

基于滑动最速跟踪微分器的遥测数据滤波方法

张科^{1,2}, 姜海旭^{1,2}, 王靖宇^{1,2}

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2.西北工业大学 航天飞行动力学技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要:原始卫星遥测数据中通常含有噪声和野值,为确保对卫星状态的准确分析,需要对遥测数据进行滤波处理。提出一种面向卫星遥测数据的滑动最速跟踪微分器滤波方法,针对最速跟踪微分器的参数选择问题,采用扫频法分析其幅频特性,建立了跟踪因子与滤波结果之间的函数关系,在此基础上,利用滑动窗口划分遥测数据,并分析各窗口内数据局部稳定性与跟踪因子之间的关系,给出了局部数据跟踪因子的计算方法,实现对各窗口内遥测数据的动态滤波。实验结果表明,该方法能够有效避免传统数字滤波器处理遥测数据的局限性,可以有效滤除卫星遥测数据中的噪声和野值。

关键词:最速跟踪微分器;滑动窗口;卫星遥测数据;非平稳数据滤波

中图分类号: TN.911

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2020)03-0515-08

在轨卫星的工作状态主要通过遥测数据反映,受工作环境和自身器件退化等因素影响,地面测控站直接获取的遥测数据中通常含有大量噪声和野值,因此在分析遥测数据前,应对其进行滤波处理。目前,遥测数据滤波方法主要分为基于模型和基于数据驱动两类^[1-2]。当卫星模型已知时,采用基于模型的滤波方法可以取得很好的滤波效果^[3-5]。但实际卫星系统构成通常较为复杂,导致精确模型建立困难,因此,在工程中多采用基于数据驱动的滤波方法。由于卫星遥测数据包含的噪声和野值在幅值与频率特性上存在差异,因此,在被测数据特性不明确时,难以使用典型的数据驱动滤波方法同时消除2种干扰。王广成等^[6]和胡婧等^[7]将遥测数据进行窗口化处理,分别采用中值滤波和形态滤波方法,对各窗口内遥测数据进行滤波处理,得到较好的滤波结果,但是结果丢失了数据中的突变特征。周增光等^[8]采用 Savitzky-Golay 滤波方法对数据中高值噪声和突变干扰具有很好的滤波效果,但计算量较大,对非平稳数据的滤波能力有限。胡绍林等^[9]提出一种动态测量数据的高保真容错 Q 算法,有效消除了遥测数据中的噪声。但方法对野值处理能力有限。可以看出,现有卫星遥测数据滤波方法对数据

应用背景要求较为严格,在处理噪声和野值问题时,通常需要分步解决,增加了计算的复杂度。因此卫星遥测数据的理想滤波是在保留数据中有效数据的同时,对其中幅值和频率特征不同的噪声与野值进行快速有效滤除。

最速跟踪微分器^[10-11]是由韩京清提出的一种二阶离散形式跟踪微分器,具有良好的数据跟踪能力,通过选用合理的参数,最速跟踪微分器能够实现含噪数据的理想滤波和去野。但目前最速跟踪微分器的参数选择仍以经验法为主,并且在滤波时采用全局固定参数,这都直接影响最速跟踪微分器的滤波效果,使最速跟踪微分器的应用范围受到局限,本文提出一种基于滑动最速跟踪微分器的遥测数据滤波方法,通过滑动窗口对数据进行划分,根据各窗口内数据的稳定性设计局域最速跟踪微分器的参数,实现对卫星遥测数据的理想滤波。

1 滑动最速跟踪微分器滤波算法

1.1 滑动最速跟踪微分器参数设计

最速跟踪微分器能够有效抑制输入数据中的高

收稿日期:2019-03-20

基金项目:陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-03-02-03)与国家自然科学基金(61976179,61502391)资助

作者简介:张科(1968—),西北工业大学教授、博士生导师,主要从导航、制导与控制及深空探测等研究。

频噪声和野值,实现对输入数据快速无振荡的跟踪,因此可以将其应用于遥测数据的滤波处理。本文采用二阶最速跟踪微分器,其离散形式为

$$\begin{cases} fh = fhan(x_1(t) - v_0(t), x_2(t), r, h_0) \\ x_1(t) = x_1(t) + hx_2(t) \\ x_2(t) = x_2(t) + h \cdot fh \\ h_0 = nh \end{cases} \quad (1)$$

$$fhan = - \begin{cases} r \text{sign}(a), & |a| > d \\ r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases}$$

$$d = rh_0 \quad d_0 = h_0d$$

$$y(t) = x_1(t) + h_0x_2(t)$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y(t)|}$$

$$a = \begin{cases} x_2(t) + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y(t)), & |y(t)| > d_0 \\ x_2(t) + \frac{y(t)}{h_0}, & |y(t)| \leq d_0 \end{cases}$$

式中: $v(t)$ 为输入数据; $x_1(t)$ 为 $v(t)$ 的跟踪数据和 $x_2(t)$ 为 $x_1(t)$ 的导数; $fhan(\cdot)$ 为最速控制综合函数; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; r 为跟踪因子; h 为积分步长; h_0 为滤波因子; n 为滤波系数, $n \geq 1$ 。

由(1)式可知,最速跟踪微分器的主要调节参数为跟踪因子和滤波因子。增大滤波因子能够提高滤波输出数据的光滑性,但也会增大滤波输出数据的相位延迟。文献[12]分析了最速跟踪微分器滤波输出相位延迟与输入数据频率及积分步长间的关系,证明在输入数据频率确定情况下,积分步长越小,则滤波输出数据的相位延迟越小。由于本文滤波对象为离线数据,因此在实际应用过程中,通过直接调整积分步长对滤波输出数据的相位延迟,所以设定滤波系数 $n = 1$ 。为了克服相位延迟,采用“先预测,后微分”方法^[11],对(1)式进行改进

$$\begin{cases} v(t) = v_0(t) + h_1v_2(t) \\ fh = fhan(v \& _1(t) - v(t), v_2(t), r, h_0) \\ v_1(t + h) = v_1(t) + hv_2(t) \\ v_2(t + h) = v_2(t) + hfh \end{cases} \quad (2)$$

式中, h_1 为预测时长,其值通常为积分步长 h 的 1 ~ 1.5 倍。

跟踪因子决定输出数据对输入数据的跟踪程度,因此通过调节跟踪因子可以直接影响数据滤波效果。如何设定跟踪因子是最速跟踪微分器进行数据滤波关键问题,目前跟踪因子设定缺乏相关理论,

主要根据经验设定。本文以不同频率和幅值的正弦型数据为输入,采用扫频法分析最跟踪因子与输入数据之间的幅频关系。

设定最速跟踪微分器滤波因子 $n = 1$, 积分步长 $h = 0.01$, 输入正弦数据为 $A\sin(\omega t)$, 数据幅值 $A = [5 \ 10 \ 50]$, 角频率 $\omega = [5 \ 12 \ 20]$, 通过组合生成 9 组不同参数的输入数据。采用扫频法分析跟踪因子与输入数据参数之间关系,令跟踪因子 r 初值为 1, 步长为 1, 分别对各组输入数据进行滤波,得到输出数据幅值、角频率与跟踪因子之间的关系如图 1 所示。

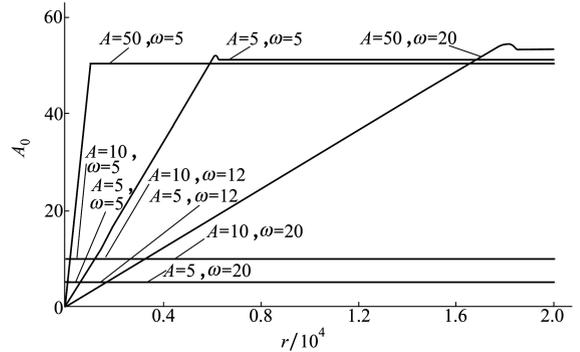


图 1 跟踪因子 r 值与输出数据幅频关系图

由图 1 可得:

- 1) 随着跟踪因子值增大,各输出数据幅值均存在转折点,当超过转折点后,继续增大跟踪因子值,输出数据幅值基本保持稳定;
- 2) 相同角频率下,不同幅值输入数据对应等幅输出跟踪因子 r 具有相同的斜率 k 。

$$k = A/r \quad (3)$$

- 3) 随着输入数据幅值和角频率参数增大,对应输出数据幅值转折值逐渐增大,具体值如表 1 所示。

表 1 输入数据幅值 A 与 ω 对应等幅输出 r 值和转折点 r 值

角频率	输入数据幅值 A	转折点 r 值	等幅输出 r 值
5	5	105	101
	10	212	202
	50	1 026	1 010
12	5	620	615
	10	1 240	1 228
	50	6 142	5 884
20	5	1 745	1 653
	10	3 582	3 309
	50	18 180	16 500

由表1可知,相同角频率输出数据的斜率值 k 分别为:当角频率为5时,斜率值 $k_{\omega_5} \approx 0.049$;当角频率为12时,斜率值 $k_{\omega_{12}} \approx 0.008$;当角频率为20时,斜率值 $k_{\omega_{20}} \approx 0.003$ 。进一步计算各组输入数据角频率与斜率值之间关系可以发现:角频率 $\omega_5 = 5$ 时, $\frac{1}{\omega_5^2} = 0.04 \approx k_{\omega_5}$;角频率 $\omega_{12} = 12$ 时, $\frac{1}{\omega_{12}^2} = 0.007 \approx k_{\omega_{12}}$;角频率 $\omega_{20} = 20$ 时, $\frac{1}{\omega_{20}^2} = 0.0025 \approx k_{\omega_{20}}$,因此得到斜率 k 与角频率 ω 之间存在如下关系

$$k \approx \frac{\beta}{\omega^2} \quad (4)$$

式中, β 为修正系数。由表1可得到各组数据对应的修正系数分别为: $\beta_{\omega_5} = 1.225, \beta_{\omega_{12}} = 1.143, \beta_{\omega_{20}} = 1.200$,可以发现 β 值在一定数值范围内变化,在实际使用(4)式时,可设定 $\beta = 1.200$ 。

综合表1和图1结果可知,对于正弦型数据,最速跟踪微分器跟踪因子值与输入数据幅值和角频率存在正比关系,综合(3)和(4)式得到跟踪因子 r 经验公式为

$$r \approx \beta \cdot A \cdot \omega^2 \quad (5)$$

目前使用最速跟踪微分器时,跟踪因子通常设定为全局统一值。当输入数据为非平稳性较强的数据时,难以在全局内取得较好的滤波结果。为获取理想的滤波结果,应根据数据的非平稳性征,对数跟踪因子进行动态更新。

窗口化是处理非平稳数据的常用方法,通过选择合适的窗口使各窗口内数据的稳定性相对确定。参考(1)式,为确保最速跟踪微分器相邻数据点滤波结果的连续性,选择滑动窗方法对数据进行窗口化处理。在选择滑动窗口宽度时,应使窗口化处理各窗口内数据呈现相对一致的稳定性。

(5)式虽然为正弦型数据获得的经验公式,但其指出跟踪因子值与输入数据幅值和频率之间存在正比关系,因此参考(5)式,进一步研究最速跟踪微分器滤波因子与窗口内数据幅值和频率之间关系,提出一种基于滑动窗最速跟踪微分器的跟踪因子设计方法。

窗口内数据的幅值和频率能够反映数据的稳定性。窗口内数据的幅值稳定性可以利用数据离散程度反映,而数据离散程度可以通过标准差进行定量表示。窗口内数据的频率稳定程度主要受数据中偏离均值较大的离群点数据影响,参考广义局域频率

定义^[13],本文提出一种局域最大频率法,利用各窗口内离群点数据的统计值描述窗口内数据的频率稳定性。方法具体内容为:

首先将原数据划分为 M 个窗口,计算各窗口离群点提取阈值

$$T_{h_j} = \alpha \cdot \sigma_j \quad (6)$$

式中: $\sigma_j (j \in [1, M])$ 为各窗口内数据的标准差; α 为阈值系数,通常取值大于2。

然后统计各窗口内幅值大于离群点提取阈值的数据点数量 O_j ,将各离群点数据视为等值的重复数据。最后假设各离群点按照最大频率分布,可以得到各窗口局域最大频率值为

$$f_j = \frac{O_j}{N_w} \quad (7)$$

式中: N_w 为窗口宽度; O_j 为窗口内离群点数量。局域最大频率法原理简单,能够快速计算出各窗口内数据的最大频率。

利用各窗口内数据幅值和频率的定量表征值,参考(5)式给出各窗口内跟踪因子 r_j 计算公式

$$r_j = \left(1 + \frac{O_j}{N_w}\right) \sigma_j \quad (8)$$

由于标准差 σ_j 易受数据幅值影响,因此采用局域归一化标准差 σ_{m_j} 对其进行修正

$$\sigma_{m_j} = \frac{\sigma_j}{|m_j|} \quad (9)$$

式中, m_j 为窗口内的数据均值。将其带入(8)式,得到各窗口内跟踪因子计算公式

$$r_j = \left(1 + \frac{O_j}{N_w}\right) \sigma_{m_j} \quad (10)$$

1.2 滑动窗最速跟踪微分器滤波算法流程

同一卫星系统的遥测数据在不同时段的噪声水平可能存在较大变化。为取得更理想的滤波结果,在使用最速跟踪微分器进行滤波时,应对其跟踪因子进行动态修正,因此本文提出一种基于滑动窗的最速跟踪微分器滤波算法:

首先对输入数据进行滑动窗划分,滑动窗口宽度设置通常参考输入数据的固有周期,当数据周期不明确时,以数据形态特征点,如拐点划分窗口^[14]。

然后计算各窗口内数据标准差和局域归一化标准差,设定离群点提取阈值,统计各窗口离群点数量,利用(10)式计算各滑动窗内数据对应的跟踪因子,并使用最速跟踪微分器进行滤波,得到各滑动窗数据的滤波结果,以各滑动窗相同数据位滤波结果

的均值作为该数据位滤波结果。

由于数据中的突变点可能引起滤波结果产生较大延迟,因此应对包含突变点的窗口重新划分。数据突变点主要出现在导数值变化较大的位置,通过设定检测阈值,提取突变点精确位置,以此为起始点划分新的窗口,对窗口内数据的跟踪因子进行更新并重新计算滤波结果,得到最终滤波结果。方法流程如图 2 所示:

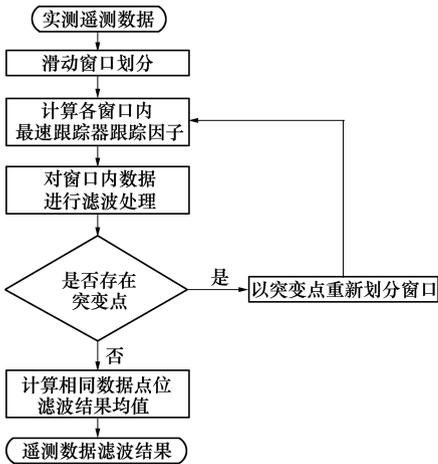


图 2 滑动窗最速跟踪微分器滤波方法流程图

2 实验验证及结果分析

为验证滑动最速跟踪微分器的滤波效果,分别以仿真数据和实测数据进行测试,并选择滑动中值滤波、滑动多项式滤波和容错 Q-滤波进行对比分析。

2.1 滤波效果评价

为了对各种方法滤波效果进行客观评价,选择信噪比、误差标准差和光滑度作为滤波结果的全局评价参数,选择突变点平均绝对误差(IMAD)对数据中突变部分的滤波效果进行评价。

信噪比反映滤波器对干扰数据的滤波能力,其值与滤波器性能成正比;误差标准差反映滤波结果与输入数据误差的标准差,其值与滤波器性能成反比;光滑度反映滤波结果的平滑性,其值与滤波器性能成反比;光滑度分为全局光滑度(S)和相对光滑度(S_r),输入数据 $\{y_i, i \in [1, L]\}$ 的全局光滑度计算公式为

$$S = \text{std}\left(\frac{(\hat{y}_i - \hat{y}_{i-1})}{\Delta_i}\right) \quad (11)$$

式中, std 为标准差计算, Δ_i 为采样间隔。 \hat{y}_i 为滤波结果。

对于包含阶跃跳变的数据,如矩形数据,阶跃点会导致数据全局光滑度下降,因此全局光滑度值无法准确反映滤波结果的光滑度,针对该类型数据采用相对光滑度

$$S_r = \text{std}\left(\frac{(y_i - \hat{y}_i) - (y_{i-1} - \hat{y}_{i-1})}{\Delta_i}\right) \quad (12)$$

2.2 仿真数据实验

典型卫星遥测数据的数学形式可简化表示为

$$y(t_i) = x(t_i) + n(t_i) \quad i \in [1, N] \quad (13)$$

式中: $x(t_i)$ 为有效数据; $n(t_i)$ 为干扰数据, $n(t_i) = n_1(t_i) + n_2(t_i) + n_3(t_i)$; $n_1(t_i)$ 为随机噪声数据; $n_2(t_i)$ 为野值数据; $n_3(t_i)$ 为趋势性异常数据。

利用公式(13)生成有效数据 $x(t)$ 为正弦和矩形的 2 组仿真数据,噪声 $n_1(t)$ 为服从高斯分布,幅值在 $[0, 5]$ 区间变化的噪声数据, $n_2(t)$ 为数据中均匀分布的 10 个时长为 15 的野值。 $n_3(t) = 0.1t$ 为数据中包含的趋势项。

令仿真数据采样时间为 0.01 s, 长度 N 为 5 000。当 $x(t_i) = 20\sin(5t_i)$ 时, 得到仿真数据 $y_1(t_i)$, 如图 3 所示。利用本文方法和对比方法对仿真数据 $y_1(t_i)$ 进行滤波, 统一设定各方法滑动窗宽度为 50, 滑动步长为 1。数据滤波结果见图 4 至 7。

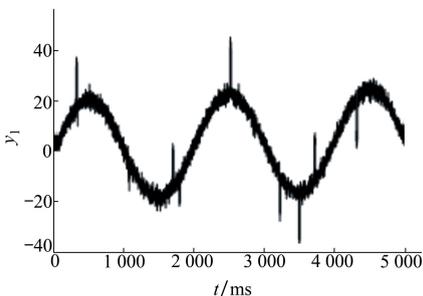


图 3 仿真数据 y_1 时域图

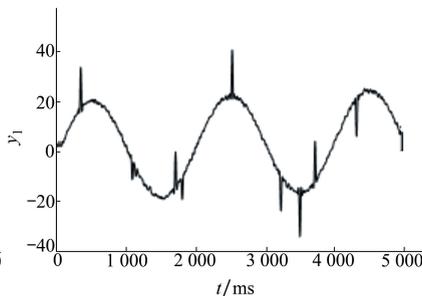


图 4 y_1 滑动多项式滤波结果

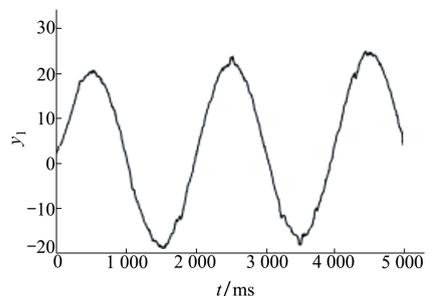


图 5 y_1 滑动中值滤波结果

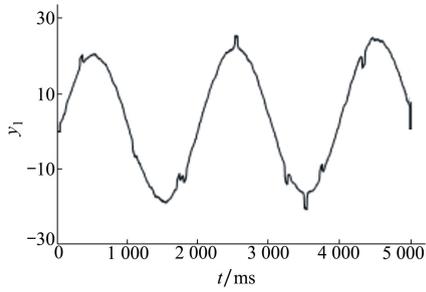


图6 y_1 容错 Q-滤波结果

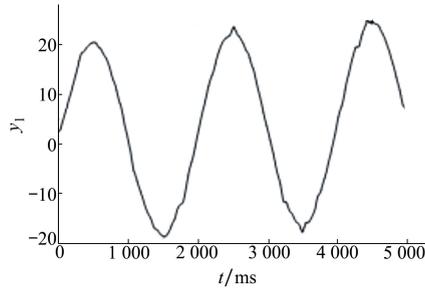


图7 y_1 滑动最速跟踪微分器滤波结果

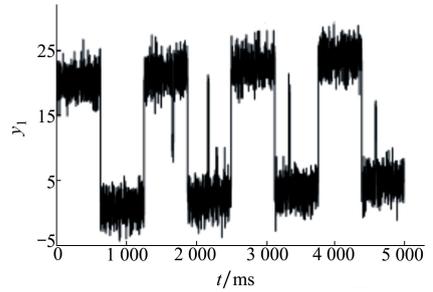


图8 仿真数据 y_2 时域图

各种滤波结果评价参数计算结果如表2所示。

表2 仿真数据 y_1 滤波评价参数

方法	参数			
	IMAD	Std_Dev	SNR	S
滑动中值	11.548 4	1.784 4	18.430 4	0.095
滑动多项式	1.458 4	2.295 2	16.807 0	0.277
容错 Q-滤波	11.105 3	2.247 1	16.473 3	0.092
滑动跟踪微分器	11.727 3	1.775 1	18.471 5	0.047

综合对比图4至7各方法滤波结果的时域图以及表2滤波评价参数值,可知:

滑动多项式滤波结果的误差标准差较大,全局光滑度和信噪比较低,对干扰数据滤波能力有限,滤波结果中仍然包含较多噪声,突变点平均绝对误差值较小,对野值几乎没有滤除效果。滑动中值滤波和容错 Q-滤波在滤波原理上相似,2种方法滤波结果的突变点平均绝对误差值较大,对野值有很好的

抑制效果,滤波结果的全局光滑度接近,滑动中值滤波具有较低的误差标准差和较高信噪比,但受到方法原理限制,滤波结果存在相位延迟和端点效应。与以上各方法对比,滑动最速跟踪微分器滤波结果的各项评价参数均为最优,对噪声具有较好的抑制能力。与文献[10]中仿真数据对比,本文仿真数据包含的野值时长宽度为其3倍,由滤波结果可知本文方法对宽时长野值仍然具有较好滤除效果。

$$\text{当 } x(t_i - KT) = \begin{cases} 15 & KT < t_i < T/2 + KT \\ 0 & KT + T/2 < t_i < T + KT \end{cases}$$

时,令周期 $T = 1\ 250$,周期数量 $K \in [0, 1, 2, 3, 4]$,得到矩形仿真数据 $y_2(t_i)$,如图8所示。对仿真数据 $y_2(t_i)$ 进行滤波时,同样设定各方法的滑动窗宽度为50,滑动步长为1,得到滤波结果如图9至12所示。

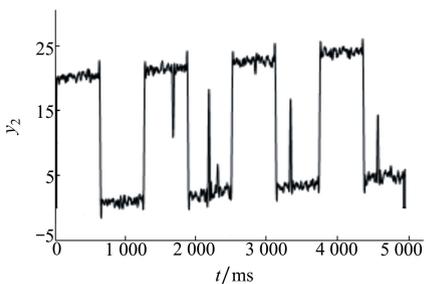


图9 y_2 多项式滤波结果

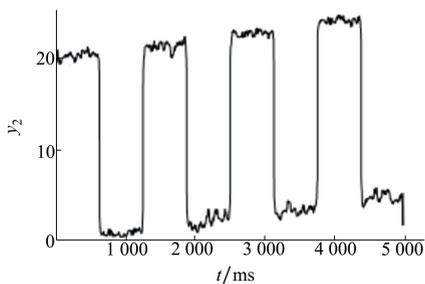


图10 y_2 滑动中值滤波结果

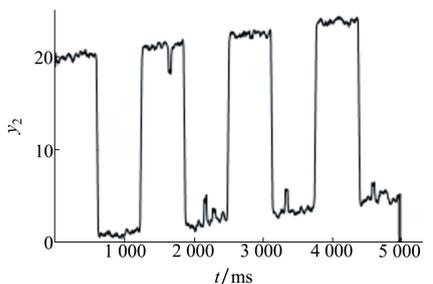


图11 仿真数据 y_2 Q-滤波结果

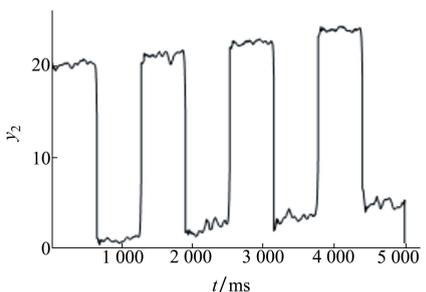


图12 y_2 滑动最速跟踪微分器滤波结果

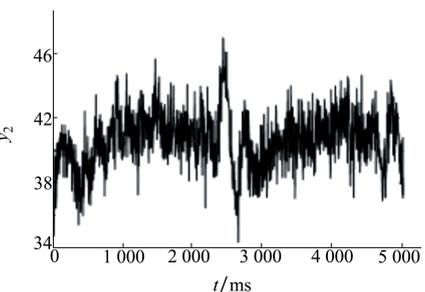


图13 实测某航天器太阳帆板轴温数据

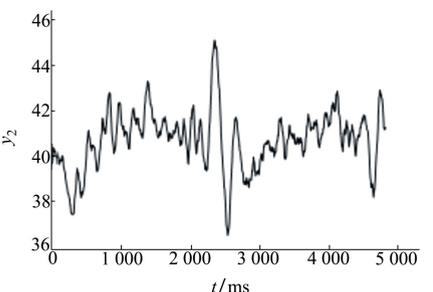


图14 实测数据滑动多项式滤波结果

各滤波结果评价参数计算结果如表 3 所示。

表 3 仿真数据 y_2 滤波评价参数

方法	参数			
	IMAD	Std_Dev	SNR	S_r
滑动中值	6.886 9	2.357 0	18.275 8	2.576 8
滑动多项式	1.247 5	2.496 4	10.916 3	2.628 9
容错 Q-滤波	4.523 0	4.085 1	14.875 8	2.680 9
滑动跟踪微分器	6.916 7	1.931 1	18.287 7	2.624 5

由于仿真数据 $y_2(t_i)$ 包含周期性阶跃变化,因此选择相对光滑度作为评价参数,综合对比图 9 至 12 中各方法滤波结果的时域图以及表 3 给出各滤波结果评价参数,可知:

滑动多项式滤波结果的信噪比和突变点平均绝对误差值较低,对全局噪声和野值的抑制能力较差。

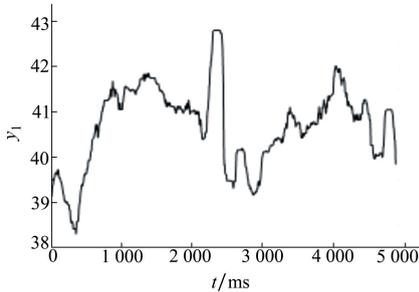


图 15 实测数据滑动中值滤波结果

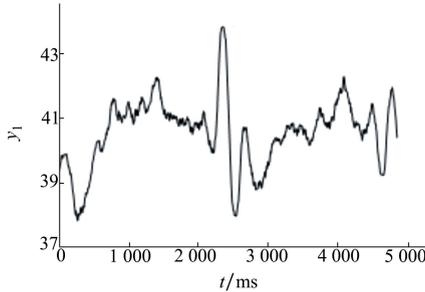


图 16 实测数据容错 Q-滤波结果

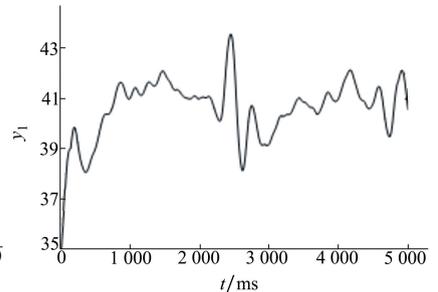


图 17 实测数据滑动最速跟踪微分器滤波结果

各滤波结果评价参数计算结果如表 4 所示。

表 4 实测数据滤波结果评价参数

方法	参数			
	IMAD	Std_Dev	SNR	S
滑动中值	1.943 2	1.595 9	28.396 8	0.563 2
滑动多项式	0.075 2	4.817 2	18.421 0	1.274 7
容错 Q-滤波	0.717 3	1.664 4	27.735 1	0.092 9
滑动跟踪微分器	1.223 7	1.396 8	29.276 7	0.064 0

综合分析滤波结果时域图与相关评价参数,滑动多项式滤波结果较好地提取了输入数据的趋势,但对细节保留过多,导致滤波结果信噪比低、误差标准差较大以及全局光滑度低,对突变异常数据的滤波能力较差。滑动中值滤波和容错 Q-滤波的滤波结果具有较高信噪比,容错 Q-滤波比滑动中值滤波具有更好的光滑度,但是对突变异常数据的滤波效果有限。与以上方法相比较,滑动跟踪微分器的滤波结果在全局内误差标准差最小,具有最高的信噪

比和全局光滑度,能够较好滤除噪声,提取数据变化的趋势。阶跃跳变会引起容错 Q-滤波方法中分位数的跳变,导致对应滤波结果的信噪比和突变点平均绝对误差值下降,使全局误差标准差增大。滑动中值滤波结果具有较高的信噪比和相对光滑度,但在阶跃点会产生相位延迟导致滤波结果全局误差标准差增大。阶跃点会引起滑动最速跟踪微分器的局部跟踪参数抖动,导致相对光滑度下降,但其他评价参数均为最优。

2.3 实测数据实验

图 13 所示为某卫星太阳帆板轴温实测数据,数据受干扰较为剧烈,在 478 点到 530 点之间出现突变异常。设定各滤波方法滑动窗宽度为 30,滑动步长为 1,各滤波方法的滤波结果如图 14 至 17 所示。

比和全局光滑度,能够较好滤除噪声,提取数据变化的趋势。

3 结 论

受工作环境影响,地面测控站直接获取的在轨卫星遥测数据通常为含有噪声和野值干扰的非平稳数据,本文提出了一种基于滑动最速跟踪微分器的滤波方法,利用窗口化处理扩展了最速跟踪微分器在数据滤波领域的工程实用性,将最速跟踪微分器跟踪因子与数据局部平稳性进行关联,给出了局部跟踪因子计算方法,克服最速跟踪微分器使用全局固定跟踪因子的滤波局限性,能够处理野值和阶跃型的异变数据。采用仿真数据和实测数据进行了实验验证,结果证明本文方法对不同类型的遥测数据滤波的有效性。

参考文献:

- [1] 彭喜元, 庞景月, 彭宇, 等. 航天器遥测数据异常检测综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1929-1945
PENG Xiyuan, PANG Jingyue, PENG Yu, et al. Review on Anomaly Detection of Spacecraft Telemetry Data[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1929-1945 (in Chinese)
- [2] DING F, WANG F, XU L, et al. Decomposition Based Least Squares Iterative Identification Algorithm for Multivariate Pseudo-Linear Arma Systems Using the Data Filtering[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(3): 1321-1339
- [3] 张艾, 李勇. 考虑星间测量的航天器自主导航并行滤波器[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 42-49
ZHANG Ai, LI Yong. Parallel Filters for Autonomous Navigation Using Relative Measurements between Satellites[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(6): 42-49 (in Chinese)
- [4] 王光鼎, 张升康, 杨汝良. 一种基于卡尔曼滤波处理的北斗卫星无源组合导航自适应野值剔除方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1981-1984
WANG Guangding, ZHANG Shengkang, YANG Ruliang. An Adaptive Outlier Algorithm Based on Kalman Filtering for Beidou Satellite Passive Combination Navigation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(8): 1981-1984 (in Chinese)
- [5] 王可东, 熊少锋. ARMA 建模及其在 Kalman 滤波中的应用[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1048-1055
WANG Kedong, XIONG Shaofeng. An ARMA Modeling Method and Its Application in Kalman Filtering[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(8): 1048-1055 (in Chinese)
- [6] 王广成, 刘海明, 杨根荣. 中值滤波方法在遥测数据处理中的应用[J]. 遥测遥控, 2002, 23(1): 26-31
WANG Guangcheng, LIU Haiming, YANG Genlun. The Application of Median Filter in Telemetry Data Processing[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2002, 23(1): 26-31 (in Chinese)
- [7] 胡婧, 谢智东, 范乐昊, 等. 卫星通信频谱监测中的一种形态学滤波预处理方法[J]. 宇航学报, 2014, 35(12): 1444-1449
HU Jing, XIE Zhidong, FAN Lehao, et al. An Approach to Satellite Spectrum Monitor Using Morphological Filter[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(12): 1444-1449 (in Chinese)
- [8] 周增光, 唐娉. 基于质量权重的 Savitzky-Golay 时间序列滤波方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 232-239
ZHOU Zengguang, TANG Pin. Quality Based Savitzky-Golay Method for Filtering Time Series Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(2): 232-239 (in Chinese)
- [9] 胡绍林, 傅娜, 郭文明. 动态测量数据的高保真容错 Q-滤波算法[J]. 宇航学报, 2016, 37(1): 112-117
HU Shaolin, FU Na, GUO Wenming. High-Verisimilitude Outlier-Tolerant Q-Filtering Algorithm for Dynamic Measurement Data [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(1): 112-117 (in Chinese)
- [10] 韩京清, 袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 263-273
HAN Jingqing, YUAN Lulin. The Discrete Form of Tracking Differentiator[J]. Journal of System Science and Mathematical Science, 1999, 19(3): 263-273 (in Chinese)
- [11] 韩京清, 黄远灿. 二阶跟踪-微分器的频率特性[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(3): 263-273
HAN Jingqing, HUANG Yuancan. Frequency Characteristic of Second Order Tracking Differentiator[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2003, 33(3): 263-273 (in Chinese)
- [12] 万慧, 齐晓慧. 跟踪-微分器输出信号相位损失影响因素分析[J]. 系统科学与数学, 2017(3): 665-673
WANG Hui, QI Xiaohui. Analysis on Affected Factors on Phase Loss of Output Signals Based on Tracking-Differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2017(3): 665-673 (in Chinese)
- [13] 唐友福, 刘树林, 雷娜, 等. 基于广义局部频率的 Duffing 系统频域特征分析[J]. 物理学报, 2012, 61(17): 504
TANG Youfu, LIU Shulin, LEI Na, et al. Feature Analysis in Frequency Domain of Duffing System Based on General Local Frequency[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(17): 504 (in Chinese)
- [14] 李旭芳, 段春林, 张冬波, 等. 遥测数据时间序列滑动窗口动态分割技术[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(4): 345-349
LI Xufang, DUAN Chunlin, ZHANG Dongbo, et al. A Dynamic Slide Windows Segmentation Technology for Telemetry Time Series[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(4): 345-349 (in Chinese)

A Sliding Window Optimal Tracking Differentiator Filtering Method for Satellite Telemetry Data

ZHANG Ke^{1,2}, JIANG Haixu^{1,2}, WANG Jingyu^{1,2}

(1.Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Xi'an 710072, China)

Abstract: The initial satellite telemetry data acquired by ground stations usually contain noise and outlier interference. In order to ensure the accurate analysis of satellite status, the telemetry data need to be filtered. In this paper, a sliding window optimal tracking differentiator filtering (SWOTDF) method for satellite telemetry data is proposed. Aiming at the problem of parameter selection during the filtering of the optimal tracking differentiator, the amplitude-frequency characteristics of the maximum tracking differentiator are analyzed by sine sweep frequency method, and the mapping relationship between tracking factors and filtering effects is established. On this basis, the telemetry data are divided by sliding windows, and the relationship between local stability of data in each window and tracking factors is further analyzed. The calculation method of local data tracking factor is given to realize dynamic optimal tracking differentiator filtering of telemetry data in each window. Experimental results show that the SWOTDF method can effectively avoid the limitations of traditional digital filters in processing nonlinear telemetry data, and can effectively filter out noise and outliers in satellite telemetry data.

Keywords: optimal tracking differentiator; sliding window; satellite telemetry data; nonstationary filtering