

引用格式:李栋,仇振安,王锋,等.一种组合导航滤波算法的品质评估方法[J].电光与控制,2020,27(4):94-97. LI D, QIU Z A, WANG F, et al. A quality evaluating method for filter algorithm of integrated navigation[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):94-97.

一种组合导航滤波算法的品质评估方法

李栋, 仇振安, 王锋, 张宏飞, 靳冉
(陆装驻洛阳地区航空军事代表室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对基于单一性能指标进行组合导航滤波算法品质评估不全面的缺陷,提出了多性能指标融合的滤波算法品质评估方法。首先,定义了描述滤波算法准确性、实时性、稳定性和可靠性的性能指标;然后,建立了基于投影寻踪的组合导航滤波算法评估模型,采用遗传算法求解出最优投影方向,给出组合导航滤波算法总的评价指数;最后,对常规 Kalman 滤波和自适应滤波算法进行了仿真实验,结果表明,该方法可用于滤波算法的品质评估。

关键词: 滤波算法; 品质评估; 投影寻踪; 自适应滤波

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.018

A Quality Evaluating Method for Filter Algorithm of Integrated Navigation

LI Dong, QIU Zhen'an, WANG Feng, ZHANG Hongfei, JIN Ran
(The Aviation Military Deputy Office of Army in Luoyang, Luoyang 471000, China)

Abstract: A method for evaluating the quality of the filter algorithm for integrated navigation based on the projecting pursuit theory is proposed, which fuses multiple capability indexes, so as to overcome the disadvantage of only using a single capability index in evaluating the quality of the filter algorithm. Firstly, the capability indexes such as precision, real-time performance, stability and reliability of the filter algorithm are defined. Then, the quality evaluating model of the filter algorithm based on projecting pursuit is established, the optimal projection direction is solved by using the genetic algorithm, and then the comprehensive evaluating index is given. Finally, simulation tests are carried out, in which the adaptive filter is compared with the general Kalman filter, and the results indicate that the proposed method is valid in evaluating the quality of the filter algorithm.

Key words: filter algorithm; quality evaluation; projecting pursuit; adaptive filter

0 引言

滤波技术是组合导航系统的关键技术,对提高组合导航系统性能起重要作用。由于组合导航系统的特殊性,目前已有常规 Kalman 滤波、粒子滤波、无迹采样 Kalman 滤波、自适应滤波等多种滤波算法,而这些滤波算法本身都有各自的优点和适用条件^[1-4]。因此,建立滤波算法的性能指标,研究组合导航滤波算法品质评估方法具有重要的意义。

文献[5]将滤波精度和平均耗时作为反映滤波算法品质的性能指标,主要针对算法的准确性和实时性进行评估。然而,这种评估方法忽视了实际应用中非

常重要的可靠性和稳定性的要求。另外,各指标分别从不同侧面反映滤波算法的品质,在一定的条件下,指标越多,对算法的考核越全面,问题是如何根据这些指标综合评价滤波算法的性能。传统的评估方法主要是基于各指标的线性组合求综合评估值,采用专家打分法和层次分析法确定各性能指标的权重^[6-7]。但是这种方法主观性极强,存在很大的不确定性。

针对上述问题,提出了一种多性能指标融合的滤波算法品质评估方法,并利用仿真实验验证了该方法的有效性。

1 组合导航滤波算法性能指标的建立

一个好的组合导航滤波算法应考虑达到以下目标:准确性、实时性、稳定性和可靠性。依据这4个目标选取滤波精度 P_{pre} 、实时性 r_{realt} 、鲁棒性 r_{rob} 和容错性

收稿日期:2019-12-10

修回日期:2020-01-10

作者简介:李栋(1974—),男,陕西西安人,硕士,高工,研究方向为控制与导航。

F_{fault} 作为相应的评价指标,其具体定义如下。

1.1 滤波精度

滤波精度为状态变量的估计误差,是描述滤波算法准确性的指标。在组合导航滤波算法中,可以用 Kalman 滤波中的估计均方误差阵 \mathbf{P}_k 来表征滤波精度, \mathbf{P}_k 的计算见文献[8]。由于 \mathbf{P}_k 主对角元素为对应状态量的误差,故定义滤波精度为

$$P_{\text{pre}} = \frac{1}{E[\text{tr}(\mathbf{P}_k)]} \quad (1)$$

式中: $\text{tr}[\cdot]$ 表示矩阵 \mathbf{P}_k 的迹; $E[\cdot]$ 表示对该序列取均值。

1.2 实时性

组合导航系统和飞控系统进行交互时,组合导航系统对飞控系统提供导航解算参数,还必须满足滤波在线解算实时性的要求。

实时性描述了滤波算法的动态性能,数据的更新率越高,对实时性的要求就越严。一般情况下,实时性的要求与精度是相矛盾的,组合导航滤波算法的精度越高,算法就越复杂,从而算法实时性越差。因此,在组合导航滤波算法中,要在保证算法实时性的前提下尽量提高算法的精度。本文通过设置计时器,在线计算组合导航滤波的实时性 r_{real} 。

1.3 鲁棒性

稳定性是组合导航滤波算法正常工作的先决条件。组合导航滤波的稳定性是指随着滤波时间的增长,状态估计值逐渐不受初始状态值的影响,并且估计均方误差阵 \mathbf{P}_k 逐渐不受初始估计均方误差阵的影响。

组合导航滤波算法中,通常采用鲁棒性表征滤波算法稳定性。“鲁棒性”是指算法在一定的滤波对象结构、参数摄动下,维持其他某些性能的特性;或组合导航系统中状态噪声和观测噪声在一定变化范围内滤波算法仍可以正常工作的性能。定义鲁棒性 r_{rob} ^[9]为

$$r_{\text{rob}} = \left(\sup_{X_0, \{W_k, V_k\}} \frac{\sum_{k=0}^n \mathbf{e}_k^T \mathbf{e}_k}{(X_0 - \hat{X}_0) P_0 (X_0 - \hat{X}_0)^T + \sum_{k=0}^n \mathbf{W}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \mathbf{W}_k + \sum_{k=0}^n \mathbf{V}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{V}_k} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{e}_k = X_k - \hat{X}_{k/k}$,其他符号含义见文献[8]。

1.4 容错性

可靠性是反映滤波算法在受到故障影响下保持正常工作的性能。算法的可靠性主要指算法本身所具有的容错性,容错性是指存在滤波故障的情况下滤波算法不失效、仍能正常工作的特性。

一般地,故障信息通常直接反映在观测量中,间接

反映在残差中。残差计算式为

$$\mathbf{D}_k = Z_k - \mathbf{H}_k X_{k/k-1} \quad (3)$$

滤波正常时残差 \mathbf{D}_k 服从正态分布,其均值为零,协方差阵为

$$E[\mathbf{D}_k \mathbf{D}_k^T] = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \quad (4)$$

滤波正常或有小幅值故障时, \mathbf{D}_k 的任意一个分量 $D_{i,k}$ 均满足

$$\text{var}(D_{i,k}) \leq C \sqrt{[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]_{ii}} \quad (5)$$

式中: $[\cdot]_{ii}$ 表示矩阵第 i 个对角线元素; C 为常数,由数据精度的要求确定。

当某一个分量 $D_{i,k}$ 出现大幅值故障时,式(5)将不再成立,组合导航滤波一定发散。因此定义滤波容错性为

$$F_{\text{fault}} = \sum_{k=1}^n \min \left[\frac{C \sqrt{[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]_{ii}}}{\text{var}(D_{i,k})} \right] \quad (6)$$

F_{fault} 越大,滤波算法容错能力越强;反之,容错能力越弱。

2 基于投影寻踪理论评估滤波算法品质

2.1 投影寻踪的基本思想

投影寻踪是处理和分析高维数据的一种新统计方法^[10],其基本思想是将高维数据投影到低维(1~3维)子空间上,寻找出能反映原高维数据结构或特征的投影,在低维空间上对数据结构或特征进行分析,以达到研究和分析高维数据的目的。

2.2 基于投影寻踪的组合导航滤波算法评估模型

基于投影寻踪对组合导航滤波算法品质进行评估,就是研究“性能指标”与“样本集”之间的关系。基于投影寻踪的组合导航滤波算法评估模型建立过程如下所述。

1) 性能指标归一化。

设样本集为 $\{x(i,j) \mid i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p\}$ 。其中: $x(i,j)$ 为第 i 个样本集中第 j 个性能指标; n,p 分别为样本个数和性能指标的个数。由于不同性能指标具有不同的量纲和量纲单位,为了消除指标之间的量纲影响,需要对数据进行归一化处理,即

$$x'(i,j) = \frac{x(i,j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (7)$$

式中: $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p; x'(i,j)$ 为性能指标归一化序列; $x_{\max}(j), x_{\min}(j)$ 分别为样本集中第 j 个性能指标的最大、最小值。

2) 构造投影指标函数 $Q(\mathbf{w})$ 。

投影寻踪方法就是把归一化后的 p 维数据 $x'(i,j)$,按投影方向 $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_p]$ 的模为 1 的原则,综合成一维投影值 $z(i)$,即

$$z(i) = \sum_{j=1}^p w_j x'(i, j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

然后根据 $z(i)$ 的一维分布图进行分类评估。

投影指标函数为

$$Q(\mathbf{w}) = S_z D_z \quad (9)$$

式中: S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差, D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度, 即

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2} \quad (10)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) u(R - r(i, j)) \quad (11)$$

式中: $E(z)$ 为序列 $\{z(i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 的均值; $R = 0.1S_z$; $r(i, j) = z(i) - z(j)$, 表示样本之间的距离; $u(t)$ 为单位阶跃函数。

3) 优化投影指标函数 $Q(\mathbf{w})$ 。

当各性能指标的样本集给定时, 投影指标函数 $Q(\mathbf{w})$ 随着投影方向 \mathbf{w} 的变化而变化。因此, 可通过求解投影指标函数最大值来估计能够最有效地反映原高维数据某类结构特征的最佳投影方向, 即

$$\max Q(\mathbf{w}) = S_z D_z \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p w_j^2 = 1 \quad w_j \in [0, 1]。$$

4) 建立组合导航滤波算法模型。

把由步骤3)求得的最佳投影方向 \mathbf{w}^* 代入式(8), 可得各样本点的投影值 $z^*(i)$ 。若将 $z^*(i)$ 从大到小排序, 就可以把各指标的样本集进行分类。

2.3 投影方向的优化选择

对于2.2节建立的投影寻踪模型, 用遗传算法计算最佳投影方向, 具体的遗传操作算子如下所述。

1) 编码方式: 设码长为 e , 第 j 个参数的变化区间为 $[0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, p$ 。把这些区间等分成 $2^e - 1$ 个子区间:

$$c_j = I_j d_j \quad (13)$$

式中: 子区间长度 $d_j = 1/(2^e - 1)$ 是常数; 搜索步数 I_j 为小于 2^e 的十进制整数, 是变数。把 I_j 转化成 e 位二进制数 $\{i_a(j, k) | k = 1, 2, \dots, e\}$, 即

$$I_j = \sum_{k=1}^e i_a(j, k) \cdot 2^{k-1}。 \quad (14)$$

2) 初始种群产生: 生成 n 组 p 个均匀随机数, 然后转换成十进制整数, 即

$$I_j(i) = \text{int} | u(j, i) 2^e | \quad (15)$$

式中, int 为取整函数。由式(14)得对应二进制数 $i_a(j, k, i)$, 它们与 n 组模型参数 $c_j(i)$ 对应, 并把它们作为初始个体群。

3) 适应度计算: 把目标函数式(12)作为个体的适应度。

4) 选择算子: 采用轮盘赌选择法和精英保护策略, 重组算子采用线性重组法, 变异算子采用均匀变异。

5) 停机准则: 采用阈值和迭代次数限制。若个体的适应度值小于阈值, 或者迭代已达到最大迭代次数, 则终止迭代, 取最佳适应度对应的个体为最优解, 即最佳投影方向。

3 验证实例

3.1 仿真条件与参数的设置

1) 飞行器的运动轨迹。

为简化仿真过程, 以飞行器贴近海面做巡航飞行为背景, 设飞行器初始位置为北纬 40° , 东经 100° , 以 Ma 数 0.8, 高度 20 m 和东偏南 45° 的飞行方向相对地球匀速平飞 1000 s。

2) 传感器的测量精度。

陀螺的随机常值漂移为 0.01 ($^\circ$)/h, 初始值为 0.05 ($^\circ$)/h; 加速度计的常值漂移为 $10^{-4}g$, 初始值为 $2 \times 10^{-4}g$; GPS 的位置精度为 10 m, 速度精度为 0.5 m/s。

3) 滤波初始条件设置。

滤波初始条件设置分“正常”和“异常”两种状态: “正常”指系统噪声和观测噪声近似为零均值高斯白噪声, 同时状态估计初值 X_0 和估计的均方差阵初值 P_0 较小; “异常”指状态估计初值 X_0 和估计的均方差阵初值 P_0 较大。

3.2 仿真结果及分析

为了对比和分析, 用常规 Kalman 滤波和自适应滤波评估滤波算法品质。其评估步骤如下所述。

1) 基于3.1节给出的初始条件, 运用常规 Kalman 滤波和自适应滤波算法进行组合导航解算, 用本文第1章给出的性能指标计算方法, 2种滤波算法分别在2种状态下的4个归一化性能指标如表1所示。

表1 2种滤波算法评价指标

Table 1 Evaluation index of two filtering algorithms

算法	状态	滤波精度	实时性	鲁棒性	容错性
常规 Kalman 滤波	正常	0.91	0.89	0.31	0.17
	异常	0.57	0.89	0.01	0.15
自适应滤波	正常	0.90	0.67	0.84	0.79
	异常	0.86	0.67	0.83	0.77

由表1可知, 常规 Kalman 滤波算法在正常状态下的滤波精度与自适应滤波算法的精度是基本一致的; 在异常状态下, 由于噪声统计特性不准确, 常规 Kalman 滤波算法的滤波精度由正常的 0.91 下降到 0.57, 滤波精度下降较大。而自适应滤波算法由于在滤波的同时, 利用观测数据带来的信息能不断在线估计和修正模型参数, 噪声统计特性, 所以其滤波精度由 0.90 变化为 0.86, 基本保持不变。

对于实时性,很显然,常规 Kalman 滤波算法略优于自适应滤波算法,这是因为自适应滤波算法在每次滤波过程中都要估计系统噪声统计特性。对于鲁棒性和容错性,自适应滤波算法远优于常规 Kalman 滤波算法,尤其是在异常状态下的鲁棒性更为突出。综上分析,单个性能指标不能准确评估滤波算法品质。

2) 按 2.3 节的方法,确定最佳投影方向 $w^* = [0.6040 \ 0.4607 \ 0.5302 \ 0.3607]$ 。

3) 根据式(8),得到 2 种滤波算法在正常和异常状态下的综合评价值 $z = [1.5674 \ 1.1209 \ 1.9476 \ 1.8946]$ 。从评价可知,2 种算法在 2 种状态下的算法品质排序为 $3 > 4 > 1 > 2$ 。当选取滤波精度、实时性、鲁棒性和容错性作为性能指标时,自适应滤波算法的综合评价价值要高于常规 Kalman 滤波算法,该结论与理论分析是一致的,主要是因为自适应滤波算法是在常规 Kalman 滤波算法的基础上发展起来的,它具有更强的适应性与最优的滤波性能;同时,自适应滤波算法在正常和异常状态下评价价值分别为 1.9476 和 1.8946,相差很小,这也再次表明该算法具有良好的适应性。而常规 Kalman 滤波算法在正常状态下和异常状态下评价价值分别为 1.5674 和 1.1209,相差较大,这是因为常规 Kalman 滤波算法本身容错性、鲁棒性较差。

4 结论

近年来,在常规 Kalman 滤波算法的基础上涌现出诸如扩展 Kalman 滤波、粒子滤波、无迹采样 Kalman 滤波和自适应滤波等组合导航滤波算法,而这些滤波算法本身都有各自的优点和适用条件,如何对这些算法的品质进行合理、准确的评估已成为一个新的研究方向。本文基于投影寻踪理论,综合考虑滤波精度、实时性、鲁棒性和容错性等性能指标对滤波算法品质的影

响,提出了多性能指标融合的滤波算法品质评估方法。通过对常规 Kalman 滤波算法和自适应滤波算法的评估实验分析可知,本文算法在理论上更具有可信度,滤波算法品质评估结果更加准确、客观、可信,因此可以作为滤波算法品质评估的定量依据。

参考文献

- [1] XU J S, LU X C, WU H T, et al. Application of data fusion in multi-sensor integrated navigation system [C]//The 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008:1123-1127.
- [2] 王旺,赵海军,姜暖. 导航信息处理中滤波算法稳定性评估方法[J]. 指挥控制与仿真,2018,40(1):62-66.
- [3] 唐鹏. 测速测角组合自主导航性能评估研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [4] 杨阳,刘建娟,刘楠,等. 组合导航滤波算法性能评估方法研究[J]. 信息通信,2017(9):32-33.
- [5] 张召友,郝燕玲,张鑫. Sigma 点 Kalman 滤波在惯性导航初始对准中的性能评估[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(6):639-644.
- [6] 杨阳. 组合导航滤波算法设计及其性能评估方法研究[D]. 郑州:河南工业大学,2018.
- [7] 李元锋,李正生,王洋. 基于模糊综合评判的多指标匹配算法性能评估[J]. 光电工程,2010,37(8):92-97.
- [8] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 2 版. 西安:西北工业大学出版社,2012.
- [9] 赵欣,王跃钢,王仕成,等. 一种组合导航信息融合算法品质评估方法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(2):211-219.
- [10] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [11] HOSSEINPOOR H R, SAMADZADEGAN F, DADRAS-JAVAN F. Precise target geolocation and tracking based on UAV video imagery [C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016:243-249.
- [12] 孙辉,李志强,张建华,等. 机载光电平台目标交会定位[J]. 中国光学,2015,8(6):988-996.
- [13] SHARMA R, YODER J, KWON H, et al. Vision based mobile target geo-localization and target discrimination using Bayes detection theory [C]//The 11th International Symposium of Distributed Autonomous Robotic Systems, 2014:59-71.
- [14] 戴耀,汪德虎,胡江. 无人机保障舰炮对岸射击校射诸元模型[J]. 火力与指挥控制,2008,33(5):42-44.
- [15] 康崇禄. 蒙特卡罗方法理论和应用[M]. 北京:科学出版社,2015.

(上接第 93 页)