

文章编号:1674-8190(2018)02-191-08

基于双树复小波和形态学的卫星异常数据滤波方法

王靖宇^{1,2}, 姜海旭^{1,2}, 王霏禹^{1,2}, 张科^{1,2}, 吕梅柏^{1,2}

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

(2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: 受系统结构复杂、工作环境恶劣等因素影响, 卫星的工作状态会存在介于正常和故障之间的异常状态, 导致其遥测数据中不仅含有噪声, 还存在异常数据。采用传统滤波算法进行去噪处理时, 会存在对异常数据保留不充分的问题, 从而导致突变信息丢失。针对上述问题, 提出一种基于双树复小波与形态学滤波的卫星遥测数据组合滤波方法, 设计一种半软阈值滤波函数来提高双树复小波的滤波性能, 并提出一种组合滤波算法。通过仿真实验进行验证, 结果表明: 本文方法可以对遥测数据中的噪声进行有效滤除并对异常数据进行保留。

关键词: 双树复小波; 形态学; 遥测数据; 数据滤波; 异常数据

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.02.007

The Telemetry Data Filtering Method Based on Double Tree Complex Wavelet and Morphology

Wang Jingyu^{1,2}, Jiang Haixu^{1,2}, Wang Xianyu^{1,2}, Zhang Ke^{1,2}, Lü Meibo^{1,2}

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. National Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics, Xi'an 710072, China)

Abstract: Influenced by complex structure and poor working conditions, the working status of satellite will have abnormal state that between normal and fault, which would cause not only noise, but also abnormal data existed in the telemetry data. However, when the traditional data filtering algorithm is used to kill the noise, the abnormal data as well as the related information could be lost. Therefore, a combined filtering method of telemetry data based on double tree complex wavelet and morphological filtering is proposed. To be specific, a semi-soft threshold filter function is designed to improve the filtering performance. Thus, a combined filtering algorithm is proposed. The experimental results show that the proposed method can effectively filter the noise in the telemetry data and retain the abnormal data.

Key words: double tree complex wavelet; morphological; telemetry data; data filtering; abnormal data

0 引言

在轨卫星系统不仅结构复杂, 其工作环境也十

分恶劣, 需要地面人员对系统的状态进行密切监控, 以便随时对其状态变化做出及时修正。现阶段, 地面测控系统通常只能借助于遥测数据来监控在轨卫星的工作状态, 导致对遥测数据的质量依赖程度较高^[1-2]。

但是, 受空间复杂电磁环境和系统状态变化等因素的影响, 在轨卫星的遥测数据会存在介于正常值和故障值之间的异常值, 即异常遥测数据。异常数据表示卫星参数已偏离正常值范围, 但还未达到故障门限值, 因此异常数据一般表示在轨卫星处于

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(61174204、61101191、61502391)

航天支撑基金(N2015KC0121)

陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM6043)

通信作者: 王靖宇, jywang@nwpu.edu.cn

正常和故障之间的异常状态,是卫星发生故障的重要征兆^[3]。当遥测数据出现突变时,若能及时发现并采取有效措施,可以将卫星的故障提前甄别并消除,从而提高在轨卫星的运行效能和工作时间。故面向包含状态异常数据的卫星遥测数据滤波技术不仅是卫星故障诊断的重要组成部分,还是卫星在轨维护和健康管理系统的的核心关键技术,对维护国防安全具有至关重要的战略意义。

对于卫星、火箭等目标而言,其遥测数据中包含大量的噪声数据,因此地面测控站对其进行处理时均会采用数据滤波算法来降低噪声对原始数据的影响,从而提高遥测数据的质量以便于后续处理。例如,李旭芳等^[4]提出了一种基于矩阵奇异值分解的遥测数据滤波方法,通过将表征噪声信号的小奇异值消除,来实现对含噪声遥测数据的滤波;赵圣占等^[5]针对中值滤波、加权移动平均和奇异值滤波方法进行对比研究,提出基于分段平滑滤波的遥测数据滤波方法,提高了数据处理精度。遥测数据具有非线性和非平稳等特点,传统的时频分析方法无法描述信号的局部时频特性,因此,信号的多尺度分析方法得到了广泛关注。其中,柳振民等^[6]对不同小波基、分解层数和阈值规则与滤波效果的关系进行了研究,指出通过选择合适的小波变换可以实现对遥测数据的有效处理;师培峰等^[7]则利用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform)技术对遥测信号的去噪问题进行了研究,结果表明信号的多尺度分析方法能够有效实现去噪滤波,但其计算量较大导致在实际应用中具有一定的局限性。

由于传统 DWT 变换对信号的分解具有平移敏感性且会产生混叠效应,使其在提取信号特征时会丢失重要信息进而导致结果失真。为了克服该问题,提出了双树复小波变换(Dual-tree Complex Wavelet Transform,简称 DTCWT)^[8],且该方法已在实际工程中得到了大量应用^[9]。在数据滤波去噪方面,邱爱中等^[10]研究并设计了一种基于 DTCWT 的滤波器结构,实现了对机械信号的降噪;梁月吉等^[11]提出了一种基于 DTCWT 的变形监测数据去噪方法,采用模平方处理法得到各层阈值来重构信号,从而实现信号去噪;李丹等^[12]则提出了一种基于 DTCWT 和形态学滤波的生物电信号去噪方法。

上述研究工作表明,虽然基于 DTCWT 的数据滤波方法能够较好地实现数据去噪,但其阈值函数的性能会直接影响滤波效果,并且对于非线性和非平稳特性较强的数据而言,还需要采用多种滤波器融合的组合滤波方式来提高滤波算法性能。同时,上述研究工作主要针对不含异常数据的信号去噪问题,而对于含有异常及噪声数据的复杂信号滤波问题研究得并不深入。

本文针对卫星遥测数据的滤波问题,通过设计一种基于半软阈值滤波函数的 DTCWT 滤波器,提出一种基于 DTCWT 和形态学滤波的组合滤波方法;采用卫星某部件实际遥测数据进行仿真实验,以验证本文所提方法的有效性。

1 双树复小波变换

相较于传统的离散小波变换,双树复小波变换采用两个并行的实小波变换来实现对输入信号的分解和重构。具体而言,其滤波结构采用了二叉树形式,由被称为实部树(Real Tree)和虚部树(Imaginary Tree)的两个不同双密度小波滤波器组构成。复小波可表示为

$$h(t) = h_h(t) + ih_g(t) \quad (1)$$

根据 DTCWT 理论,其小波变换是由两个并行的小波变换组成,其中实部树与虚部树小波变换的小波系数和尺度系数分别为

$$\begin{cases} d_j^{\text{Re}}(n) = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h_h(2^j t - n) dt \\ c_j^{\text{Re}}(n) = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h_h(2^j t - n) dt \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} d_j^{\text{Im}}(n) = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h_g(2^j t - n) dt \\ c_j^{\text{Im}}(n) = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) h_g(2^j t - n) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: $j=1,2,\dots,J$ 。

根据式(2)~式(3)可以得到双树复小波变换的小波系数和尺度系数分别为

$$\begin{cases} d_j^{\text{h}}(n) = d_j^{\text{Re}}(n) + id_j^{\text{Im}}(n) \\ c_j^{\text{h}}(n) = c_j^{\text{Re}}(n) + ic_j^{\text{Im}}(n) \end{cases} \quad (4)$$

而双树复小波变换的系数则可由式(5)进行重构:

$$\begin{cases} d_j(t) = 2^{\frac{j-1}{2}} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_j^{\text{Re}}(n) h_h(2^j t - n) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_j^{\text{Im}}(n) h_g(2^j t - k) \right] \\ c_j(t) = 2^{\frac{j-1}{2}} \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_j^{\text{Re}}(n) h_g(2^j t - n) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_j^{\text{Im}}(n) h_h(2^j t - k) \right] \end{cases} \quad (5)$$

因此,对时序信号 x 进行双树复小波变换分解后的重构信号为

$$x(t) = d_j(t) + c_j(t) \quad (6)$$

由 DTCWT 理论可知,进行 DTCWT 第一层分解时,其实部树和虚部树的延迟恰好为一个采样间隔,使得虚部树数据恰好为实部树丢失的数据,从而解决了平移敏感性问题。同时,DTCWT 具有良好的抗混叠效应,能够在分解不同层次信号的频率时防止包含其他频率分量,使其对高频噪声的滤波效果更好。为了说明 DTCWT 变换能够较好地克服传统 DWT 变换平移敏感性的优势,以一组时延相同阶跃信号组成的二维信号为例,通过采用传统 DWT 变换和 DTCWT 变换进行分解,输入信号和相关分解信号如图 1 所示,d1~d4 为对应的高频分量,a4 为低频分量。

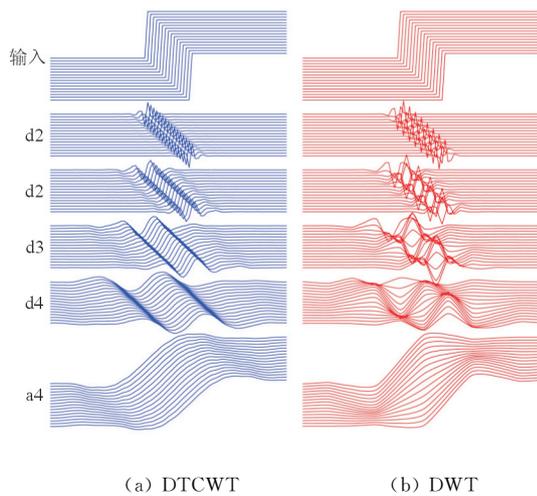


图 1 两种变换的平移性对比

Fig. 1 Translational property comparison of two transform

从图 1 可以看出:在对原始输入信号进行四层分解重构的过程中,采用 DTCWT 变换进行分解重构后,各子带信号与原信号保持了相同的延迟,并且各分量的频率特征较为明显,表明 DTCWT 变换比传统 DWT 变换能够更好地抑制频率混叠现象,具有更好的性能。

2 卫星遥测数据滤波方法

当卫星在其轨道运行时,地面遥测站会获取大量的跟踪测量数据和传感器遥测数据。一般而言,按照采样时间间隔,可将其描述成随时间变化的动态测量时间序列。受复杂空间环境和在轨工作状态的影响,卫星遥测数据包含不同种类的数据信息,以全面描述卫星的在轨实际工作状态。其中,非故障类遥测数据主要包含有效数据、异常数据以及噪声数据。因此,卫星遥测数据一般可表示为

$$x = s + n_0 + n_d \quad (7)$$

式中: x 为遥测数据; s 为正常有效数据; n_0 为噪声数据; n_d 为异常数据。

在实际工程应用中,对卫星遥测数据进行滤波处理时常要求,在对噪声数据进行有效滤除的同时,对遥测数据中的异常部分尽可能地保留,即采用数据滤波算法将信号 x 中的 n_0 分量过滤但保留 n_d 分量。

2.1 双树复小波半软阈值滤波器设计

当采用双树复小波将数据 x 进行分解时,其一般分解过程可以假设为

$$y = \omega + n + d \quad (8)$$

式中: y 为分解 x 得到的小波系数; ω 为 s 的小波系数; n 为 n_0 的小波系数; d 为 n_d 的小波系数。

根据小波阈值滤波理论,若想滤除高频噪声,需要首先确定滤波阈值,目前一般采用全局非线性小波阈值,其公式为

$$th = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (9)$$

式中: σ 为噪声标准差; N 为数据长度; th 为阈值,可在高斯模型下针对多维独立正态变量联合分布得出。

由于 σ 值未知,在滤波前需要对原始数据进行分析,本文采用文献[13]中提出的计算方法,即用各尺度细节小波系数绝对值的中值进行噪声方差

估计来得到 σ , 其计算公式为

$$\sigma = \frac{\text{median}(\omega_{j,k})}{0.6745} \quad (10)$$

式中: $\omega_{j,k}$ 为利用小波分解得到的各尺度的小波系数, 其中, j 表示小波分解层数, k 表示各小波基的系数。

式(10)表示对于各尺度而言阈值均为定值, 而在低频系数中会存在滤除过多数据的情况, 从而导致有用数据丢失。针对此问题, 本文采用陈晓曦等^[14]提出的尺度调节系数对阈值进行修正, 其计算公式为

$$th_j = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln(N/2^j)} \quad (11)$$

利用式(11)计算得到的阈值, 可以对各尺度小波系数采用相应的阈值函数进行滤波处理。显然,

$$T_j = \begin{cases} 0 & (|x_{j,k}| < th_j) \\ \text{sign}(x_{j,k}) [|x_{j,k}| - th_j \cdot E(x_{j,k})] & (|x_{j,k}| \geq th_j) \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$E(x_{j,k}) = \frac{\alpha_j e^{-(x_{j,k} - th_j)}}{1 + e^{-(x_{j,k} - th_j)}} \quad (13)$$

式中: x_j 为输入值; j 为 DTCWT 分解尺度; sign 为取符号函数; α_j 为半软阈值滤波函数的阈值调节系数, 其取值越大则式(12)越接近于硬阈值滤波, 即适合于处理噪声数据, 相应地, α_j 取值越小

阈值函数的选取是决定 DTCWT 变换滤波效果的关键因素之一, 会影响重构信号的连续性和精度。

目前, 现有研究工作所采用的阈值函数主要包括硬阈值和软阈值两种。其中, 硬阈值函数能够去除明显噪声, 但去噪后信号存在不连续性问题; 而软阈值函数虽然保证了信号的连续性, 但其高阶导数存在不连续问题, 使原系数和小波分解系数存在恒定的偏差。因此, 硬阈值函数和软阈值函数单独使用时都存在局限性, 并不适用于对卫星异常遥测数据的滤波处理。针对上述问题, 本文提出一种半软阈值滤波函数, 在有效去除噪声数据的同时充分保留异常数据, 提高对卫星遥测数据进行滤波时的性能, 其具体公式为

则越接近于软阈值滤波, 此时, 式(12)所表示的滤波函数会对临界区的小波系数进行保留, 从而保留原有数据中的奇异数据。可以看出, 补偿系数的大小与分解尺度的频率成反比。

将式(11)带入式(12), 可以得到半软阈值滤波公式:

$$T_j = \begin{cases} 0 & (|x_{j,i}| < th_j) \\ \text{sign}(x_{j,i}) [|x_{j,i}| - \sigma \sqrt{2 \cdot \ln(N/2^j)} \cdot E(x_{j,i})] & (|x_{j,i}| \geq th_j) \end{cases} \quad (14)$$

虽然本文所提出的半软阈值滤波函数能够降低滤波算法在幅值变化较大时的突变点处所产生的吉布斯(Gibbs)效应, 并且对中高频率噪声的滤波效果较好。但受阈值滤波原理的限制, 无法完全避免在数据突变点处的信息损失。因此, 需要采用其他滤波方法来实现对数据突变点处信息的保留。

2.2 基于形态学的卫星遥测数据滤波

形态学滤波是基于形态学运算的非线性滤波方法, 其主要作用是在保留原数据形态的同时对数据中所含有的噪声进行有效消除。形态学滤波的

核心是根据滤波需求选择形态结构元素, 通过在数据全局内进行形态运算, 实现对原数据的滤波。

由于 DTCWT 变换过程中不可避免地会存在吉布斯效应, 导致与异常数据相关的有效信息缺失。本文采用一种基于形态学的卫星遥测数据滤波方法^[15], 在充分保留异常数据的同时对卫星遥测数据进行滤波。

假设有初始遥测数据 X , 采用形态学滤波时要根据需保持的数据形状选择结构元素, 并确定结构元素参数。之后, 再选择并确定形态滤波算法。本文采用以腐蚀运算和膨胀运算为基本运算的形态

滤波,腐蚀运算 \ominus 公式为

$$X \ominus B = \{x_i : B + x_i \subset X\} \quad (15)$$

式中: X 为输入数据; x_i 为数据值; B 为结构元素。

利用 B 在 X 上滑动时,对每个位置的 x_i 而言,当 $B \subseteq X$ 时, B 与 X 最大相关;而当 $B \subseteq X^c$ 时, B 与 X 无关;当 $B[x] \cap X$ 与 $B[x] \cap X^c$ 均不为空时, B 与 X 部分相关。由于膨胀运算为腐蚀运算的逆运算,则膨胀运算 \oplus 的公式为

$$X \oplus B = [X^c \ominus (-B)]^c \quad (16)$$

此外,为了实现对卫星遥测数据进行滤波的同时充分保留异常数据特征。本文在经典形态学运算的基础上,提出采用一种基于开-闭(OC)复合形态运算的滤波算法来进行数据滤波处理,其公式为

$$OC(X) = (X \circ B) \bullet B \quad (17)$$

式中:“ \circ ”和“ \bullet ”分别表示开运算和闭运算。

虽然形态学滤波方法能够避免吉布斯效应,有效保留突变点处的数据信息,但其一般为全局滤波,且会受到结构元素及其参数的影响。当结构参数选择过大,可能会对数据“过处理”,从而造成数据细节丢失;而当结构参数过小时,又可能对非线性特性较强的卫星遥测数据滤波效果下降,导致滤波后信号的信噪比降低。因此,为了在实现对噪声信号进行滤波的同时,充分保留异常数据,需要研究将 DTCWT 变换滤波方法与形态滤波方法的优点相结合的卫星遥测数据滤波方法。

2.3 基于 DTCWT 与形态学的组合滤波方法

虽然 DTCWT 滤波算法能够有效抑制数据中的高频噪声从而得到平滑滤波结果,但会使数据中与异常状态相关的突变点附近数据发生失真,使突变点出现吉布斯效应。形态学滤波方法虽然对于遥测数据的高频噪声而言为非最优滤波,但其能够保存突变点处的数据特性,并能够对异常段数据进行有效滤波。因此,通过将两种方法进行有效融合,提出一种基于 DTCWT 和形态学滤波的卫星遥测数据组合滤波方法。

若对卫星遥测数据分别采用 DTCWT 和形态学运算进行滤波,假设利用半软阈值滤波函数实现的 DTCWT 滤波结果为 $XD_i (i=1,2,\dots,N)$,而基

于形态学滤波的结果为 $XS_i (i=1,2,\dots,N)$ 。为了有效保留突变点处的数据信息,设计一种基于单滤波器结果的组合滤波策略,其流程如图 2 所示。

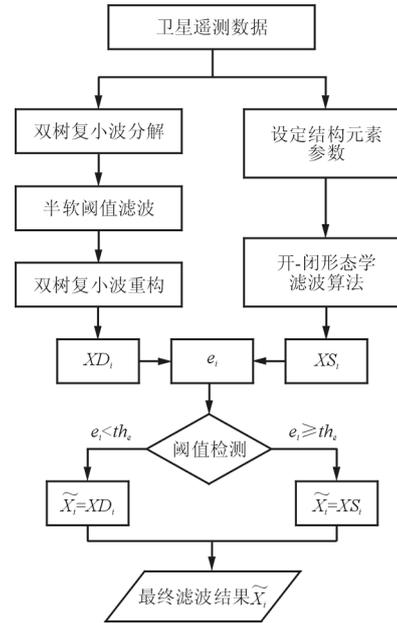


图 2 本文提出的组合滤波方法

Fig. 2 The proposed combination filtering method

本文方法在突变点处采用形态学滤波结果,而在其他位置上则采用 DTCWT 滤波结果。首先,需要计算两种滤波结果的差值:

$$e_i = |XD_i - XS_i| (i=1,2,\dots,N) \quad (18)$$

考虑到地面站获取不同时段的遥测数据形态特征和噪声特性存在一定差异,因此计算 e_i 的均方差^[16],并将其作为滤波结果选择的阈值 th_e :

$$th_e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2} \quad (19)$$

根据滤波结果选择阈值,对数据滤波结果进行融合的规则为:将 e_i 中小于阈值 th_e 的数据点采用双树复小波滤波结果 XD_i ;将 e_i 中大于阈值 th_e 的数据点采用形态滤波结果 XS_i ,对得到的滤波结果进行综合得到最终滤波数据 \tilde{X} ,具体公式为

$$\begin{cases} \tilde{X}_i = XD_i, & (e_i < th_e) \\ \tilde{X}_i = XS_i, & (e_i \geq th_e) \end{cases} \quad (20)$$

3 仿真验证与分析

为了验证本文提出的滤波方法的有效性,利用卫星某部件温度参数的遥测数据进行仿真实验

证。分别采用 db4 小波、DTCWT、形态学和本文方法进行滤波,并通过对滤波结果计算滤波后的信噪比(Signal Noise Ratio,简称 SNR)和均方差(Root Mean Square,简称 RMS),来比较四种方法的滤波效果。所采用的卫星某部件温度参数的实测数据如图 3 所示,其时间长度为 1 000 s,采样频率为 1,且数据中含有噪声。

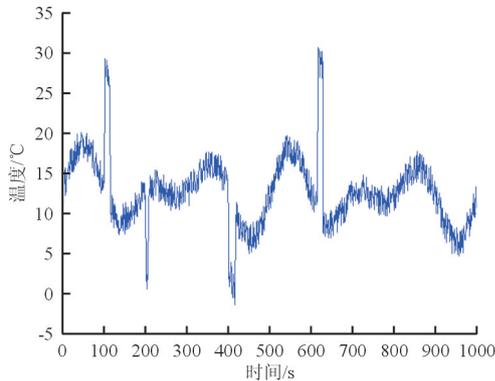


图 3 原始温度数据波形

Fig. 3 Waveform of original temperature data

从图 3 可以看出:原始数据在横坐标 100、200、400、620 附近存在较大异常,且其幅值异常程度较大。

利用传统 db4 小波所得到的滤波结果如图 4 所示,可以看出:原始信号中的噪声已基本被剔除,但在突变点附近存在较为明显的吉布斯效应。

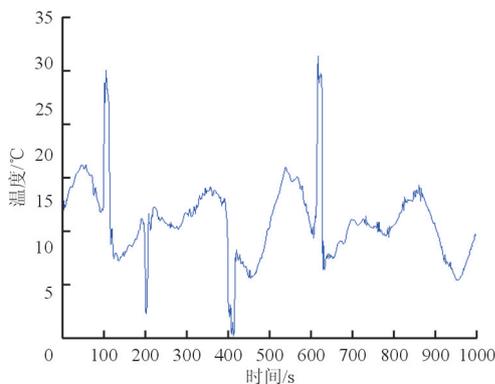


图 4 db4 小波的滤波结果

Fig. 4 Filtering result of db4 wavelet

基于半软阈值滤波函数的 DTCWT 滤波结果如图 5 所示,可以看出:和原始信号相比,基于半软阈值滤波函数的 DTCWT 对高频噪声的滤波效果较好,并且降低了突变点附近的吉布斯效应。

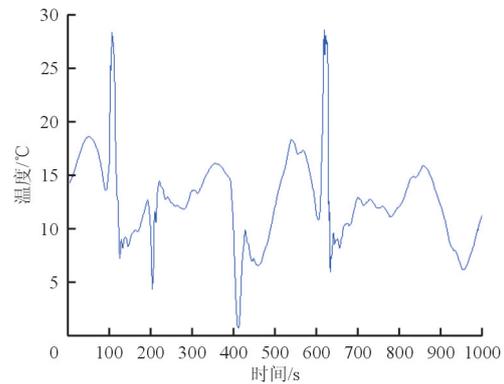


图 5 半软阈值 DTCWT 的滤波结果

Fig. 5 Filtering result of semi-soft threshold DTCWT

采用形态学滤波方法的滤波结果如图 6 所示,可以看出:形态学滤波方法的结果在突变点附近没有发生吉布斯效应,因此能够有效地保留突变点处的时序信息,有利于后续对异常数据的深入分析。然而,与图 4~图 5 的滤波结果相比,其对高频噪声的抑制效果一般。

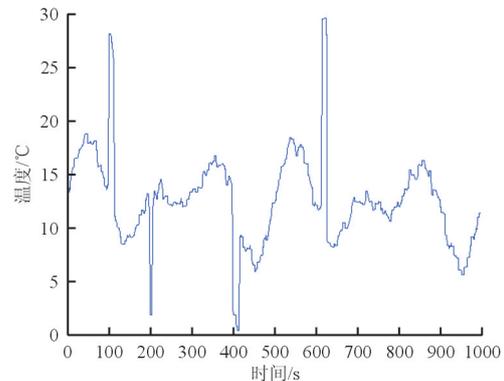


图 6 形态学滤波的结果

Fig. 6 Result of morphological filtering

本文方法的滤波结果如图 7 所示,可以看出:相较于 db4 小波滤波结果和基于半软阈值滤波函数的 DTCWT 滤波结果,本文方法可以在对异常数据进行保留的同时,实现对异常数据处噪声的滤波,且滤波结果在突变点附近也不存在较为明显的吉布斯效应;本文方法对原始数据序列中大于给定 th_e 阈值的数据点进行了保留,因此原始数据中与异常程度较大数据相关的时序信息均得以充分保留;相较于形态学滤波较为平滑的结果,本文方法的滤波结果在突变点附近存在多个不光滑数据段,从而可以提取其时序用于后续对分析。

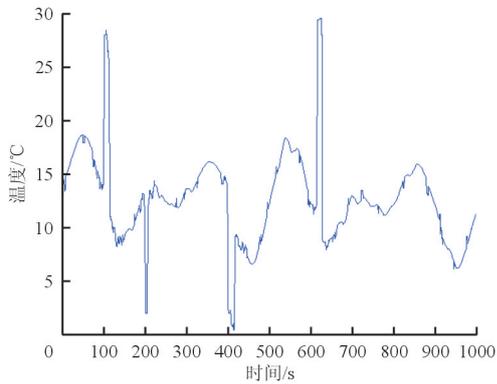


图 7 本文方法的滤波结果

Fig. 7 Filtering result of proposed method

为了充分比较本文算法与其他数据滤波算法的性能,对比所使用的四种滤波算法的信噪比和均方差指标,如表 1 所示。

表 1 四种滤波算法的性能指标对比
Table 1 The index comparison of four applied filtering methods

方法	信噪比(SNR)	均方差(RMS)
db4 小波滤波	11.12	1.10
双树复小波滤波	11.50	1.09
形态学滤波	16.55	0.90
本文方法	16.43	0.95

从表 1 可以看出:本文方法和形态学滤波方法的信噪比和均方差均优于传统的 db4 小波滤波方法和双树复小波滤波方法;而与形态学滤波方法相比,本文所提出的数据滤波方法能够在有效保留异常数据细节信息且充分去噪的同时,获得接近于形态学滤波方法的信噪比和均方差指标,表明本文方法的有效性。

此外,为了验证本文算法对卫星其他部件参数处理的有效性,以及对异常不明显数据或噪声数据与异常数据数值变化十分接近的数据的适用性,采用卫星某部件电源电压参数的遥测数据进行仿真实验,其原始数据如图 8 所示。采用 db4 小波滤波、形态学滤波和本文方法分别进行滤波,其仿真结果如图 9 所示,可以看出:利用形态学滤波方法可以在突变点附近抑制吉布斯效应,使滤波结果较为平缓,但对高频噪声的抑制效果要弱于另外两种方法;采用 db4 小波进行滤波时,虽然对噪声抑制性能较好,但在突变点处仍存在一定的吉布斯效应;而采用本文方法滤波时,不仅可以对异常数据进行保留,还能够在抑制吉布斯效应的同时实现对噪声的有效滤波。

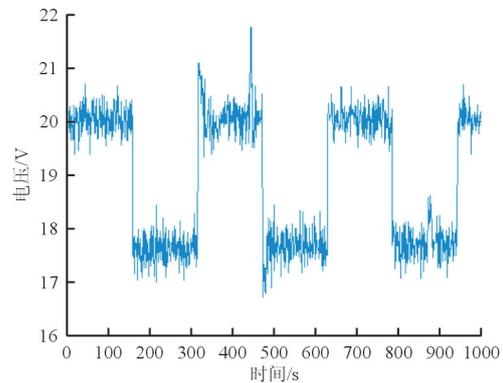


图 8 原始电压数据波形

Fig. 8 Waveform of original voltage data

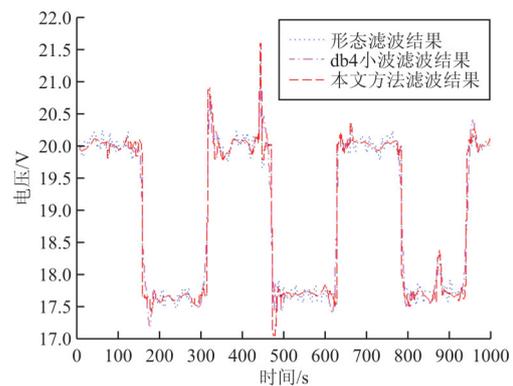


图 9 三种滤波方法的仿真结果

Fig. 9 Filtering results of three applied methods

此外,对该参数数据分别采用 db4 小波滤波、形态学滤波和本文方法进行滤波,并通过滤波结果计算滤波后的信噪比和均方差,来充分比较三种方法的滤波效果,如表 2 所示。

表 2 三种滤波算法的性能指标对比
Table 2 The index comparison of three applied filtering methods

方法	信噪比(SNR)	均方差(RMS)
db4 小波滤波	15.03	1.01
形态学滤波	15.78	1.02
本文方法	16.26	0.98

从表 2 可以看出:对于更为复杂的遥测参数,本文方法在信噪比和均方差这两个指标上仍优于传统的 db4 小波滤波方法;而与形态学滤波方法相比,本文方法能在有效保留异常数据细节信息且充分去噪的同时,获得接近于形态学滤波方法的信噪比和均方差,进一步显示了本文方法的有效性。

4 结 论

为了有效处理含有异变信息的卫星遥测数据,

本文在设计基于半软阈值滤波函数的改进滤波器基础上,提出一种基于 DTCWT 和形态学滤波融合的组合滤波方法。通过采用卫星某部件温度和电压参数的遥测数据进行仿真实验,表明本文提出的数据滤波方法能够对噪声进行滤除,有效抑制突变点处的吉布斯效应,并充分保留异常数据特征。

参考文献

- [1] 马凯航,高永明,李磊,等.基于遥测数据的在轨卫星性能预测方法研究[J].现代电子技术,2017,40(21):1-5,9.
Ma Kaihang, Gao Yongming, Li Lei, et al. Study on performance prediction method of satellite in orbit based on telemetry data[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(21): 1-5,9. (in Chinese)
- [2] 樊文平,卢建新.运载火箭遥测数据天基中继技术研究[J].无线电工程,2017,47(8):36-39.
Fan Wenping, Lu Jianxin. Research on space-based telemetry data transmission technology for launch vehicle[J]. Radio Engineering, 2017, 47(8): 36-39. (in Chinese)
- [3] 柯俊培.基于相似度匹配的卫星在轨状态异变分类和识别算法[D].成都:电子科技大学,2016.
Ke Junpei. The classification and recognition algorithm of satellite variation-status based on similarity matching[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 李旭芳,苟茹君,段春林,等.遥测实测信号的奇异值滤波[J].弹箭与制导学报,2016,36(5):166-168.
Li Xufang, Gou Rujun, Duan Chunlin, et al. Research on singular value filtering method of telemetry signal[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(5): 166-168. (in Chinese)
- [5] 赵圣占,谷阳阳.靶场遥测数据滤波方法分析研究[J].强度与环境,2015,42(6):52-57.
Zhao Shengzhan, Gu Yangyang. The analysis and research of the filter methods of the telemetry data range[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(6): 52-57. (in Chinese)
- [6] 柳振民,彭宗尧,郭力闻.小波变换在火箭遥测数据误码剔除中的应用[J].兵器装备工程学报,2017,38(5):94-98.
Liu Zhenmin, Peng Zongyao, Gu Liwen. Application of wavelet transform in eliminating error of rocket telemetry data[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(5): 94-98. (in Chinese)
- [7] 师培峰,邱伟,吴瑞斌,等.HHT在遥测信号处理中的应用[J].遥测遥控,2015,36(4):25-30,50.
Shi Peifeng, Qiu Wei, Wu Ruibin, et al. Application of HHT in telemetry signal processing[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(4): 25-30,50. (in Chinese)
- [8] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N C. The dual-tree complex wavelet transform[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(6): 123-151.
- [9] Fahmy G, Fahmy M F, Fahmy O M. Micro-movement magnification in video signals using complex wavelet analysis[J]. IET Image Processing, 2017, 11(11): 986-993.
- [10] 邱爱中,张海泉,崔晓,等.双树复小波滤波器构造及其在机械故障诊断中的应用[J].机械科学与技术,2017,36(4):542-546.
Qiu Aizhong, Zhang Haiquan, Cui Xiao, et al. Design method of DT-CWT and its application in mechanical fault diagnosis[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(4): 542-546. (in Chinese)
- [11] 梁月吉,任超,庞光锋,等.结合模平方的双树复小波变形监测数据滤波[J].测绘科学,2016,41(6):23-27.
Liang Yueji, Ren Chao, Pang Guangfeng, et al. A dual-tree complex wavelet transform method based on modulus square for deformation analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(6): 23-27. (in Chinese)
- [12] 李丹,柏桐,庞宇,等.基于双树复小波变换和形态滤波的PPG信号去噪方法[J].生命科学仪器,2016,14(Z2):54-56.
Li Dan, Bai Tong, Pang Yu, et al. A hybrid denoising method for PPG signal based on dual tree complex wavelet transform and morphological filtering[J]. Life Science Instruments, 2016, 14(Z2): 54-56. (in Chinese)
- [13] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding[M]. IEEE Press, 1995.
- [14] 陈晓曦,王延杰,刘恋.小波阈值去噪法的深入研究[J].激光与红外,2012,42(1):105-110.
Chen Xiaoxi, Wang Yanjie, Liu Lian. Deep study on wavelet threshold method for image noise removing[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 105-110. (in Chinese)
- [15] 王广成,王巾盈,孙喜.数学形态学在遥测数据处理中的应用研究[J].飞行器测控学报,2009,28(1):33-37.
Wang Guangcheng, Wang Jinying, Sun Xi. Application of mathematical morphology in telemetry data processing[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2009, 28(1): 33-37. (in Chinese)
- [16] 原少斌.回归分析中异常值诊断方法的比较研究[D].兰州:兰州商学院,2014.
Yuan Shaobin. A Comparative Study of Outliers Detection Methods in Regression Analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Finance and Economics, 2014. (in Chinese)

作者简介:

王靖宇(1985—),男,博士,讲师。主要研究方向:数字信号处理,数据挖掘与分析。

姜海旭(1984—),男,博士研究生。主要研究方向:数字信号处理,数据挖掘与分析。

王霞禹(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:数字信号处理,数据挖掘与分析。

张科(1968—),男,博士,教授。主要研究方向:数字信号处理,数据挖掘与分析。

吕梅柏(1982—),男,博士,副教授。主要研究方向:数字信号处理,数据挖掘与分析。

(编辑:马文静)