

文章编号: 1000-6893(2005)06-0743-05

一种联邦卡尔曼滤波渐变型故障容错方法

张国良¹, 曾 静², 李 陶¹, 邓方林¹

(1. 第二炮兵工程学院 301 室, 陕西 西安 710025)

(2. 第二炮兵工程学院 数学室, 陕西 西安 710025)

Fault-tolerance Designing of Federal Kalman Filter for Gradual Changing Fault

ZHANG Guo-liang¹, ZENG Jing², LI Tao¹, DENG Fang-lin¹

(1. Faculty 301, The Second Artillery Engineering College, Xi an 710025, China)

(2. Faculty of Mathematics, The Second Artillery Engineering College, Xi an 710025, China)

摘 要: 具有良好的容错性是组合导航系统的基本要求。组合导航系统易于完成突变型故障的检测与容错, 对渐变型故障的检测与容错则较为困难。文中以联邦卡尔曼滤波为组合导航系统状态估计方法, 针对渐变型故障, 提出了观测品质的概念及其模糊评估方法, 应用观测品质进行了导航系统的渐变型故障检测, 利用观测品质构成局部滤波器估计均方误差阵的修正矩阵, 设计了组合导航系统智能自适应渐变型故障容错方法并完成了仿真运算。

关键词: 容错滤波; 观测品质; 组合导航; 联邦卡尔曼滤波

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

Abstract: It is fundamental for integrated navigation system to possess fine fault tolerance. It is relatively easy for integrated navigation system to accomplish the abrupt changing fault detection and fault tolerating, as for gradual changing fault it is rather difficult. The federal Kalman Filter is applied in this essay for the state estimation of integrated navigation system, and the concept of observation quality as well as its fuzzy evaluation is presented to deal with the gradual changing fault. The observation quality is applied to detect the gradual changing fault of navigation system, and the observation quality is used to destruct the modified matrix of mean square error matrix of local filter estimation, the intelligent adaptive fault tolerance for gradual changing fault is designed for integrated navigation system. Finally, the simulation is accomplished.

Key words: fault-tolerance filter; observation quality; integrated navigation; Federal Kalman filter

组合导航系统一般以图 1 所示的联邦卡尔曼滤波作为基本的状态估计方法。组合导航系统要求在卡尔曼滤波信息融合过程中具有故障检测与容错功能。导航系统的工作故障一般可以分为突变型故障与渐变型故障两类。在卡尔曼滤波中, 突变型故障的检验与容错一般而言易于完成, 但对于渐变漂移的检验与容错则较为困难。本文综合考虑对各状态的估计误差及估计误差的变化速度, 提

出了子滤波器观测品质的概念, 并设计了基于观测品质的联邦卡尔曼滤波渐变型故障容错方法。

1 子滤波器的观测品质

卡尔曼滤波基本方程是以观测噪声为零均值白噪声为基础的。当导航系统存在渐变型故障时, 观测残差即新息 $Z_k - H_k X_{k/(k-1)}$ 表现为一个缓慢漂移的过程, 观测噪声的特性不再为零均值白噪声。对于这种噪声特性不确定情况, 应用方差上界技术与应用 P_k 范数信息因子调节方法将难于起到抑制噪声、提高滤波稳定性的作用。

本文提出一种评定子滤波器各状态量的观测品质的概念, 并利用观测品质自适应调整 P_k 阵中相应状态的量值, 从而达到抑制渐变漂移的作用。

如前所述, 令新息记为

$$\Gamma_k = Z_k - Z_k = Z_k - H_k X_{k/(k-1)} \quad (1)$$

卡尔曼滤波的状态估计方程为

$$\begin{aligned} X_k &= X_{k/(k-1)} + K_k (Z_k - H_k X_{k/(k-1)}) = \\ &X_{k/(k-1)} + K_k \Gamma_k \end{aligned} \quad (2)$$

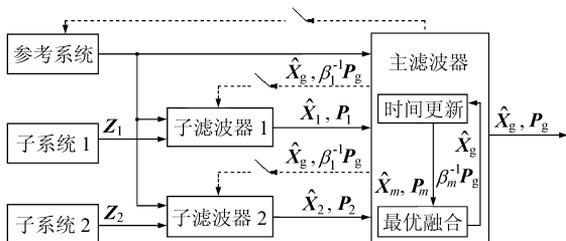


图 1 联邦卡尔曼滤波一般结构

Fig. 1 General structure of federal Kalman filter

收稿日期: 2004-09-06; 修订日期: 2005-03-09

由式(1),新息为观测值与系统一步预测值之差。由式(2),卡尔曼滤波状态估计的修正量主要来自观测值与一步预测值之差(即新息),新息中包含了量测信息的有用性度量,子滤波器的输出将通过滤波增益跟踪新息。当导航系统的观测值中不存在渐变漂移时,随着滤波方程的递推,新息将趋于零,卡尔曼滤波将趋于稳定。当子滤波器*i*中的辅助导航系统存在渐变漂移时,若用 Z_{ik} 表示辅助导航系统的观测值, X_{ik} 表示运动状态的真值, \tilde{V}_{ik} 表示渐变故障带来的渐变漂移,即

$$Z_{ik} = H_{ik} X_{ik} + \tilde{V}_{ik}$$

而新息(即观测值 Z_{ik} 与卡尔曼滤波的一步预测值 $H_{ik} \hat{X}_{i,k/(k-1)}$ 之差)

$$r_{ik} = Z_{ik} - H_{ik} \hat{X}_{i,k/(k-1)} = H_{ik} (X_{ik} - \hat{X}_{i,k/(k-1)}) + \tilde{V}_{ik} \quad (3)$$

由式(3),当不存在渐变漂移 \tilde{V}_{ik} 时, $r_{ik} = H_{ik} (X_{ik} - \hat{X}_{i,k/(k-1)})$ 将很小。当存在渐变漂移 \tilde{V}_{ik} 时,则卡尔曼滤波的残差(新息)将跟踪 \tilde{V}_{ik} 。即不但存在观测残差(新息) r_{ik} ,而且 r_{ik} 也将呈现渐变趋势,即存在 \dot{r}_{ik} 。由式(2),子滤波器的输出 \hat{X}_{ik} 将通过滤波增益 K_{ik} 跟踪新息 r_{ik} ,因此也将跟踪渐变漂移 \tilde{V}_{ik} ,如图2所示,并将进而影响整个滤波器的输出。因此,辅助传感器的观测质量,不仅表现为当前观测值与真值的差异,而且也表现在这种差异的变化趋势中。下面我们利用 r_{ik} 与其渐变趋势 \dot{r}_{ik} 来确定辅助导航系统的品质。

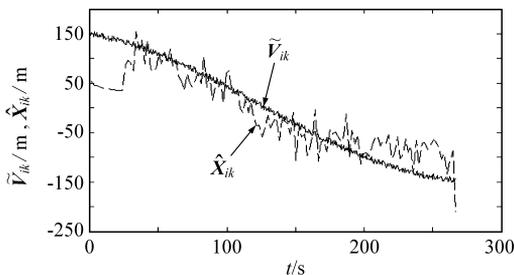


图2 子滤波器对渐变漂移的跟踪

Fig. 2 Subfilter tracing gradual changing drift

定义 观测品质的概念:在组合导航系统中,由卡尔曼滤波器滤波残差及其变化趋势来确定导航系统观测质量的一种度量。由于这种品质是由于观测而引起的,因此将其称为观测品质。

令子滤波器*i*在时刻*k*的观测品质记为 Q_{ik} ,则

$$Q_{ik} = f(r_{ik}, \dot{r}_{ik}) \quad (4)$$

由于在各状态观测中可能存在或不存在渐变漂移,而且渐变漂移的形式也不相同,因此需要对各状态分别确定其观测品质。即有

$$Q(j)_{ik} = f(r(j)_{ik}, \dot{r}(j)_{ik}) \quad (5)$$

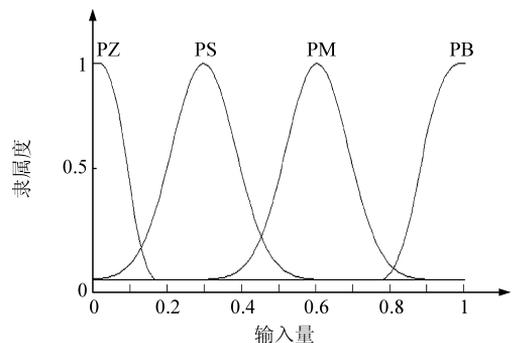
其中: k 为滤波时刻; i 为子滤波器序号; j 为观测的状态量序号。

由于对观测噪声及渐变漂移“大”“小”的评判本身具有模糊性,估计精度随着偏差的增大而逐渐变差,估计精度的评估实际上是一个模糊量,由 r_{ik} 与 \dot{r}_{ik} 确定的观测品质本身也是一个模糊量。因此,本文从模糊理论的角度,构建了一种子滤波器的观测品质的模糊评估方法。

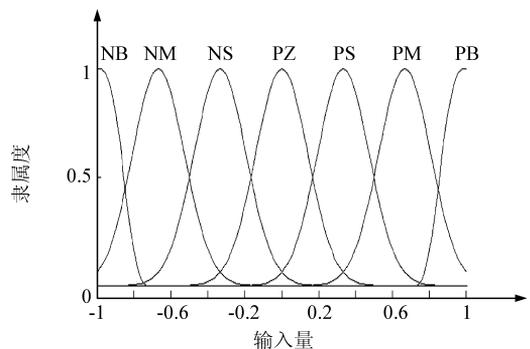
2 观测品质的模糊评估方法

将观测品质定义在区间 $[0, 1]$ 上,并将观测品质分为差、较差、较好、好几种情形,因此取 $Q(j)_{ik}$ 的模糊子集为{PZ, PS, PM, PB}。同时,将 $r(j)_{ik}$ 的值归一化到区间 $[-1, 1]$ 上,并将 $r(j)_{ik}$ 分为负大、负中、负小、几为零、正小、正中、正大几种情形,取 $r(j)_{ik}$ 的模糊子集为{NB, NM, NS, PZ, PS, PM, PB};同样地,将 $\dot{r}(j)_{ik}$ 的值归一化到区间 $[-1, 1]$ 上,并取 $\dot{r}(j)_{ik}$ 的模糊子集为{NB, NM, NS, PZ, PS, PM, PB}。

直接选用一些定义在实数域上,值域在 $[0, 1]$ 上的函数作隶属函数。在此主要选取 Gauss 型隶属函数来描述各元素对相应的模糊子集的隶属程度。如图3所示。



(a) 变量 $Q(j)_{ik}$ 的隶属函数



(b) 变量 $r(j)_{ik}$ 与 $\dot{r}(j)_{ik}$ 的隶属函数

图3 变量的隶属函数

Fig. 3 Membership function of variable

按照一个直观的原理来构建模糊规则,以便从 $r(j)_{ik}$ 与 $\dot{r}(j)_{ik}$ 的量值进行观测品质 $Q(j)_{ik}$ 的评估。当 $r(j)_{ik}$ 很小,而且其变化速度 $\dot{r}(j)_{ik}$ 也很小时,则观测品质是最好的,辅助导航系统存在渐变型故障的可能性最小。当 $r(j)_{ik}$ 为负大,而且 $\dot{r}(j)_{ik}$ 也为负大时,则 $r(j)_{ik}$ 已经向负向很大地偏离了时间更新值,并且有更快地向负向偏离的趋势,因此观测品质是最差的,辅助导航系统存在渐变型故障的可能性最大。其余情况依此类推。由于 $r(j)_{ik}$ 与 $\dot{r}(j)_{ik}$ 各有 7 个模糊子集,因此得到表 1 的 49 条模糊规则。

表 1 观测品质模糊评估规则

Table. 1 Fuzzy rules of observing quality evaluating

$Q(j)_{ik} \backslash \dot{r}(j)_{ik}$	$\dot{r}(j)_{ik}$						
$\dot{r}(j)_{ik} \backslash Q(j)_{ik}$	NB	NM	NS	PZ	PS	PM	PB
NB	PZ	PS	PS	PS	PM	PM	PM
NM	PS	PS	PS	PM	PM	PM	PM
NS	PS	PS	PM	PB	PM	PM	PS
PZ	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
PS	PS	PM	PM	PB	PM	PS	PS
PM	PM	PM	PM	PM	PS	PS	PS
PB	PM	PM	PM	PS	PS	PS	PZ

按照表 1 的模糊规则,经过模糊推理过程,得到观测品质 $Q(j)_{ik}$ 与子滤波器新息 $r(j)_{ik}$ 及其变化速度 $\dot{r}(j)_{ik}$ 的关系,如图 4 所示。其中模糊推理的过程是,首先将残差(即新息)与残差的变化速率作为模糊推理的输入,按照图 3(b)所示的隶属函数完成模糊化,然后采用 AND 模糊算子,得到在各个模糊规则 $Q(j)_{ik}$ 下属于不同模糊子集的隶属度,再将各模糊规则的结果进行集结,最后对模糊规则集结的结果按图 3(a)所示的隶属函数采用重心法去模糊化,则得到观测品质的量化结果。

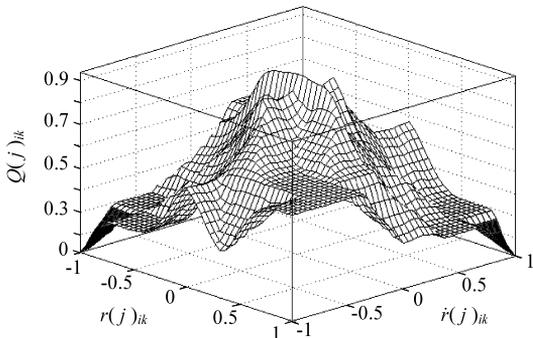


图 4 $Q_{ik}(j) = f(r_{ik}(j), \dot{r}_{ik}(j))$ 模糊推理输出曲面

Fig. 4 Fuzzy inference output surface of $Q_{ik}(j) = f(r_{ik}(j), \dot{r}_{ik}(j))$

3 基于观测品质的渐变故障容错滤波

得到关于各状态的观测品质后,应用状态的观测品质来修正子滤波器估计均方误差阵中与所观测的运动状态相关的量,抑制渐变型故障带来的影响。在修正估计均方误差阵时需要综合考虑各状态量的观测品质,因此首先需要按观测品质求修正因子。

记修正因子 $(j)_{ij}$ 为,并记修正因子的过渡变量 $(j)_{ik}$ 为。设有 m 个观测状态,令

$$(j)_{ik} = \left[\begin{matrix} m \\ l=1 \end{matrix} \right] Q(l)_{ik} - Q(j)_{ik} = \sum_{l=1}^m Q(l)_{ik}$$

令修正因子

$$(j)_{ik} = (j)_{ik} / \min((j)_{ik}) \quad (7)$$

其中: $(j)_{ik}$ 为由观测品质得到的过渡变量序列; $\min((j)_{ik})$ 为过渡变量序列 $(j)_{ik}$ 的最小值。由式(6)与式(7)可见, $(j)_{ik} \geq 1$ 。对于第 j 个状态观测,当其观测品质最好时,修正因子 $(j)_{ik}$ 最小,其值为 1;观测品质最差时,修正因子 $(j)_{ik}$ 最大。设 m 个观测状态在子滤波器的 P_{ik} 阵中的序数分别为第 1, 2, ..., m , 将 P_{ik} 中与观测状态相关的量记为 $P(1 \ m, 1 \ m)_{ik}$, 将 $P(1 \ m, 1 \ m)_{ik}$ 进行如下的重置

令

$$P(1 \ m, 1 \ m)_{ik} =$$

$$\text{diag}((j)_{ik}) P(1 \ m, 1 \ m)_{ik} \text{diag}((j)_{ik}) \quad (8)$$

再将 $P(1 \ m, 1 \ m)_{ik}$ 重置为 $P(1 \ m, 1 \ m)_{ik}$, 即令

$$P(1 \ m, 1 \ m)_{ik} = P(1 \ m, 1 \ m)_{ik} \quad (9)$$

式(8)中, $\text{diag}((j)_{ik})$ 为 P_{ik} 中与观测状态相关的量值的修正矩阵,它是由修正因子序列 $(j)_{ik}$ 构成的对角矩阵。在此后的运算中,将式(9)中赋予新值 $P(1 \ m, 1 \ m)_{ik}$ 的代入卡尔曼滤波运算过程。

由修正公式(8)及式(9)可以看到,对于观测品质最好的状态, P_{ik} 阵中相关的量不发生改变;而对观测品质不是最好的状态,我们将其增大并重置;观测品质最差的状态,其 P_{ik} 阵中相关量的重置最大,使得在主滤波器中进行信息融合时,对由该导航子系统得到的观测状态的信任程度降低,而对由其它导航子系统得到的观测状态的信任程度相应提高。例如,若图 1 中导航子系统 1 的某些观测质量存在渐变漂移,则在重置了子滤波器 P_{ik} 中阵相关量之后,导航子系统 1 观测状态的信任程度降低,而由导航子系统 2 的观测状态的信任程度则相

应提高。由于修正因子是由估计误差及估计误差的变化速度所共同决定的,因此当观测状态中的漂移越严重,则对相应观测的信任程度越低,从而有效地抑制了渐变型故障带来的影响。

应用模糊方法进行观测品质的计算较为麻烦。在实际应用中,可以预先进行各种归一化输入量的观测品质计算,并将计算结果存入计算机。在实时计算中只要将输入量按照同样的方法进行归一化,然后通过查表即可得到观测品质的量值,而不必进行复杂的计算。在归一化过程中,事先需要根据导航子系统渐变漂移的实测值或理论计算值,得到导航子系统渐变漂移中最大漂移量的绝对值。在组合导航系统卡尔曼滤波应用中,由于残差值可能为负,也可能为正,故将卡尔曼滤波计算中的残差值 r 除以渐变漂移中最大漂移量的绝对值,由残差本身的正负号决定其方向,由此可将残差的归一化值约束在 $[-1, 1]$ 之内,即完成归一化过程。对于残差的变化速率 \dot{r} 的归一化过程,可按相似的方法完成。

4 某组合导航系统联邦滤波器的容错滤波应用

现针对某弹道导弹 INS/ GNSS/ CNS(惯性/ 卫星/ 天文)组合导航系统状态估计进行仿真运算。假定卫星导航子系统的测量中含有渐变故障。卫星导航子系统出现渐变故障可能的原因有: 卫星本身的故障; 卫星星历的不准确; 卫星信号在传播过程中的电离层误差、对流层误差; 卫星接收机本身的故障。这些原因均可能导致卫星接收机输出的观测值中包含有渐变漂移。假定卫星导航系统其中一种或几种原因,卫星接收机输出的定位参数与速度参数(即卫星导航子系统对运动载体的观测值)中含有渐变漂移,则定位参数与速度参数的渐变漂移将包含在 INS/ GNSS 子滤波器的观测中。现针对此种情况进行仿真。

基于观测品质的联邦卡尔曼滤波渐变型故障容错滤波仿真流程如图 5 所示。图中详细给出了子滤波器 i 完成一次卡尔曼滤波递推算法的实现过程,即本文所提出的方法在仿真中的实现过程。略去了观测系统部分与主滤波器向子滤波器的反馈部分以及程序循环过程,以免显得冗余。其余各子滤波器的运算过程与子滤波器 i 相似。最后各子滤波器的输出在主滤波器中进行融合,输出关于运动状态的全局估计。其中,在计算 i 的值时,由于计算机仿真一般按离散形式进行运算,故可按式(10)进行近似计算。

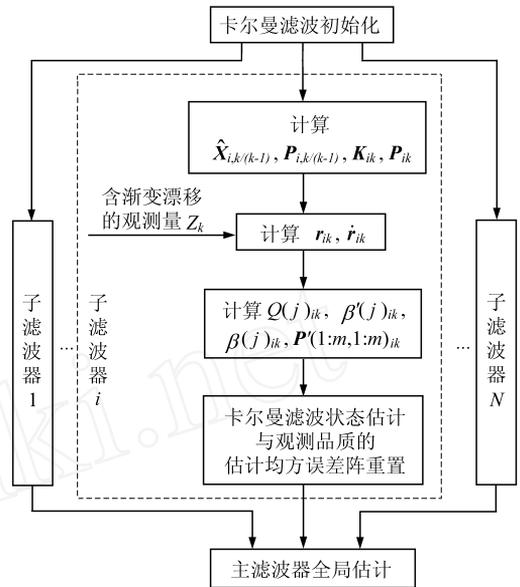


图 5 基于观测品质的联邦卡尔曼滤波渐变型故障容错滤波仿真流程

Fig. 5 Emluator flow chart of gradual changing fault-tolerance federal Kalman filter based observation quality

$$\dot{r}_{ik} = \frac{r_{ik} - r_{i(k-1)}}{t_k - t_{k-1}} \quad (10)$$

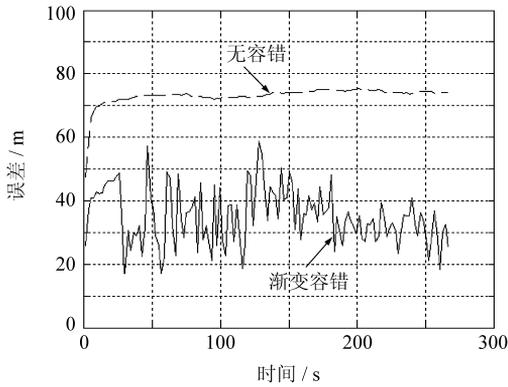
在主滤波器中进行全局估计的方法按照文献[1]中的算法进行,如式(11)和式(12)所示。其中, X_{gk}, P_{gk} 分别表示 X, P 在 k 时刻的全局估计。

$$P_{gk} = \left(\sum_{i=1}^n P_{ik}^{-1} \right)^{-1} \quad (11)$$

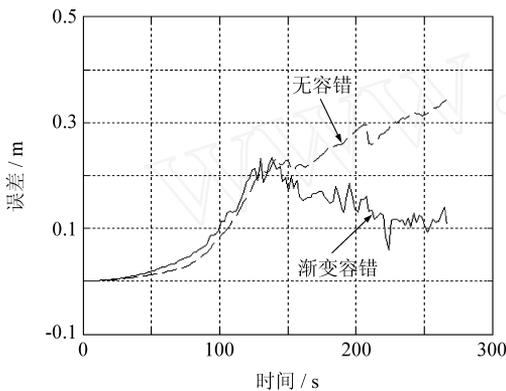
$$X_{gk} = P_{gk} \left(\sum_{i=1}^N P_{ik}^{-1} X_{ik} \right) \quad (12)$$

仿真中主要考虑如下因素: 由于卡尔曼滤波本身对于小幅值短周期的漂移具有较好的容错性,因此在仿真中设定其漂移是一个长周期大幅值过程,在定位与测速观测上加上一个在小随机分量上叠加的初始时刻为随机量、周期为 628 s 的正弦形式的渐变漂移。由于整个仿真时间为 267 s,其时长小于渐变漂移的半个正弦周期,且渐变漂移的初始点为随机时刻,因此可以保证仿真中加入的渐变漂移的形式具有不确定性。其中定位漂移的幅值为 152.97 m 乘以一个在区间 $[-1, 1]$ 上平均分布的随机数,测速漂移的幅值为 0.57 m/s 乘以一个在区间 $[-1, 1]$ 上平均分布的随机数。为最大可能地反映了各种随机干扰和随机误差对估计精度的影响,采用了蒙特卡洛仿真方法。蒙特卡罗方法一般要求试验次数在 200 次以上。我们进行了 300 次的仿真计算,得到的滤波结果如图 6 所示。

图 6(a) 给出的是联邦卡尔曼滤波器输出的



(a) X向位置量的滤波结果



(b) X向速度量的滤波结果

图6 基于观测品质的联邦卡尔曼滤波渐变型故障容错滤波结果

Fig. 6 Output of gradual changing fault-tolerance federal Kalman filter based observation quality

组合导航定位误差,即组合导航的定位结果与真值之差;图6(b)给出联邦卡尔曼滤波器输出的组合导航测速误差,即组合导航的测速结果与真值之差;其中虚线表示没有引入容错滤波方法时联邦卡尔曼滤波的滤波结果,实线表示采用本文提出的容错滤波方法时联邦滤波的滤波结果。由图6(a)和图6(b)可见,当辅助导航系统中存在渐变型故障时,与没有渐变故障容错滤波的结果相比,采用基于观测品质的联邦卡尔曼滤波容错方法,滤波器的稳定性及滤波精度得到了较大的提高。证明了容错滤波方法的有效性。基于观测品质的联邦卡尔曼滤波容错设计也可推广应用于其它多传感器信息融合系统中。需要说明的是,在对渐变型故障的容错设计中,人为地增大了子滤波器估计均方误差阵的量值,因此这也是一种次优滤波。

参 考 文 献

- [1] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filter and integrated navigation principle[M]. Xi an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 王宇飞,黄显林,胡恒章. 组合导航系统中一种基于特征值分解的自适应信息融合滤波算法[J]. 航空学报,2000,21(3):274-276.
Hang Y F, Huang X L, Hu H Z. Eigenvalue-decomposition-based adaptive information fusion filter algorithm for integrated navigation systems [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000,21(3):274-276. (in Chinese)
- [3] 申功勋,孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS组合导航系统中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
Shen G X, Sun J F. Information fusion theory application in inertial/celestial/GPS integrated navigation system[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1998.

作者简介:



张国良(1970-) 男,四川金堂人,第二炮兵工程学院自动控制工程系副教授,博士,1993年毕业于第二炮兵工程学院导弹测试专业,2003年于第二炮兵工程学院获导航制导与控制专业博士学位。主要从事组合导航与现代控制理论研究,E-mail:zhgl@sohu.com.



曾静(1973-) 女,四川金堂人,第二炮兵工程学院数学教研室副教授,博士研究生,1993年毕业于复旦大学数理统计专业。主要从事信息融合研究,E-mail:moulaizej@yahoo.com

李陶(1963-) 男,广东梅县人,第二炮兵工程学院自动控制工程系副教授,博士,1985年毕业于第二炮兵工程学院导弹测控专业,1995年于西北工业大学获飞行器控制制导与仿真专业博士学位。主要从事智能控制在组合导航系统中的应用研究。电话:13186000625.



邓方林(1937-) 男,陕西山阳人,第二炮兵工程学院自动控制工程系教授,博士生导师,1962年毕业于西北工业大学。主要从事系统分析与仿真技术研究。

(责任编辑:李泓洁)