

自适应抗差滤波理论及应用的主要进展

杨元喜^{1,2}, 任 夏³, 许 艳⁴

(1. 地理空间信息国家重点实验室, 西安 710054; 2. 西安测绘研究所, 西安 710054; 3. 郑州信息工程大学
导航与空间目标学院, 郑州 450052; 4. 长安大学 地质与测绘工程学院, 西安 710054)

摘要:近十年来, 中国学者建立了一种用于动态导航定位的新自适应抗差滤波理论, 该理论应用抗差估计原理抵制观测异常误差的影响, 构造自适应因子控制动力学模型误差的影响。本文旨在归纳、总结自适应抗差滤波理论与应用的主要进展。首先介绍自适应抗差滤波的原理; 随后给出四种自适应因子模型, 包括三段函数模型、两段函数模型、指数函数模型以及选权函数模型; 陈列了4种误差学习统计量, 包括状态不符值统计量、预测残差统计量、方差分量比统计量以及速度统计量; 将新的自适应抗差滤波理论与标准 Kalman 滤波以及其他自适应滤波理论进行了比较与分析; 最后利用两个实际算例展示了自适应抗差滤波在导航中的成功应用。

关键词: 自适应滤波; Kalman 滤波; 导航; 动态定位; 自适应因子; 误差学习因子

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 2095-4999(2013)01-0009-07

Main Progress of Adaptively Robust Filter with Applications in Navigation

YANG Yuan-xi^{1,2}, REN Xia³, XU Yan⁴

(1. National Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

3. College of Navigation & Aerospace Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;

4. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: A new adaptively robust filtering with application in kinematic navigation and positioning has been systematically established and developed in recent years. The adaptively robust filter applies a robust estimation principle to resist the effects of measurement outliers and introduces an adaptive factor to control the influences of the kinematic model disturbances. The main progress of the adaptively robust filter in theory and application are summarized. It includes the principle of the adaptively robust filter with the corresponding state estimator, the four adaptive factors for balancing the contribution of kinematic model information and measurements, which include three-segment function, two-segment function, exponential function and zero and one function for state component adaptation; the four kinds of learning statistics for judging the kinematic model errors, which include state discrepancy statistic, predicted residual statistic, variance component ratio statistic and velocity discrepancy statistic. The relations of the adaptively robust filter with standard Kalman filter, robust filter, and some other adaptive Kalman filters as well as some related adjustment methods are depicted by a figure. Other developments and applications of the adaptively robust filter are also mentioned. Two examples are presented.

Key words: adaptive filtering; Kalman filtering; navigation; kinematic positioning; adaptive factor; learning statistic

收稿日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(2013AA122501)。

第一作者简介: 杨元喜(1956), 男, 江苏泰县人, 博士, 教授, 研究员, 中国科学院院士。主要研究方向为卫星导航理论、时间与误差理论。

1 引言

目标跟踪或导航一般采用自适应滤波技术, 因为相应的系统模型一般是未知 (或部分未知) 或随时间变化的。与 Sage-Husa 自适应滤波^[1-3] 以及有限记忆滤波^[4] 不同, 中国学者建立了一种新的自适应抗差滤波理论^[5-6], 该理论应用抗差估计原理控制观测异常的影响, 引进自适应因子控制动力学模型误差的影响。

自适应滤波必然涉及到误差判别统计量以及自适应因子。于是, 先后构建了 4 种动力学模型误差学习统计量, 即状态不符值统计量^[5-6]、预测残差统计量^[7-8]、基于观测信息与动力学模型预测信息的方差分量比统计量^[9] 和基于模型预测速度与计算速度不符值统计量^[10]; 并建立了 4 种自适应因子, 即三段函数模型^[5]、两段函数模型^[6]、指数函数模型^[11] 和选权函数模型^[12-13]。

若要求预测状态向量的理论协方差矩阵等于或约等于估计的状态协方差矩阵, 或要求预测残差理论协方差矩阵等于或约等于估计的预测残差协方差矩阵时, 又得到了两类最优自适应因子^[14]。之后又发展了分类因子自适应滤波^[10] 和多因子自适应滤波^[15]。当多因子变成单因子时, 多因子自适应滤波即为单因子自适应滤波; 当多因子中仅含有位置参数因子和速度因子时, 多因子自适应滤波又变成分类因子自适应滤波。

为了进一步减弱模型误差的影响, 先后又发展了基于当前加速度模型的抗差自适应 Kalman 滤波^[16], 并研究了自适应抗差滤波与神经网络的结合^[17-18], 解决动态模型构造问题; 有学者将自适应抗差滤波与误差探测、诊断、调节 (即 DIA 方法, detection, identification and adaptation) 相结合^[19], 或与抗差 Kalman 滤波^[20-24] 相结合。为了控制非线性动力学模型误差的影响, 又提出了一种提高神经网络泛化能力的自适应 UKF 滤波算法^[25] 和一种基于 Bancroft 算法的 GPS 动态抗差自适应滤波^[26]。

2 自适应抗差滤波原理

假设线性动力学模型和观测模型分别为

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

$$L_k = A_k X_k + e_k \quad (2)$$

式中, X_k 为 t_k 时刻 $m \times 1$ 维状态参数向量, $\Phi_{k,k-1}$

为 $u \times u$ 维状态转移矩阵, W_k 为动力学模型噪声向量, L_k 为 $n_k \times 1$ 维观测向量, A_k 为 $n_k \times m$ 维设计矩阵, e_k 为观测噪声向量。假设 W_k 和 e_k 的数学期望为零, 且协方差矩阵分别为 Σ_{W_k} 和 Σ_{e_k} , 并假设 W_k 、 W_j 、 e_k 以及 e_j 互不相关。再进一步假设观测残差向量为 V_k , 状态预测向量为 \bar{X}_k , 则观测误差方程及状态预测方程为

$$V_k = A_k \hat{X}_k - L_k \quad (3)$$

$$\bar{X}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (4)$$

式中, \hat{X}_k 和 \hat{X}_{k-1} 分别为 t_k 和 t_{k-1} 时刻的状态估计向量。

自适应抗差滤波原则为

$$\sum_{i=1}^{n_k} p_i \rho(v_i) + \alpha_k (\hat{X}_k - \bar{X}_k)^T P_{\bar{X}_k} (\hat{X}_k - \bar{X}_k) = \min \quad (5)$$

式中, ρ 为连续非减凸函数^[27-29], p_i 为观测向量 L_k 的权矩阵 $P_k = \Sigma_k^{-1}$ 的第 i 个对角分量, α_k ($0 < \alpha_k \leq 1$) 为自适应因子, $P_{\bar{X}_k} = \Sigma_{\bar{X}_k}^{-1}$ 为预测状态向量 \bar{X}_k 的权矩阵。式 (5) 求极值后得到^[5]

$$\hat{X}_k = (A_k^T \bar{P}_k A_k + \alpha_k P_{\bar{X}_k})^{-1} (\alpha_k P_{\bar{X}_k} \bar{X}_k + A_k^T \bar{P}_k L_k) \quad (6)$$

式中, \bar{P}_k 为观测等价权矩阵, 可以由 Huber^[27] 函数或 IGG 系列方案获得^[28-32]。

式 (6) 可以等价地表示成^[33,34]

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + \bar{K}_k (L_k - A_k \bar{X}_k) \quad (7)$$

其中 \bar{K}_k 为等价增益矩阵

$$\bar{K}_k = \frac{1}{\alpha_k} \Sigma_{X_k} A_k^T \left(\frac{1}{\alpha_k} A_k \Sigma_{X_k} A_k^T + \bar{\Sigma}_k \right)^{-1} \quad (8)$$

状态向量验后协方差矩阵为

$$\Sigma_{\hat{X}_k} = (I - \bar{K}_k A_k) \Sigma_{X_k} / \alpha_k \quad (9)$$

3 简单分析

随着自适应因子 α_k 和观测等价权矩阵 \bar{P}_k 的不同, 可以得到不同的滤波解。

情形 1: 若 $\alpha_k = 0$ 且 $\bar{\Sigma}_k = \Sigma_k$ 或 $\bar{P}_k = P_k$, 则有

$$\hat{X}_k = (A_k^T P_k A_k)^{-1} A_k^T P_k L_k \quad (10)$$

式 (10) 为最小二乘平差情形, 即状态参数仅由 t_k 历元的观测向量估计, 不使用任何动力学模型信息。这类估计要求观测信息丰富, 且未受异常污染。

情形 2: 若 $\alpha_k = 1$ 且 $\bar{\Sigma}_k = \Sigma_k$, 则得到标准 Kalman 滤波解, 即

$$\hat{X}_k = \bar{X}_k + K_k(L_k - A_k \bar{X}_k) \quad (11)$$

$$K_k = \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T (A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T + \Sigma_k)^{-1} \quad (12)$$

情形 3: 若 α_k 在 0 和 1 之间变化, 且 $\bar{P}_k = P_k$, 则有

$$\hat{X}_k = (A_k^T P_k A_k + \alpha_k P_{\bar{X}_k})^{-1} (A_k^T P_k L_k + \alpha_k P_{\bar{X}_k} \bar{X}_k) \quad (13)$$

式 (13) 为自适应 Kalman 滤波解, 该估计要求观测信息可靠。

情形 4: 若 $\alpha_k = 0$, 则有

$$\hat{X}_k = (A_k^T \bar{P}_k A_k)^{-1} A_k^T \bar{P}_k L_k \quad (14)$$

式 (14) 为仅利用 t_k 历元观测信息的抗差估计解^[28-29, 31]。

情形 5: 若 $\alpha_k = 1$, 则有

$$\hat{X}_k = (A_k^T \bar{P}_k A_k + P_{X_k})^{-1} (A_k^T \bar{P}_k L_k + P_{X_k} \bar{X}_k) \quad (15)$$

式 (15) 为 M-LS 滤波解^[23]。

情形 6: 若观测向量 L_k 和状态预测向量 \bar{X}_k 的协方差矩阵由 Sage 开窗法获得^[1], 分别表示为 $\hat{\Sigma}_K$ 和 $\hat{\Sigma}_{X_k}$, 即

$$\hat{\Sigma}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \bar{V}_{k-j} \bar{V}_{k-j}^T - A_k \Sigma_{\bar{X}_k} A_k^T \quad (16)$$

$$\hat{\Sigma}_{\Delta X} = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \Delta X_{k-j} \Delta X_{k-j}^T \quad (17)$$

式中, \bar{V}_k 为预测残差向量, ΔX_k 表示状态不符值向量, 表达式为

$$\bar{V}_k = A_k \bar{X}_k - L_k \quad (18)$$

$$\Delta X_k = \hat{X}_k - \bar{X}_k \quad (19)$$

则自适应抗差滤波变成了 Sage 自适应滤波。

自适应抗差滤波与各种派生滤波之间的关系由图 1 表示。

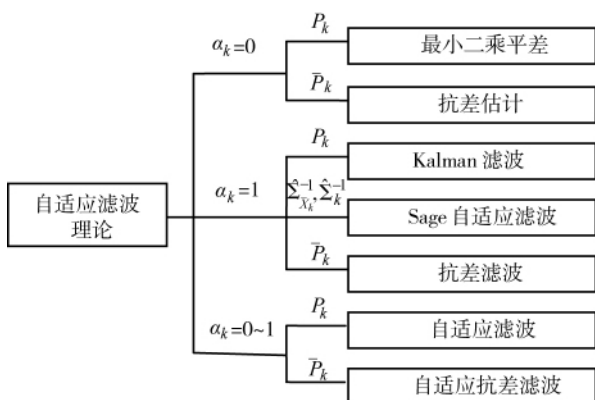


图 1 自适应抗差滤波

4 三种误差判别统计量

4.1 状态不符值统计量

假设在 t_k 历元观测向量 L_k , 则由观测信息可以获得状态参数的估计

$$\tilde{X}_k = (A_k^T \bar{P}_k A_k)^{-1} A_k^T \bar{P}_k L_k \quad (20)$$

由式 (20) 状态参数估计向量 \tilde{X}_k 与预测状态参数向量 \bar{X}_k 之间的不符值可构成如下统计量

$$\tilde{X}_k - \bar{X}_k = (\Delta \tilde{X}_{k_1}^2 + \Delta \tilde{X}_{k_2}^2 + \cdots + \Delta \tilde{X}_{k_m}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

则模型误差的判别统计量可构造

$$\Delta \tilde{X}_k = \frac{\tilde{X}_k - \bar{X}_k}{\sqrt{\text{tr}(\Sigma_{\tilde{X}_k})}} \quad (22)$$

式中, “tr” 表示矩阵的迹。

简单分析: (1) 计算历元的观测数量要大于待估状态参数的数量, 否则不可能计算出 $\Delta \tilde{X}_k$; (2) 由观测量估计的状态参数向量 \tilde{X}_k 应尽可能精确, 否则统计量 $\Delta \tilde{X}_k$ 不能反映动力学模型的误差; (3) 统计量 $\Delta \tilde{X}_k$ 仅反映模型的整体误差, 任何状态分量的扰动都将视为整体模型存在扰动。

4.2 预测残差统计量

若观测向量 L_k 可靠, 预测残差向量 \bar{V}_k 将反映预测状态向量 \bar{X}_k 的误差, 如此, 可构造如下误差判别统计量^[7-8]

$$\Delta \bar{V}_k = \left(\frac{\bar{V}_k^T \bar{V}_k}{\text{tr}(\Sigma_{\bar{V}_k})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

简单分析: (1) 利用预测残差统计量 $\Delta \bar{V}_k$ 构造自适应因子, 不需要在滤波前计算状态向量参考值; (2) 也不需要观测量个数一定大于状态参数个数; (3) $\Delta \bar{V}_k$ 与 $\Delta \tilde{X}_k$ 相比, 可能含有更多的测量误差。

4.3 方差分量比统计量

如果将 L_k 和 \bar{X}_k 看成 t_k 时刻的两组观测向量, 则它们的方差分量应能反映其相应的观测精度和模型精度, 于是可用方差分量比构造误差判别统计量, L_k 和 \bar{X}_k 的 Helmert 方差分量估计公式为^[35-36]

$$\hat{\sigma}_{0k}^2 = \frac{V_k^T P_k V_k}{r_k} \quad (24)$$

$$\hat{\sigma}_{0\bar{X}_k}^2 = \frac{V_{\bar{X}_k}^T P_{\bar{X}_k} V_{\bar{X}_k}}{r_{\bar{X}}} \quad (25)$$

式中, $\hat{\sigma}_{0k}^2$ 和 $\hat{\sigma}_{0\bar{X}_k}^2$ 分别为 L_k 和 \bar{X}_k 的方差分量, r_k 和 $r_{\bar{X}}$ 分别为 L_k 和 \bar{X}_k 的多余观测分量, V_k 和 $V_{\bar{X}_k}$ 分别为 L_k 和 \bar{X}_k 的残差向量,

$$V_{\bar{X}_k} = \hat{X}_k - \bar{X}_k = \hat{X}_k - \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (26)$$

由方差分量比表示的模型误差统计量为

$$S_k = \frac{\hat{\sigma}_{0\bar{X}_k}^2}{\hat{\sigma}_{0k}^2} \approx \frac{V_{\bar{X}_k}^T P_{\bar{X}_k} V_{\bar{X}_k}}{r_{\bar{X}} \hat{\sigma}_{0k}^2} \quad (27)$$

简单分析: (1) S_k 的计算需要有多余观测分量, 否则该统计量不能有效地反映模型误差; (2) V_k 和 $V_{\bar{X}_k}$ 相应于相同的状态估计向量 \hat{X}_k ; (3) 如果采用迭代计算, 则 S_k 的计算量稍大于 $\Delta \tilde{X}_k$ 和 $\Delta \bar{V}_k$ 的计算量。

4.4 速度不符值统计量

假设由观测向量求得位置参数向量的抗差估计 \tilde{X}_k 以及前一个历元的状态估计值 \hat{X}_{k-1} , 可得到 $t_k - t_{k-1}$ 时间内的速度估计为^[10]

$$\tilde{X}_k = \frac{\tilde{X}_k - \hat{X}_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \quad (28)$$

则模型误差判别统计量可表示成预测速度与估计速度的不符值的函数,

$$\Delta \tilde{X}_k = \frac{\|\tilde{X}_k - \hat{X}_k\|}{\sqrt{\text{tr}(\Sigma_{\tilde{X}_k})}} \quad (29)$$

式中, \hat{X}_k 为由动力学模型预测的速度向量, $\Sigma_{\tilde{X}_k}$ 为相应的协方差矩阵。

简单分析: (1) 如果 $\Delta \tilde{X}_k$ 显著异常, 则表明预测速度存在异常, 或动力学模型存在较大误差; (2) $\Delta \tilde{X}_k$ 的计算也要求有多余观测信息, 否则无法获得 \tilde{X}_k 。

5 4种自适应因子

在讨论自适应因子时, 均以统计量 $\Delta \tilde{X}_k$ 为例, 给出具体形式。

5.1 三段函数表示的自适应因子

三段函数模型由 3 部分组成, 即当模型误差统计量小于一个特定阈值时, α_k 等于 1; 当模型误差大于特定的阈值时, α_k 等于 0; 否则, α_k 大于 0, 小于 1。函数形式为^[5]

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \Delta \tilde{X}_k \leq c_0 \\ \frac{c_0}{\Delta \tilde{X}_k} \left(\frac{c_1 - \Delta \tilde{X}_k}{c_1 - c_0} \right) & c_0 < \Delta \tilde{X}_k \leq c_1 \\ 0 & \Delta \tilde{X}_k > c_1 \end{cases} \quad (30)$$

其中, c_0 和 c_1 分别为两个特定的常量, 通常取值

为 $c_0 = 1.0 \sim 1.5$, $c_1 = 3.0 \sim 4.5$ 。

显然, 若 $\Delta \tilde{X}_k$ 值增大, α_k 减小; 当 $\Delta \tilde{X}_k$ 大于淘汰阈 c_1 时, α_k 降为 0。

5.2 两段函数表示的自适应因子

仍以统计量 $\Delta \tilde{X}_k$ 为例, 给出两段函数模型表示的自适应因子^[6]

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \Delta \tilde{X}_k \leq c \\ \frac{c}{\Delta \tilde{X}_k} & \Delta \tilde{X}_k > c \end{cases} \quad (31)$$

式中, c 为常量, 其最优值为 1.0^[8]。

5.3 指数函数表示的自适应因子

指数函数表示的自适应因子为^[37]

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \Delta \tilde{X}_k \leq c \\ e^{-(\Delta \tilde{X}_k - c)^2} & \Delta \tilde{X}_k > c \end{cases} \quad (32)$$

式中, c 为常量, 与式 (31) 类似。

5.4 选权法表示的自适应因子

如果状态参数向量服从正态分布, 则自适应因子为 1, 否则为 0^[13,38]

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \Delta \tilde{X}_k \leq c \\ 0 & \Delta \tilde{X}_k > c \end{cases} \quad (33)$$

式中, $\Delta \tilde{X}_{ki}$ 为状态不符值向量的第 i 个分量。

当然, 可以利用另外三个误差判别统计量 $\Delta \bar{V}_k$ 、 S_k 和 $\Delta \dot{X}_k$ 构造类似的自适应因子。

6 应用研究进展

在应用方面, 自适应抗差滤波已成功应用于卫星轨道测定^[39], 大地网重复观测的数据处理^[40]等; 并研究了附有函数模型约束的自适应滤波导航算法^[41]; 在组合导航方面, 发展了 IMU/GPS 组合导航自适应 Kalman 滤波算法^[42]和 GPS/INS 组合导航两步自适应抗差 Kalman 滤波算法^[43]; 为了同时控制有色噪声与动力学模型误差的影响, 研究了多种有色噪声自适应滤波算法^[44]; 在导航卫星钟差拟合与预报研究中, 提出了钟差估计的开窗分类因子抗差自适应序贯平差法^[45]和卫星钟误差实时估计的多因子抗差自适应滤波方法^[46]; 将自适应滤波用于物理模型与几何观测信息组估计地壳形变参数也取得进展^[47]。

在实际工程中, 自适应滤波理论和软件已经成功应用于我国 GPS 道路修测工程。这里仅给出两个典型截图, 图 2 中给出了三种道路修测结果,

即,差分GPS定位、接收机输出定位和自适应抗差滤波定位。三种结果绘于同一张1/50 000的航空影像图上(见图2(a)和图2(b))。

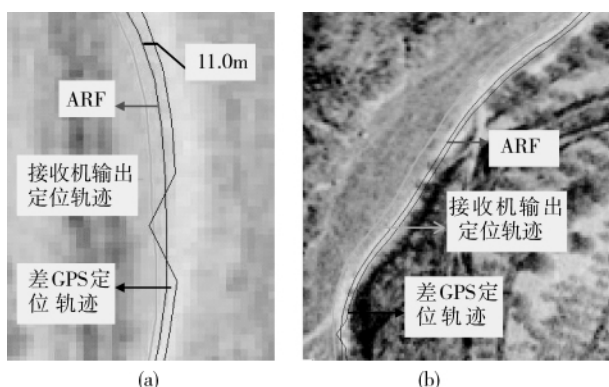


图2 自适应抗差滤波定位、接收机输出定位及差分GPS定位的轨迹

图2(a)和图2(b)清楚地显示,接收机导航结果和差分导航结果均含有明显的系统误差;如果差分观测量的个数少于状态参数的个数,则差分GPS将给不出导航结果,或给出错误的结果;但是自适应抗差滤波总能给出较合理的导航结果。

7 结论

业已证明,包容了观测历元平差、标准Kalman

滤波、抗差滤波和自适应滤波的新的自适应抗差滤波不仅能控制观测异常误差的影响,而且具有较强的控制动力学模型误差影响的能力。于是它是一种有效、可靠且灵活的导航定位方法。建立的四种误差判别统计量均能可靠地判别模型误差,四种自适应因子均能较合理地调节动力学模型信息和观测信息对导航状态参数的贡献。

中国学者除不断完善新建立的自适应抗差滤波理论体系外,还对现有自适应滤波存在的问题进行了分析^[5,48];研究了自适应抗差滤波的性质^[49];建立了分类因子自适应滤波^[10]和多因子自适应滤波理论^[15];推导了最优自适应因子模型^[8]。

在应用方面,自适应滤波已被成功地应用于GPS道路修测与更新工程^[50],大地网的自适应序贯平差^[40],以及卫星轨道测定研究^[39]等。

自适应抗差滤波还可应用于其他动态数据处理领域,如地壳形变分析,其中自适应因子用来调节动力学形变模型信息的影响,抗差等价权矩阵可用来控制动态观测(如GPS)异常误差对形变参数估计的影响。

参考文献

- [1] DENG Z. Self-tuning Filtering Theory with Applications—Modern Time Series Analysis Method[M]. Harbin: Press of Harbin Institute of Technology, 2003: 162-173.
- [2] MOHAMED A H, SCHWARZ K P. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS[J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(4): 193-203.
- [3] WANG J, STEWART M P, TSAKIRI M. Adaptive Kalman Filtering for Integration of GPS with GLONASS and INS [C]//SCHWARZ K P. Geodesy Beyond 2000. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 325-330.
- [4] PANOZZO T, BORN G H, BERNELLI-ZAZZERA F. Kalman Filtering of Accelerometric Data for Aerobraking Navigation[EB/OL]. [2012-12-26]. http://naca.central.cranfield.ac.uk/dcsss/2004/C03_24_PanazzoEDITfinal2.pdf.
- [5] YANG Y, HE H, XU G. Adaptively Robust Filtering for Kinematic Geodetic Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2001, 75(2/3): 109-116.
- [6] YANG Y, XU T, HE H. On Adaptively Kinematic Filtering[C]//Selected Papers for English of Acta Geodetica et Cartographica Sinica. 北京: 测绘出版社, 2001: 25-32.
- [7] 徐天河, 杨元喜. 改进的 Sage 自适应滤波方法[J]. 测绘科学, 2000, 25(3): 22-24.
- [8] Yang Y, Gao W. An Optimal Adaptive Kalman Filter[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(4): 177-183.
- [9] YANG Y, XU T. An Adaptive Kalman Filter Based on Sage Windowing Weights and Variance Components[J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(2): 231-240.
- [10] CUI X, YANG Y. Adaptively Robust Filtering with Classified Adaptive Factors[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 846-851.
- [11] YANG Y, GAO W. Influence Comparison of Adaptive Factors on Navigation Results[J]. The Journal of Navigation, 2005,

- 58(3):471-478.
- [12] OU J, CHAI Y, YUAN Y. Adaptive Filter for Kinematic Positioning by Selection of Parameter Weights[C]//Progress in Geodesy and Geodynamics. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2004: 816-823.
- [13] REN C, OU J, YUAN Y. Application of Adaptive Filtering by Selecting the Parameter Weight Factor in Precise Kinematic GPS Positioning[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(1): 41-46.
- [14] YANG Y, GAO W. A New Learning Statistic for Adaptive Filter Based on Predicted Residuals[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(8): 833-837.
- [15] YANG Y, CUI X. Adaptively Robust Filter with Multi Adaptive Factors[J]. Survey Review, 2008, 40(309): 260-270.
- [16] 高为广, 杨元喜, 张双成. 基于当前加速度模型的抗差自适应 Kalman 滤波[J]. 测绘学报, 2005, 35(1): 15-18.
- [17] 高为广, 封欣, 朱大为. 基于神经网络构造的 GPS/INS 自适应组合导航算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2): 64-67.
- [18] 高为广, 杨元喜, 张 婷. 神经网络辅助的 GPS/INS 组合导航自适应滤波算法[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 26-30.
- [19] TEUNISSEN P J G. Quality Control in Integrated Navigation Systems[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1990, 5(7): 35-41.
- [20] KOCH K R, YANG Y. Robust Kalman Filter for Rank Deficient Observation Model[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(8): 436-441.
- [21] SCHAFFRIN B. Generating Robustified Kalman Filters for the Integration of GPS and INS[R]. Stuttgart: Institute of Geodesy, University of Stuttgart, 1991.
- [22] YANG Y. Robust Bayesian Estimation[J]. Bulletin Geodesique, 1991, 65(3): 145-150.
- [23] 杨元喜. 动态系统的抗差 Kalman 滤波[J]. 测绘学院学报, 1997, 14(2): 79-84.
- [24] 周江文. 抗差最小二乘法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [25] 高为广, 杨元喜, 张 婷. 一种提高神经网络泛化能力的自适应 UKF 滤波算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(5): 500-503.
- [26] 张双成, 杨元喜, 张 勤, 等. 一种基于 Bancroft 算法的 GPS 动态抗差自适应滤波[J]. 武汉大学学报信息: 科学版, 2007, 32(4): 309-311.
- [27] HUBER P J. Robust Statistics[M]. New York: John Wiley, 1981.
- [28] YANG Y. Robust Estimation for Dependent Observations[J]. Manuscripta Geodaetica, 1994(19): 10-17.
- [29] YANG Y, SONG L, XU T. Robust Estimator for Correlated Observations Based on Bifactor Equivalent Weights[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(6-7): 353-358.
- [30] YANG Y. Robust Estimation of Geodetic Datum Transformation[J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(5): 268-274.
- [31] YANG Y, SONG L, XU T. Robust Parameter Estimation for Correlated Geodetic Observations[C]//Selected Papers for English of Acta Geodetica et Cartographica Sinica. 北京: 测绘出版社, 2002, 18-24.
- [32] 周江文. 景点误差理论与抗差估计[J]. 测绘学报, 1989, 18(2): 115-120.
- [33] 杨元喜, 何海波, 徐天河. 论动态自适应滤波[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 293-298.
- [34] XU G. GPS Theory, Algorithms and Applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [35] KOCH K R. Einführung in die Bayes-Statistik[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [36] KOCH K R, KUSCHE J. Regularization of Geopotential Determination from Satellite Data by Variance Components[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(5): 259-268.
- [37] YANG Y, GAO W. Adaptive Integrated Navigation for Multi-sensor Adjustment Outputs[J]. The Journal of Navigation, 2004, 57(2): 287-295.
- [38] 欧吉坤, 柴艳菊, 袁运斌. 自适应选权滤波[C]//朱耀仲, 孙和平. 大地测量与地球动力学进展. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2004: 816-823.
- [39] YANG Y, WEN Y. Synthetically Adaptive Robust Filtering for Satellite Orbit Determination[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 32(11): 1112-1119.
- [40] 隋立芬, 刘雁雨, 王 威. 自适应序贯平差及其应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(1): 51-54.
- [41] YANG Y, ZHANG X, XU J. Adaptively Constrained Kalman Filtering for Navigation Applications[J]. Survey Review, 2011, 43(322): 370-381.

- [42] 高为广, 杨元喜, 崔先强, 等. IMU/GPS 组合导航系统自适应 Kalman 滤波算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 466-469.
- [43] 吴富梅, 杨元喜. 一种两步自适应抗差 Kalman 滤波在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 522-527.
- [44] 崔先强, 杨元喜, 高为广. 多种有色噪声自适应滤波算法的比较[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(8): 731-735.
- [45] 黄观文, 杨元喜, 张 勤. 开窗分类因子抗差自适应序贯平差用于卫星钟差参数估计与预报[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 15-21.
- [46] HUANG G, ZHANG Q. Real-time Estimation of Satellite Clock Offset Using Adaptively Robust Kalman Filter with Classified Adaptive Factors[J]. GPS Solution, 2012, 16(4): 531-539.
- [47] YANG Y, ZENG A. Adaptive Filtering for Deformation Parameter Estimation in Consideration of Geometrical Measurements and Geophysical Models[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2009, 52(8): 1216-1222.
- [48] 杨元喜. 多种抗差滤波模型的理论基础及比较[C]//陈俊勇. 大地测量学论文集: 祝贺陈永龄院士 90 寿辰. 北京: 测绘出版社, 1999: 51-57.
- [49] 杨元喜. 动态定位自适应滤波解的性质[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 189-192.
- [50] YANG Y, TANG Y, LI Q, *et al.* Experiments of Adaptive Filters for Kinematic GPS Positioning Applied in Road Information Updating in GIS[C]//Proceedings of the International Symposium on Inertial Navigation Technology and Intelligent Traffic, Nanjing, China, October 15-17, 2004: 86-96.

2013 年《遥感信息》(地理国情监测专辑) 征稿通知

《遥感信息》(双月刊) 创刊于 1986 年, 是中国最早创办的遥感技术期刊。该刊由国家测绘地理信息局主管, 中国科学技术部国家遥感中心和中国测绘科学研究院联合主办。《遥感信息》是中国科技核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊, 国内外公开发行。国内统一连续出版物号: CN 11-5443/P; 国际标准刊号: ISSN 1000-3177。2012 年获第二届全国优秀测绘期刊一等奖。

一、征稿内容

针对国家测绘地理信息局组织开展的地理国情监测工作, 就地理国情监测试点、第一次地理国情普查、技术体系建设等创新性技术成果内容进行征稿。

二、投稿要求

1. 作者应保证拥有合法的著作权。合作的论文, 署名须征得合作者的同意。若因著作权而引起争议, 本刊不承担责任。

2. 稿件要求论点明确、数据可靠、分析充分、条理清晰、文字简洁。

3. 本刊采用网络投稿方式。投稿作者需登录网站 www.remotesensing.org.cn 进行注册然后在线投稿。作者可推荐两名与研究方向一致的审稿专家, 在备注中写明专家姓名、email、电话等信息。

注: 来稿时请注明(地理国情监测专辑) 投稿字样。

《遥感信息》编辑部

电子信箱: remotesensing@casm.ac.cn

联系电话: 010-88217813/88628818

联系人: 曾钰