不包含故障星的子滤波器滤波结果反馈到主滤波器和其他各子滤波器,实现了对系统故障的有效隔离。实测数据试验结果表明,该方法在一定程度上消除了新息 χ^2 检测法的跟踪作用,对 3 类故障模式都具有较好的检测效果,实现了对故障星和故障结束时间的准确判定。

参考文献

- [1] 刘海颖,岳亚洲,杨毅钧. 基于多解分离的 GNSS/Inertial 组合导航完好性监测[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 63-68.
- [2] 刘海颖,冯成涛,王惠南. 一种惯性辅助卫星导航系统及其完好性监测方法[J]. 宇航学报, 2011, 34(2): 775-780.
- [3] LEE Y C, O'LAUGHLIN D G. A performance analysis of a tightly coupled GPS/inertial system for two integrity monitoring methods[J]. Journal of Navigation, 2000, 47(3): 175-190.
- [4] 王娇,张英敏,李欣,等. 基于惯导辅助的 GPS 完好性监测技术[J]. 火箭与制导学报, 2011, 31(4): 228-231.
- [5] 雷宝权,曾进. 一种惯性辅助卫星完好性监测多解分离的优化方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3): 374-380.
- [6] LIU H Y, ZHENG G, WANG H N, et al. Research on integrity monitoring for integrated GNSS/SINS system[C]// The IEEE International Conference on Information and Automation, Harbin, China, 2010: 1990-1995.
- [7] BHATTI U I, OCHIENG W Y. Performance of rate detector algorithms for an integrated GPS/INS systems in the presence of slowly growing error[J]. GPS Solutions, 2012, 16(3): 293-301.
- [8] 李晓东,赵修斌,庞春雷,等. PBN 概念下的 GNSS/SINS 组合导航完好性算法[J]. 电光与控制, 2013, 20(1): 44-48.
- [9] BRUGGEMANN T S, GREER D G, WALKER R A. GPS fault detection with IMU and aircraft dynamics[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 305-316.
- [10] 彭兴钊,黄国荣,郭创,等. GPS/SINS 组合导航系统的故障检测与识别[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(10): 153-156.

(上接第 99 页)

- [10] SI X S, HU C H, KONG X Y, et al. A residual storage life prediction approach for systems with operation state switches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014. doi:10.1109/TIE.2014.2308135.
- [11] OLIVEIRA V D. Bayesian inference and prediction of

Gaussian random fields based on censored data[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2005, 14(1): 95-115.

- [12] SI X S, WANG W B, HU C H, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 50-67.