

基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法

王融^a, 刘建业^a, 熊智^a, 钟丽娜^{a,b}

(南京航空航天大学 a. 自动化学院, b. 金城学院, 南京 210016)

摘要: 基于联邦滤波的容错组合导航系统通常在判定故障时刻对故障子系统进行整体隔离, 未充分考虑缓变故障影响的渐近变化与状态分量间的差异. 为此, 提出一种基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法. 该算法通过子滤波器新息动态映射建立局部估计状态统计模型, 通过序贯概率比检测在线估计缓变故障影响下的局部状态质量, 并据此对融合过程进行自适应调节. 仿真结果表明, 所提出的方法能有效提高组合导航系统对缓变故障的自适应容错调节能力.

关键词: 组合导航; 自适应容错; 故障映射; 序贯概率比检验; 联邦滤波

中图分类号: V249

文献标志码: A

Adaptive fault-tolerant algorithm based on sequential probability mapping for integrated navigation

WANG Rong^a, LIU Jian-ye^a, XIONG Zhi^a, ZHONG Li-na^{a,b}

(a. College of Automation Engineering, b. Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: WANG Rong, E-mail: rongwang@nuaa.edu.cn)

Abstract: In the navigation based on the federated filter, the fault subsystem is isolated entirely on the fault-detected epoch, without considering the asymptotic changing and components difference of soft fault influence. Therefore, a kind of adaptive fault-tolerant algorithm based on sequential probability mapping for the integrated navigation is proposed. The statistic model of local estimation states is built by fault dynamic mapping. Then the quality of local estimation states under soft fault is calculated online by sequential probability ratio test and finally used in adaptive tuning of global fusion. The simulation results show that the proposed algorithm can improve the fault-tolerant performance under soft fault significantly.

Key words: integrated navigation; adaptive fault tolerance; fault mapping; sequential probability ratio test; federated filter

0 引言

随着先进飞行器技术的发展, 对导航系统容错性能的需求日益提高, 联邦滤波由于具有良好的潜在容错性能而受到广泛重视, 已被作为容错导航系统的典型滤波结构^[1-2]. 对于突变故障, 联邦滤波根据故障检测算法判定结果控制子滤波器信息是否接入主滤波器, 实现故障隔离和重构^[3]. 与突变故障相比, 缓变故障变化缓慢且不易被检测和识别. 如 GPS 伪距会因时钟漂移、轨道参数建模误差的影响产生缓变斜坡误差, 长时间的积累会引起位置解算结果发散. 因此, 提

高联邦滤波在缓变故障条件下的适应调节能力, 对于提高组合导航系统的容错性能具有重要的意义.

对于基于联邦滤波的容错导航系统的研究而言, 人们已在故障检测^[4-5]、信息分配方式^[6]、滤波算法结构^[7]方面做了大量工作. 但在融合处理方式上, 传统方法主要立足于对子系统的故障状态的整体判定进行隔离式的重构, 在缓变故障发生的情况下还存在一定不足: 一方面, 故障检测方法的判定只有“有故障”和“无故障”两种状态, 在被判定为故障之前, 该子系统仍正常接入主滤波器, 故障处理的滞后使得系

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2014-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374115, 91016019, 61210306075, 60904091, 61203188); 航空科学基金项目(2011 ZC52044); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ10-05); 国家留学基金委项目(2012 03070126); 江苏省六大人才高峰项目(2013-JY-013); 江苏省高校青蓝工程项目; 江苏高校优势学科建设工程项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NP2012505, NZ2013002).

作者简介: 王融(1984—), 男, 博士生, 从事多信息融合组合导航的研究; 刘建业(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事惯性技术与组合导航技术等研究.

统的状态估计受到故障信息的污染^[8];另一方面,由于各个导航子系统误差特性和滤波模型可观测性的差异,局部估计状态分量受到故障影响的程度不同,进行子滤波器整体判定和重构并不能准确反映故障影响的差异^[9].因此,设计能够准确反映故障影响下局部状态估计质量的方法,并据此对融合过程进行合理调节,是提高联邦滤波容错性能需要解决的关键问题^[10].

针对上述问题,本文提出一种基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法.该算法考虑到故障对不同状态分量影响的差异性,通过动态映射获得故障下局部估计分量的概率统计模型.在此基础上,针对缓变故障影响的渐近变化过程,由序贯概率比构造质量值进行量化评估,最后以此为依据对全局融合环节进行调节.仿真表明,该算法可以有效提高缓变故障下组合导航的精度,具有良好的工程应用价值.

1 自适应容错组合导航系统

目前,惯性/卫星组合导航系统以其良好的位置测量精度已成为无人机平台的基本配置.对于航空遥感测绘等应用,无人机装备有合成孔径雷达(SAR),可通过景象匹配提供航向和水平位置^[11],并由气压高度计提供高度信息^[12].采用联邦滤波构造INS/GPS/SAR自适应容错组合导航系统,如图1所示.

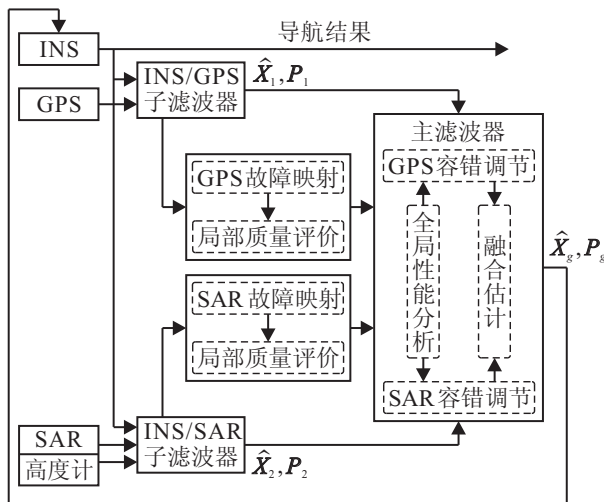


图1 INS/GPS/SAR自适应容错组合导航系统结构

联邦滤波全局融合,实质上是将各子滤波器局部估计信息根据其性能进行最优融合,因此准确评估缓变故障下局部状态估计量的质量对于发挥联邦滤波容错性十分重要.

2 序贯概率映射自适应融合算法

为了评估局部状态估计量的性能,根据误差传递关系将量测值的误差概率统计模型映射到状态量并计算其质量值,最后对全局融合进行调节.

2.1 动态故障映射模型

故障对局部估计状态的每个分量具有不同的影响,为此,首先通过对子滤波器进行分析来建立故障对局部状态估计量的动态映射模型.离散化的子滤波器滤波模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k/k) &= \\ \Phi(k, k-1)\mathbf{x}(k/k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{w}(k-1), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) + \mathbf{f}(k). \quad (2)$$

其中: $\Phi(k, k-1)$ 为子系统状态转移矩阵; $\Gamma(k-1)$ 为子系统噪声矩阵; $\mathbf{w}(k-1)$ 为系统噪声; $\mathbf{z}(k)$ 为观测量; $\mathbf{H}(k)$ 为子系统的量测矩阵; $\mathbf{v}(k)$ 为量测噪声,其协方差阵为 $\mathbf{R}(k)$; $\mathbf{f}(k)$ 为故障信息.

根据图1所示的组合导航系统方案,采用闭环滤波.子滤波器量测更新过程为

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k)\mathbf{A}(k)^{-1}, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}(k/k) = \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varepsilon}(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{P}(k/k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k/k-1). \quad (5)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 为滤波新息,其均值为 $\boldsymbol{\mu}$,协方差可由子滤波器估计,即

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k/k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k). \quad (6)$$

由式(4)可见,局部估计值与新息之间通过滤波增益形成线性映射.分析局部估计值向量中的分量,可得到

$$\hat{\mathbf{x}}(k/k)^{(i)} = \sum_{j=1}^n K(k)^{(i,j)}\boldsymbol{\varepsilon}(k)^{(j)}. \quad (7)$$

其中:上标 (i) 表示对应向量的第 i 个分量,上标 (i, j) 表示矩阵第 i 行第 j 列的分量.可见, $\hat{\mathbf{x}}(k/k)^{(i)}$ 为新息分量的线性组合.根据正态分布的性质^[13],局部状态估计分量服从正态分布,即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k/k)^{(i)} &\sim N(\xi^{(i)}, \sigma^{(i)}) = \\ N\left(\sum_{j=1}^n K(k)^{(i,j)}\boldsymbol{\mu}^{(j)}, \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n K(k)^{(i,j)}K(k)^{(i,l)}\mathbf{A}^{(j,l)}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

在组合导航系统故障分析中,常由故障统计原理对子滤波器新息的均值 $\boldsymbol{\mu}$ 进行如下二元假设^[14]:

$$\begin{cases} H_0: \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_0 = \mathbf{0}, \\ H_1: \boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_1 \neq \mathbf{0}. \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)的映射模型可得到对应的局部估计故障模型

$$\begin{cases} H_0: \xi^{(i)} = \xi_0^{(i)} = 0, \\ H_1: \xi^{(i)} = \xi_1^{(i)} = \sum_{j=1}^n K(k)^{(i,j)}\boldsymbol{\mu}_1^{(j)} \neq 0. \end{cases} \quad (10)$$

由于卡尔曼滤波增益随着滤波过程的进行而不断变化,式(8)的映射模型也会动态变化.

2.2 序贯概率质量值评估

为了对缓变故障造成的持续影响作出量化评估, 根据 2.1 节建立的动态故障映射模型, 由序贯概率检验构造局部估计状态量的质量值.

根据式 (8) 的统计模型, 局部估计值 $\hat{x}(k/k)^{(i)}$ 在二元故障假设下的先验概率如下 (本节推导仅针对局部估计值第 i 维分量, 令 $\hat{x}_k = \hat{x}(k/k)^{(i)}$):

$$p(\hat{x}|H_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\hat{x} - \xi_r)^2}{2\sigma^2}\right], r = 0, 1. \quad (11)$$

依据极大后验概率准则, 对于 \hat{x}_k 的 k 次序贯样本 $\mathbf{X}_k = \{\hat{x}_b|b = 1, 2, \dots, k\}$, 其似然比为

$$L(\mathbf{X}_k) = \frac{p(\mathbf{X}_k|H_1)}{p(\mathbf{X}_k|H_0)} = \prod_{b=1}^k \frac{p(x_b|H_1)}{p(x_b|H_0)}. \quad (12)$$

对式 (12) 进行对数变换, 令 $\lambda_k = \ln[L(\mathbf{X}_k)]$, 可得到对数似然比递推公式如下:

$$\begin{aligned} \lambda_k &= \ln[L(\mathbf{X}_k)] = \ln\left[\prod_{b=1}^k \frac{p(x_b|H_1)}{p(x_b|H_0)}\right] = \\ &= \ln\left[\prod_{b=1}^{k-1} \frac{p(\hat{x}_b|H_1)}{p(\hat{x}_b|H_0)}\right] + \ln\left[\frac{p(\hat{x}_k|H_1)}{p(\hat{x}_k|H_0)}\right] = \\ &= \lambda_{k-1} + \Delta\lambda_k. \end{aligned} \quad (13)$$

根据式 (11), 由于新息都服从正态分布, 由概率比计算的检验统计量只与故障信号幅度有关, 而与其符号无关. 根据序贯概率检测对缓变故障的跟踪特性^[15], 将局部状态估计的质量值定义为如下函数:

$$q(k) = \begin{cases} 0, & \lambda_k \geq T_1; \\ -\frac{\lambda_k}{2T_1} + 0.5, & 0 \leq \lambda_k < T_1; \\ \frac{\lambda_k}{2T_0} + 0.5, & T_0 < \lambda_k < 0; \\ 1, & \lambda_k \leq T_0. \end{cases} \quad (14)$$

其中 T_0 和 T_1 为故障判定阈值, 由误警率和漏警率设置^[16]. 检验统计量与质量值的关系如图 2 所示.

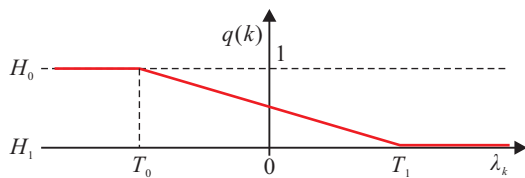


图 2 检验统计量与故障评估结果之间的映射关系

从图 2 中可以看出, 在序贯概率质量值评估方法中, 随着检验统计量的增大, 所设计的质量值逐渐从 0 平滑增加到 1, 能够反映系统从正常状态 H_0 到故障状态 H_1 的渐近变化过程. 由分析可知, 对于突变故障, 式 (14) 的质量值随着检验统计量的变化由 0 突变为 1, 因此也能够适用于该情况下的调节.

2.3 全局融合自适应调节

本节以局部状态估计量的质量值对全局估计进

行自适应调节, 从而提高系统容错性. 将 $\hat{x}(k/k)$ 各分量的质量值整合, 得到的局部估计质量向量为

$$\mathbf{q}_s = [q_s^{(1)} \quad q_s^{(2)} \quad \dots \quad q_s^{(m)}]^T. \quad (15)$$

对各子滤波器各分量的质量值进行全局分析, 设计对第 s 个子滤波器局部估计的调节因子向量为

$$\boldsymbol{\gamma}_s = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1, n \neq s}^N \mathbf{q}_n. \quad (16)$$

在对协方差矩阵进行调节时, 为保证卡尔曼滤波器的一致收敛稳定性, 采用对称加权的方式, 即

$$\bar{\mathbf{P}}_s(k/k) = \text{diag}\{\boldsymbol{\gamma}_s\} \mathbf{P}_s(k/k) \text{diag}\{\boldsymbol{\gamma}_s\}. \quad (17)$$

最后依据下式进行全局融合:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_g = \left(\sum_{s=1}^N \bar{\mathbf{P}}_s^{-1}(k/k)\right)^{-1}, \\ \mathbf{x}_g = \mathbf{P}_g \left(\sum_{s=1}^N \bar{\mathbf{P}}_s^{-1}(k/k) \mathbf{x}_s(k/k)\right). \end{cases} \quad (18)$$

子滤波器的协方差阵依据由序贯概率比构建的质量值进行调节, 相当于在全局融合时引入对局部估计受故障影响程度的参考条件. 因此, 能够根据故障影响合理配置各状态分量的权重, 有效地提高系统的容错性能.

3 仿真与分析

3.1 仿真条件

为了验证基于序贯概率映射的自适应融合算法的性能, 下面进行仿真研究. 仿真中采用动态飞行航迹, 仿真时间为 3 000 s, 初始位置为经度 110°, 纬度 20°, 高度 5 000 m, 初始航向角为 90°, 航迹中包括加减速、俯仰、横滚和航向的变化. 仿真中采用 0.05°/h 的陀螺和 $10^{-4}g$ 的加速度计, 其一阶马尔科夫相关时间分别为 3 600 s 和 1 800 s; GPS 接收机定位精度为 10 m, 测速精度为 0.2 m/s; SAR 航向误差为 1°, 水平定位误差为 30 m; 高度计误差为 30 m.

对于 GPS 经度测量值, 在 1 000 ~ 2 500 s 之间加入先增后减的小幅斜坡故障, 故障函数为

$$f_{\text{east}}(k) = \begin{cases} \frac{t-1000}{15}, & 1000 \text{ s} \leq t < 1750 \text{ s}; \\ \frac{2500-t}{15}, & 1750 \text{ s} < t \leq 2500 \text{ s}; \\ 0, & t < 1000 \text{ s} \text{ 或 } t > 2500 \text{ s}. \end{cases} \quad (19)$$

3.2 仿真结果分析

首先验证由动态映射模型和序贯概率比评估局部状态估计性能的效果. 对 INS/GPS 子滤波器局部状态估计量质量值的计算如图 3 所示.

从图 3 可以看出, 在 0 ~ 1 000 s 的时间段, GPS 处于正常状态, 此时经度误差和纬度误差局部状态估计量的质量值都保持在较高水平, 表明系统处于正常状态. 如图 3(b) 所示, 1 000 s 时在 GPS 经度测量值

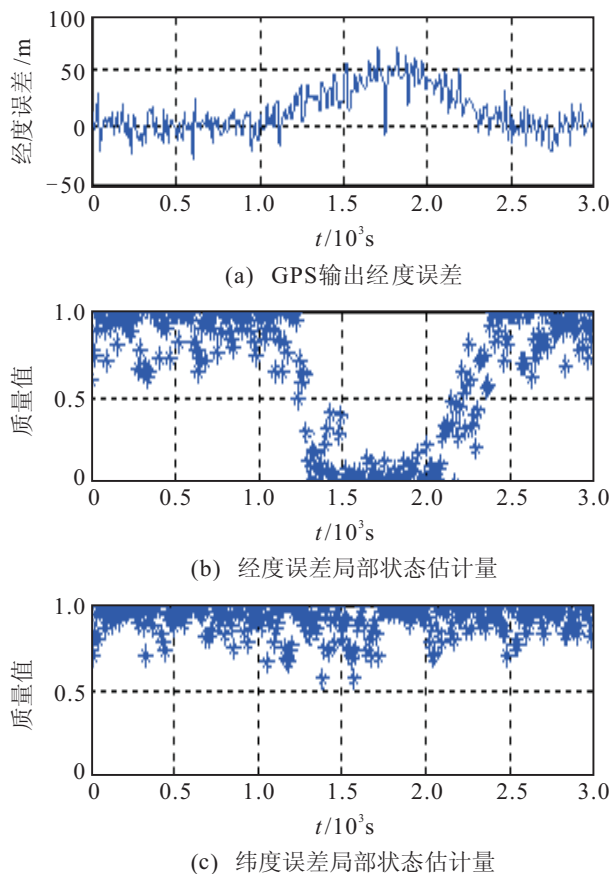


图 3 局部状态估计量质量值

中加入缓变故障, 经度误差局部状态估计量的质量值随着故障的变化而呈现先降低后升高的趋势, 这与图 3(a) 中的故障变化趋势相吻合, 反映了缓变故障对经度误差局部估计状态量的影响程度. 图 3(c) 中纬度误差质量值一直保持在较高的状态, 表明其并未受到 GPS 经度误差的直接影响, 与所设故障条件相吻合. 可见, 基于动态故障映射和序贯概率检验构造的质量值, 能够较好地反映缓变故障对局部状态估计量的影响程度.

在质量值评估分析的基础上, 与传统的定性判定整体隔离故障子系统容错处理方法进行比较, 进一步检验质量值调节的自适应融合算法在缓变故障条件下的容错性能和导航精度. 导航误差曲线对比如图 4 所示. 其中: FF 代表传统容错处理方法, QFF 代表质量值调节的自适应融合算法.

从图 4(a) 可以看出: 在 1000~2500 s 的缓变故障区间, 传统的容错处理方法采用瞬间隔离的处理方式, 在故障隔离前后误差出现较大幅度的波动; 而质量值调节的自适应融合算法则随着故障增大逐步降低纬度误差局部估计状态量的权重, 容错过渡过程中误差保持平稳. 由图 4(b) 可以看出: 传统容错处理方法在判定故障后将未发生故障的 GPS 纬度测量值也同时隔离, 影响了最终组合性能; 而质量值调节的自

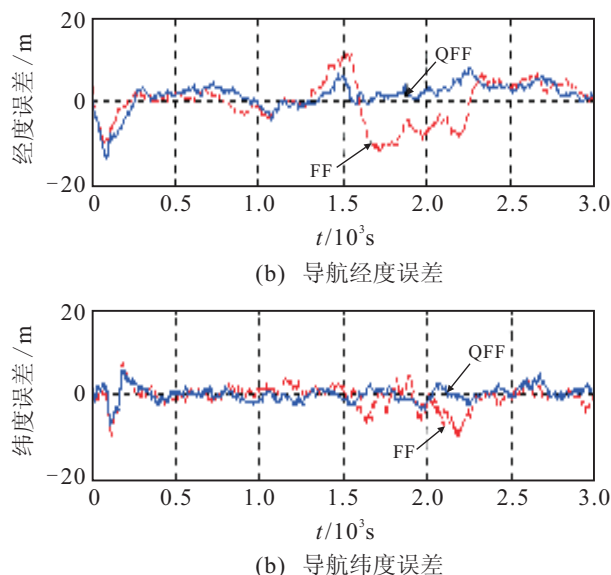


图 4 导航误差对比

适应融合算法则继续使用未受故障影响的纬度局部估计状态量, 保持了纬度方向导航精度的稳定.

对 1000~2500 s 缓变故障区间的导航误差统计结果如表 1 所示. 可以看出, 对于受到故障影响的经度和东向速度, 本文方法较传统方法将误差降低了 40%~50%, 其他未受到故障直接影响的导航参数精度也有所改善.

表 1 导航均方误差对比

误差项	速度误差/(m/s)			位置误差/m		
	东向	北向	天向	经度	纬度	高度
FF	14.1	7.7	8.6	6.34	2.73	4.11
QFF	6.7	6.6	7.2	3.38	2.56	2.88

综上所述, 与传统的容错处理方法相比, 本文质量值调节的自适应融合算法充分利用了局部状态估计信息, 对缓变故障具有更好的适应性.

4 结 论

传统联邦滤波容错组合导航系统未充分考虑缓变故障的渐近变化特点以及故障在不同状态分量间的影响差异, 为此, 本文提出了一种基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法. 通过动态故障、动态映射和序贯概率比构造质量值, 据此对全局融合环节进行调节. 仿真结果表明: 所构造的质量值能够较好地反映缓变故障对局部状态的影响程度; 基于自适应融合算法能够有效地提高缓变故障发生情况下的导航性能, 对增强多传感器组合导航系统的容错性具有参考意义.

参考文献(References)

- [1] David J A, Huamin Jia. A review of multi-sensor fusion methodologies for aircraft navigation systems[J]. The J of Navigation, 2005, 58(3): 405-417.

- [2] 林雪原. 多传感器组合导航系统的多尺度滤波算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(7): 1061-1065.
(Lin X Y. Multi-scale filtering method of multi-sensor integrated navigation system[J]. Control and Decision, 2012, 27(7): 1061-1065.)
- [3] 王其, 徐晓苏. 系统容错技术在水下航行器组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(2): 167-170.
(Wang Q, Xu X S. Application of fault-tolerant technology to integrated navigation system of underwater vehicle[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(2): 167-170.)
- [4] 钟丽娜, 刘建业, 李荣冰, 等. 基于 LSSVM 的惯性/卫星紧组合导航系统缓变故障检测方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(6): 754-758.
(Zhong L N, Liu J Y, Li R B, et al. Approach for detection of slowly growing errors in INS/GNSS tightly-coupled system based on LS-SVM[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(6): 754-758.)
- [5] Mu R J, Rong S Y, Cui N G. Federated filter with strengthened FDIR capability for multiple sensor navigation system[C]. Proc of ISSCAA. Harbin, 2006: 601-607.
- [6] Xiong Z, Chen J H, Wang R, et al. A new dynamic vector formed information sharing algorithm in federated filter[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 29(1): 37-46.
- [7] 穆荣军, 崔乃刚. 多传感器优化融合模型的理论及仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增 1): 326-328.
(Mu R J, Cui N G. Theoretical and simulation research on optimizing information fusion method for multi-sensor[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2006, 27(S1): 326-328.)
- [8] Umar I B, Wahington Y O. Performance of rate detector algorithms for an integrated GPS/INS systems in the presence of slowly growing error[J]. GPS Solutions, 2011, 16(3): 293-301.
- [9] Girija G, Christoph Z, Andreas K. Multi-sensor data fusion for sensor failure detection and health monitoring[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. San Francisco, 2005, 5843: 15-18.
- [10] Maier A, Kiesel S, Trommer G F. Performance analysis of federated filter for SAR/TRN/GPS/INS integration[J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(4): 293-300.
- [11] Conte G, Doherty P. An integrated UAV navigation system based on aerial image matching[C]. Aerospace Conf. Big Sky, Montana, 2008: 1-10.
- [12] Gao S S, Zhong Y M, Zhang X Y, et al. Multi-sensor optimal data fusion for INS/GPS/SAR integrated navigation system[J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(5): 232-237.
- [13] 熊德之. n 维正态各分量的线性组合服从正态分布的一个证明[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(3): 111-112.
(Xiong D Z. A method to prove linear combinations of components of n -dimensional normal random variable obey normal distribution[J]. J of Wuhan Institute of Technology, 2010, 32(3): 111-112.)
- [14] 刘建业, 曾庆化, 赵伟, 等. 导航系统理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 350-355.
(Liu J Y, Zeng Q H, Zhao W, et al. Navigation system theory and application[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 350-355.)
- [15] Kajenski P J. Firm track range estimation with truncated sequential tests[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(4): 436-440
- [16] Benkouider A M, Buvat J C, Cosmao J M, et al. Fault detection in semi-batch reactor using the EKF and statistical method[J]. J of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(2): 153-161.

(责任编辑: 曹洪武)