

The Application of Robust Filtering for Outliers Restraining in MEMS Integrated Navigation *

GAO Zongyu^{1,2}, FANG Jianjun^{1*}, GUO Wenrong^{1*}

(1. The College of Automation, Beijing Union University, Beijing 1000101, China;

2. The College of Automation, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: In the light of practical application the outliers makes the estimation of filtering inaccurate. A new outliers restraining method is proposed. Based on the characteristic of new information, first the coefficient characteristic of wavelet transform is used. The wavelet coefficient of the fine scale is used to detect outliers, and the method based on information pervasion theorem is used to correct the single outlier or series outliers. The simulation of MEMS-SINS/GPS integrated navigation in the long-distance vehicle system shows that the new algorithms can detect outliers effectively and ensure the precision of filtering exactly.

Key words: outliers detecting; outliers eliminating; wavelet transform coefficients; information pervasion; innovation revising

EEACC: 6370

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.06.027

抗野值鲁棒滤波在微惯性组合导航中的应用 *

高宗余^{1,2}, 方建军^{1*}, 郭文荣¹

(1. 北京联合大学自动化学院, 北京 100101; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 在鲁棒 H_{∞} 滤波应用过程中, 如果量测序列含有野值, 将会严重影响滤波精度。针对这一问题提出一种新的剔除野值的方法; 从新息入手, 首先利用小波变换系数特性, 通过最细尺度上的小波系数来检测野值点, 然后基于信息扩散原理, 采用替代方法, 对含有单个或连续野值的新息加以修正, 从而达到检测和剔除野值的目的。通过对基于 MEMS 的车载微惯性 SINS/GPS 组合导航的仿真表明, 新算法能够有效的检测出野值, 并在野值单个或成片出现的情况下都能保证滤波精度。

关键词: 野值检测; 野值剔除; 小波变换系数; 信息扩散; 新息修正

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)06-0859-05

随着微电子技术的发展而出现的微电子机械系统 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 器件具有体积小、功耗低、响应快、灵敏度高、成本低的优点, 由其构成的一些微惯导系统逐渐的应用于机器人、车载系统及无人机系统中; 但是, 在其构成的系统状态估计中, 测量数据都会受到噪声的污染, 由于 MEMS 传感器的故障、数据传递过程中出现的错误和环境的干扰, 量测序列中不可避免地包含着某些错误信息, 我们称之为野值。如果不把野值及时检测和剔除, 将会对微惯导测量过程中误差状态的估计产生很大的影响, 从而导致系统精度的降低。为此人们提出了许多野值检测和剔除的方法。

在现有的野值检测方法中, 文献 [1] 提出了基于 ARMA 模型的在线辨识, 通过模型参数的变化来

判断是否出现野值, 但是这是基于系统的噪声统计特性稳定和已知的情况; 文献 [2-3] 中基于滤波新息的统计特性, 检测野值, 通过直接剔除观测值或修正观测值来去除野值的影响; 但是鲁棒 H_{∞} 滤波在应用过程中并不对噪声统计特性做假设, 所以这些方法就不适用。在现有的野值剔除方法中, 文献 [4] 提出了利用新息平均值代替含野值新息的方法, 但是此方法在野值成片出现的情况下效果不佳。

本文采用小波变换检测信号奇异性的方法, 在时频域对野值进行处理。通过分析最细尺度上的系数信息, 快速检测出野值点, 之后采用基于信息扩散原理的新息修正鲁棒 H_{∞} 滤波方法, 通过对车载 MEMS-INS/GPS 组合导航的仿真表明, 该算法能有效去除野值的影响, 大大提高了野值条件下状态估计的精度。

项目来源: 国家自然科学基金项目 (50805004); 国家 973 计划项目 (2011CB711106)

收稿日期: 2011-11-18 修改日期: 2012-03-12

1 野值对鲁棒 H_∞ 滤波的影响

对于线性动态量测系统

$$\begin{cases} x_{k+1} = F_k x_k + G_k w_k \\ y_k = H_k x_k + v_k \\ z_k = L_k x_k \end{cases} \quad (1)$$

鲁棒 H_∞ 滤波算法^[5]如下:

$$P_k^{-1} + H_k^T H_k - \gamma^{-2} L_k^T L_k > 0 \quad (2)$$

$$P_k = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + G_{k-1} G_{k-1}^T -$$

$$F_{k-1} P_{k-1} \begin{bmatrix} H_k^T & L_k^T \end{bmatrix} R_k^{-1} \begin{bmatrix} H_k \\ L_k \end{bmatrix} P_{k-1} F_{k-1}^T \quad (3)$$

其中: $R_k = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_k \\ L_k \end{bmatrix} P_{k-1} \begin{bmatrix} H_k^T & L_k^T \end{bmatrix}$ 。

$$K_k = P_k H_k^T [I + H_k P_k H_k^T]^{-1} \quad (4)$$

$$\hat{x}_k = F_{k-1} \hat{x}_{k-1} + K_k (y_k - H_k F_{k-1} \hat{x}_{k-1}) \quad (5)$$

鲁棒 H_∞ 滤波中,量测估计误差 $e_k = y_k - H_k F_{k-1} \hat{x}_{k-1}$ 被称为新息,新息反映了当前量测带来的新信息,由滤波方程可以看出,状态估计值等于预测值和新息的加权和,而权重与量测自身无关,只与量测精度和预测精度有关,新的量测数据所带来的新息以线性组合的方式对鲁棒 H_∞ 滤波估计产生影响,所以在滤波过程中量测序列含有野值时,将会对滤波估计产生很大的影响,由于异常的量测数据都会在新息中体现出来,因此可以通过判断新息特性来判断量测值中是否含有野值,通过修正新息来剔除野值。

2 野值检测

2.1 基于小波变换的野值点检测

Matllar 提出了一种使用小波变换模的极大值降噪的方法;Donoho 提出在小波意义上,规则信号的绝大多数能量都集中在同一尺度上的少数的小波系数上,而噪声是分散开来的。因此,我们从野值的小波变换系数入手检测野值。

$\psi(t)$ 为一小波基函数,尺度因子和平移因子分别为 a 和 b ,信号 $f(t)$ 小波变换定义为:

$$WT_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (6)$$

小波变化将信号在 $t \sim \omega$ 域中展开,最细尺度对应着小波变换的最高频率,信号的小波变换,在最细的尺度上小波变换系数主要由噪声和野值的小波变换系数构成,野值在时域具有较大的幅值;由于变换的线性特征,其小波系数表现为独立的极值,在频率上比噪声更持久集中。而噪声的小波系数幅值很小,因此,野值的探测通过门限 τ 寻找最高频上的系

数来检测。

影响细尺度上小波系数的幅度是小波函数 $\psi(t)$ 的消失矩阶数,在所有的正交小波中,Haar 小波仅有一阶消失矩。它的支集长度为 $[0, 1]$, 在所有的小波中也是最小的支集长度,支集包含有奇点的 Haar 小波产生大幅值的小波变换系数。因此它不太适合逼近光滑的函数,对阶跃信号不敏感,对野值很敏感,会产生大幅值的系数。Haar 小波对独立的野值点响应很强烈,阶跃信号几乎都被压制,这就是采用 Haar 小波检测野值的原因。本文从时频域,采用 Haar 小波对野值进行检测,下边对其步骤进行描述:

(1) 小波分解 设 $\{V_J\}_{J \in Z}$ 是一个给定的多分辨率逼近, ϕ 和 ψ 分别为相应的尺度函数和小波函数。当 $J \rightarrow \infty$ 时, V_J 充分逼近 L^2 , 假定要分析的信号为 $f(t)$, $f(t) \in V_{J_1}$ ($J_1 \in Z$), 则信号 $f(t)$ 可以正交分解为:

$$f(t) = \sum_{J=J_1}^{J_2} f_{dJ} + f_{aJ_2}, \quad (J_2 < J_1) \quad (7)$$

$$f_{dJ} = \sum_{n \in Z} D_{J,n} \psi_{J,n}(t) \quad (8)$$

$$f_{aJ_1} = \sum_{n \in Z} C_{J_1,n} \phi_{J_1,n}(t) \quad (9)$$

$D_{J,n} = \langle f(t), \psi_{J,n}(t) \rangle$, $C_{J_1,n} = \langle f(t), \phi_{J_1,n}(t) \rangle$, 其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积,高频部分 f_{dJ} 是信号 $f(t)$ 在尺度 J_1 上的近似估计。

对于在尺度 J_2 上的观测序列 $x(n) \in l^2(z)$

$$x_{k_l} = H \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix}, x_{k_h} = G \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix}, \quad (0 < k < n) \quad (10)$$

其中: x_{k_l} 观测序列在低一级分辨率 ($J_2 + 1$) 上的近似估计, x_{k_h} 是相应的细节,它们还分别代表着观测序列的位置信息和速度信息。

(2) 野值检测 由于野值的存在, x_{k_h} 和 x_{k_l} 中包含很多野值的信息。野值信息大大降低了滤波性能,甚至会发散,因为最细尺度上的小波变换系数主要由野值和噪声组成。

如果: $x_{k_l, k_h} > \tau$, 我们可以认为 x_{k_l, k_h} 是一个野值,其中门限 $\tau = a\varepsilon$, a 是常数,取值由置信度决定。 ε 是最细尺度上小波系数的估计方差独立正态分布的白噪声

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^k (x_i - \mu) \quad \text{且} \quad \mu = \sum_{i=1}^k x_i / k \quad k \leq m \quad \text{独立正态分布的白噪声对信号 } f(t) \text{ 的作用是在整个时域中。由于其非相关性,将 } f(t) \text{ 投影到一个正交小波集中,其包含的白噪声应该和原信号具有相同的方差。采用上述野值检测方法即可以有效地检测出系统动态的野值点的发生时刻及发生位置。}$$

3 野值剔除

3.1 信息扩散^[6-7]

设 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 是知识样本, L 是基础论域, w_i 的观测值为 l_i , 设 $x = \phi(l-l_i)$, 则当 W 非完备时, 存在函数 $\lambda(x)$, 使 l_i 点获得的量值为 1 的信息可按 $\lambda(x)$ 的量值扩散到 l 上去, 扩散所得的原始信息分布为:

$$Q(l) = \sum_{i=1}^n \lambda(x) = \sum_{i=1}^n \lambda(\phi(l-l_i)) \quad (11)$$

式(11)能很好的反映 W 在总体的规律, 这一原理称为信息扩散原理。

根据这一原理对母体概率密度函数的估计称为扩散估计, 设 $\lambda(x)$ 为定义在 $(-\infty, +\infty)$ 上的一个波雷尔可测函数, $\Delta_n > 0$, 为常数, 则

$$\hat{f}(l) = \frac{1}{n\Delta_n} \sum_{i=1}^n \lambda\left[\frac{l-l_i}{\Delta_n}\right] \quad (12)$$

$\hat{f}(l)$ 即为母体概率密度函数 $f(l)$ 的扩散估计。

扩散估计的关键是扩散函数的具体形式, 不同的扩散函数得到不同的扩散估计结果, 本文利用正常的新息值对含有野值的新息值进行修正, 通常含野值的新息值比正常新息值大很多, 不同状态估计的新息数据之间近似呈现正态分布, 所以本文采用了正态扩散函数 $\lambda(x) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2a^2}\right]$ 。将其代入式(12)可得:

$$\hat{f}(l) = \frac{1}{nh\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(l-l_i)^2}{2h^2}\right] \quad (13)$$

其中: $h = a\Delta_n$ 为窗口长度。本文中取 $h = \frac{\max(l_i) - \min(l_i)}{n-1}$ 。

3.2 新息修正

本文采用信息扩散法对量测值所产生的新息进行修正, 具体步骤如下:

(1) 设各个状态估计的新息序列为 $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, 假设第一个状态估计的新息 l_1 出现野值, 利用上节给出的小波系数变换方法进行野值检测。

(2) 利用公式 $\hat{f}(l) = \frac{1}{nh\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(l-l_i)^2}{2h^2}\right]$ 求出各个新息的密度函数。

(3) 利用替代方法得出新的新息, 在此过程中, 本文摒弃了含有野值的新息 l_1 , 取而代之是正常的新的新息, 即其它状态估计的新息 $\{l_2, \dots, l_n\}$ 的加权和, 权值则是由正常新息密度函数 $\hat{f}(l_i)$, $i=2, \dots, n$ 与含野值新息的密度函数 $\hat{f}(l_1)$ 之比得出的, 替代新

$$\text{息} \text{的表达式为 } l_1 = \sum_{i=2}^n \left(\frac{\hat{f}(l_i)}{\sum_{i=2}^n \hat{f}(l_i)} \cdot l_i \right)。$$

基于信息扩散原理的新息修正法充分利用了正常的新息, 通过自适应比例加权的方式对含有野值的新息进行替代, 从而达到保障了滤波的精度目的。

4 仿真

采用基于 MEMS 的 SINS/GPS 组合导航的车载系统^[8], 实验装置基本构造为一个三轴陀螺 ADI-SII6355, 包含三轴正交陀螺及三轴加速度计以及温度补偿电路, 此外附加 GPS 测试版。系统初始位置为 $(40^\circ\text{N}, 118^\circ\text{E})$, 系统以 5 m/s^2 加速度运行。标准运动轨迹如图 1 所示。

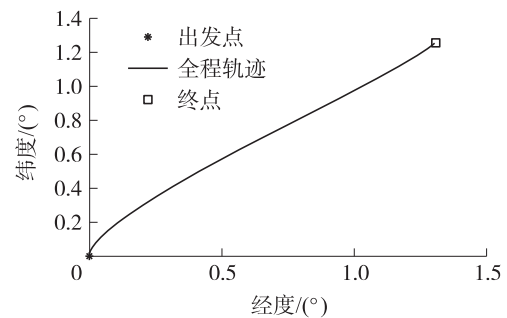


图1 系统运动轨迹

微惯导组合系统状态向量 $\mathbf{x} = [\delta L \quad \delta \lambda \quad \delta h \quad \delta V_E \quad \delta V_N \quad \delta V_U \quad \varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U \quad t_u \quad i_{ru}]$, 其中 t_u 为 GPS 时钟误差引起的等效距离误差, i_{ru} 为 GPS 时钟误差引起的等效速度误差, 量测伪距 $\mathbf{z}_1 = [\Delta \rho_1 \quad \Delta \rho_2 \quad \Delta \rho_3 \quad \Delta \rho_4]$, 伪距率 $\mathbf{z}_2 = [\Delta \dot{\rho}_1 \quad \Delta \dot{\rho}_2 \quad \Delta \dot{\rho}_3 \quad \Delta \dot{\rho}_4]$ 。 $\Delta \rho_i$ 为第 i 颗卫星到车载体的伪距, $\Delta \dot{\rho}_i$ 为第 i 颗卫星到车载体的伪距率。给定仿真条件: 状态矢量 \mathbf{x} 的初值为 0, 陀螺常值漂移为 $5^\circ/\text{h}$, 随机漂移白噪声为 $3^\circ/\text{h}$, 一阶马尔科夫噪声相关时间为 3600 s , 驱动噪声为 $1.5^\circ/\text{h}$ 。加速度计常值漂移为 $0.05 g_n$, 随机漂移白噪声为 $0.02 g_n$, 一阶马尔科夫噪声相关时间为 7200 s , 驱动噪声为 $0.005 g_n$ 。GPS 伪距误差白噪声为 $(12 \text{ m}, 12 \text{ m}, 15 \text{ m})$, 伪距率误差白噪声为 $(0.2 \text{ m/s}, 0.2 \text{ m/s}, 0.3 \text{ m/s})$ 。时钟误差白噪声为 $(2 \text{ m}, 2 \text{ m}, 2 \text{ m})$, 时钟频率误差一阶马尔科夫噪声相关时间为 500 s , 驱动噪声为 0.05 m/s 。 γ 为 2.1。微惯导组合系统状态方程和量测方程的矩阵参数具体表达形式本文不做累述, 参看文献^[9-12]。

假设 $t=30 \text{ s}$ 时量测伪距的第一个分量出现野值, 设含野值的新息值为 100, 新息数据如图 2 所示。

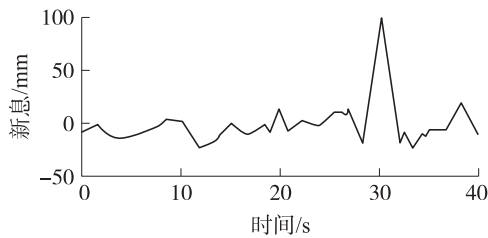


图2 含单个野值的新息

首先进行野值检测,对10 s~30 s的数据进行分析,首先取 $a=0.1$,则 $k=2.98$,10 s~30 s的数据均值为4.52,标准方差为22.40,野值检测门限为 $(-36.28, 48.43)$,可知,新息在 $t=30$ s为100,超出此范围,暂时认定为野值点。然后取 $a=0.05$, $k=4.12$,10 s~29 s的数据均值为0.52,标准方差为11.86,野值检测门限为 $(-28.84, 41.12)$,可知新息在 $t=30$ s为100超出此范围,认定为野值。

然后进行野值剔除,本文分别对两种新息修正方法进行比较,第1种为增益矩阵修正法,对滤波过程中与含野值的新息对应的那一行的 K 值人为置零。第2种为本文提出的新方法,当第1颗卫星伪距含有野值时,充分利用第2到4颗卫星伪距的正确性,基于信息扩散原理利用正确新息的加权和代替含野值新息。

当检测出 $t=30$ s有野值时,对第1种方法进行仿真。如图3和4所示。

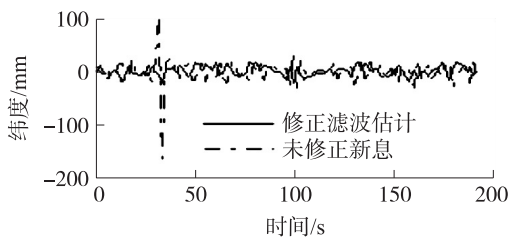


图3 含单个野值的纬度滤波估计

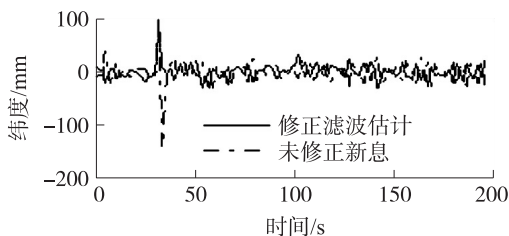


图4 含单个野值的经度滤波估计

由仿真结果可以看出,由于组合导航量测值之间是耦合的,只是单纯的人为置零某一行增益矩阵并不能消除野值对其它状态估计所产生的影响。

然后利用本文提出的方法在单个野值出现的情况下进行仿真,如图5和6所示,在成片野值出现的情况下进行仿真,如图7所示。

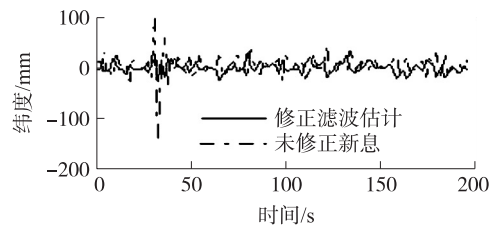


图5 含单个野值的纬度滤波估计

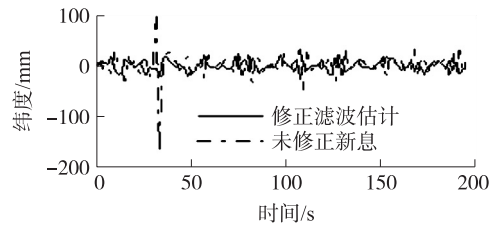


图6 含单个野值的经度滤波估计

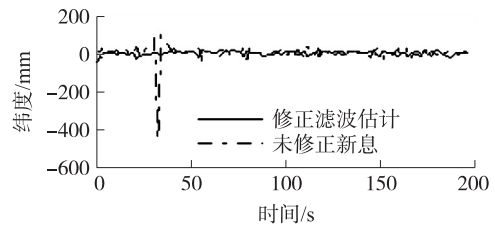


图7 含成片野值的纬度滤波估计

由仿真结果可以看出,无论是单个还是成片野值,基于扩散原理的新息修正方法都能够充分利用正常新息,从而达到消除野值的目的。

5 结论

实际过程中,量测值中出现野值的现象是经常发生的,如果不及时处理,会导致滤波精度下降。本文提出的采用小波变换系数特性,通过最细尺度上的小波系数来检测野值点。然后采用基于信息扩散原理的新息修正法,可在线自适应调整新息,消除野值对滤波的影响,特别对成片野值的出现有很好的鲁棒性,通过微惯性车载系统 SINS/GPS 组合导航的仿真可得出,新算法既保证了野值检测的准确性,又保证了滤波的精度,具有良好的应用价值。

参考文献:

- [1] 颜东,张洪钺. 基于辨识 ARMA 模型的野值剔除方法与卡尔曼滤波修正算法[J]. 信息与控制,1995,24(3):183-187.
- [2] 祝转民,秋宏兴,李济生. 动态测量数据野值的辨识与剔除[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(2):147-150.
- [3] 柳海峰,姚郁,卢迪. Kalman 滤波新息正交性抗野值法研究[J]. 电机与控制学报,2003,7(1):40-43.
- [4] 罗志斌,刘先省,胡振涛等. 基于新息特性抗野值 Kalman 预测算法[J]. 河南大学学报,2006,6(4):79-82.
- [5] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中

- 的应用[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 黄崇福,王家鼎等.模糊信息优化处理技术及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [7] 卢峥,张帆,程京.基于信息扩散的Kalman滤波抗野值研究[J].科学技术与工程,2007,8(7):1525-1528.
- [8] 高宗余,李德胜,王跃宗.基于ZUPT的车载MEMS惯性系统的混合滤波[J].电机与控制学报,2010,14(2):31-35.
- [9] 杨春钧,袁信.差分GPS伪距与惯导组合技术仿真研究[J].航天控制,1998,1:62-68.
- [10] 苑艳华,李四海,南江.基于卡尔曼滤波器的航姿系统测姿算法研究[J].传感技术学报,2011;24(12):1723-1727.
- [11] 张品秀,黄操军,乔相伟.基于自适应扩展kalman滤波的SINS/GPS深组合研究[J].传感技术学报,2010;23(3):408-412.
- [12] 徐本连,董学平,王执铨.双基阵纯方位目标跟踪的抗野值算法研究[J].东南大学学报,2004;34(增刊)199-203.



高宗余(1975-),男,1998年于兰州铁道学院获得学士学位,2005年于兰州交通大学获得硕士学位,2010年于北京工业大学获得工学博士学位,现为北京联合大学讲师,北京交通大学博士后,主要研究方向为MEMS技术,惯导技术及数据融合,gzy19750510@163.com;



方建军(1970-),男,1993年于华中农业大学获得工学学士学位,1998年于中国农业大学硕博连读获得工学博士学位,现为北京联合大学自动化学院教授、院长,主要研究方向为机器人技术、MEMS技术和嵌入式系统应用,fangjj1947@126.com。