

# 基于变分模态分解的GNSS坐标时序降噪方法

王超, 毛龙栋, 樊院平, 秦荷

湖北省水文地质工程地质勘察院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年11月24日; 录用日期: 2024年1月11日; 发布日期: 2024年1月19日

## 摘要

针对GNSS基准站位置时间序列中叠加复杂噪声, 且很难将其有效剥离, 本文尝试用变分模态分解(VMD)对某地区GNSS基准站时间序列做去噪处理。首先, 通过搜寻变分模态的最优解, 得到若干模态分量。其次, 剔除模态分量中的高频信号, 进行模态函数的叠加与重构, 得到去噪后的站点时间序列。最后, 用均方根误差(RMSE)指标评价去噪效果。结果表明, 变分模态分解(VMD)能有效地分离序列中的噪声信号, 削弱其对GNSS基准站时间序列的影响, 降低非构造信息的影响。为分析预报人员提供可靠、高精度的地壳运动信息, 更好地为地震预报服务。

## 关键词

变分模态分解, GNSS时间序列, 噪声

# GNSS Coordinate Time Series Denoising Method Based on Variational Mode Decomposition

Chao Wang, Longdong Mao, Yuanping Fan, He Qin

Hubei Hydrogeological Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In view of superimposed complex noise in GNSS reference station position time series and it is difficult to effectively peel it off, this paper attempts to use Variational Mode Decomposition (VMD) to denoise the time series of GNSS reference stations in a certain region. First, we search for the optimal solution of variational modes and get a series of mode components. Second, we eliminate the high-frequency signal in mode components, the superposition and reconstruction of mode functions are carried out, and get the time series after denoising. Finally, the Root Mean Squared Error (RMSE)

index is used to evaluate the denoising effect. The results show that the Variational Mode Decomposition (VMD) could effectively separate noise signals from series, weaken its influence on the GNSS reference station time series and reduce the impact of nonstructural information. It can provide reliable and high-precision crustal movement information for analysis and prediction personnel, and better serve earthquake prediction.

## Keywords

Variational Mode Decomposition, GNSS Time Series, Noise

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 以全球导航卫星系统为主的空间定位技术的出现, 给传统大地测量带来了革命性变化, 并逐步取代其成为大地测量与导航定位快速发展的主要推动力。全球导航卫星系统给出的高精度、大范围 and 准实时的地壳运动观测结果, 使得多种空间尺度、多种时间分辨率和宽频率域的现今地壳运动观测成为可能[1]。“十一五”期间建成的中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”), 基准站均配备高精度大地型接收机(Trimble NetR9)和扼流圈天线(Trimble Choke Ring 天线), 单日解水平精度优于 3 mm, 垂直精度优于 6 mm [1]。陆态网络的建立, 实现了对我国大陆二级活动块体和主要活动断层的全面涵盖, 为掌握我国大陆地壳运动细节特征提供了基本数据。针对噪声对站点时间的干扰处理方法有两类, 一类是采用极大似然估计噪声对形变时间的干扰, 另一类是采用数学模型达到降噪效果。文献[2]中利用变分模态分解将原始监测序列分解为若干个不同频率的模态函数, 再将样本熵大于设定阈值的高频作为噪声成分剔除, 最后重构余下的获得降噪序列; 文献[3]将改进的变分模态分解算法用于构建变形特征提取及分析新方法, 利用样本熵、中心频率比及相关系数确定变分模态分解的  $k$  值建立改进的变分模态分解算法, 并应用于仿真信号、桥梁变形特征提取及分析, 得到了较为理想的效果。

本文采用由 Dragomiretskiy 提出的新型自适应复杂信号方法——变分模态分解(VMD)进行去噪的研究, 这种方法的基础变分模态理论, 要求对各个模态的估计宽度之和很小, 其中假设各个“模态”都有不同中心频率的有限宽带, 采用交替方向乘子方法, 通过不断更新各个模态和中心频率, 逐步地把各个模态解调至对应的中心频率, 最后各个模态也即对应的中心频谱被共同抽取出来。该方法已在医学、金融等多个领域得到应用并获得较好的结果。本文将变分模态分解(VMD)算法为核心, 以某地(SXTY)连续 GNSS 基准站产出的 N、E、U 三个方向的时间序列为例, 剔除某地陆态网络 GNSS 站点坐标时间序列中的噪声, 验证该方法能否应用于陆态网络 GNSS 站点坐标时间序列去噪工作中, 有效降低非构造信息的影响。为分析预报人员提供可靠、高精度毫米地壳运动相关信息, 更好地为地震预报服务。

## 2. VMD 去噪方法的构建与检验

变分模态分解(VMD)的分解过程即变分问题的求解过程, 对站点位置时间序列进行分解得到  $k$  个频率的模态分量  $\{\mu_k\}$ , 具体数学模型如下:

$$X' = \mu_0 + \mu_n + \mu_{n+1} + \dots + \mu_k \quad (1)$$

使用变分模态分解(VMD)方法去噪, 就是从  $k$  个模态分量中剔除高频噪声的成分后, 对其余模态分

量再加以重构。因此, 变分模态分解(VMD)去噪就是从  $k$  个模态分量中除去高频噪声的信号。文献分析结果指出, 所有高斯白噪声信号的模态分量的能量密度与预期平均速度的乘积都是一个常数。所以, 可以用作变分模态分解(VMD)去噪的白噪声模态分量判定标准[4]。

以上原理作为变分模态分解(VMD)去噪的噪声模态分量判定标准, 变分模态分解(VMD)的第  $n$  个模态分量  $\mu_n$  的能量密度( $E_n$ )与其平均周期( $\bar{T}$ )的乘积为:

$$ET_N = E_N \times \bar{T} \quad (2)$$

其中,

$$E = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\mu_n(j)]^2 \quad (3)$$

$$\bar{T} = \frac{2N}{\text{Count}(\text{Optima}_n)}$$

式中,  $\text{Count}(\text{Optima}_n)$  为第  $n$  个模态分量  $\mu_n$  的极值点总数;  $N$  为分量的数据长度。当  $ET_n$  发生突变, 即前  $n-1$  个分量为噪声分量,  $n$  到  $k$  的分量为有用信息的模态分量, 采用适当的阈值去噪法进行去噪, 最终得到去除噪声的站点位置时间序列[5]。

上述变分模态分解(VMD)基本原理得出去噪的核实是分量  $k$  值的设定,  $k$  值直接影响变分模态分解(VMD)的去噪效果, 因此需要确定  $k$  个模态分量。首先, 通过文献查找, 学者研究表明,  $k$  值取 8 到 9, 本文将  $k$  值设置为 9, 得到 9 个本征模态分量。其次, 某省 GNSS 基准站位置时间序列的噪声模型为  $WN + FN$ , 因此将高频模态分量归入噪声层。最后, 除高频信号的模态分量进行重构, 得到剔除噪声的时间序列[6]。

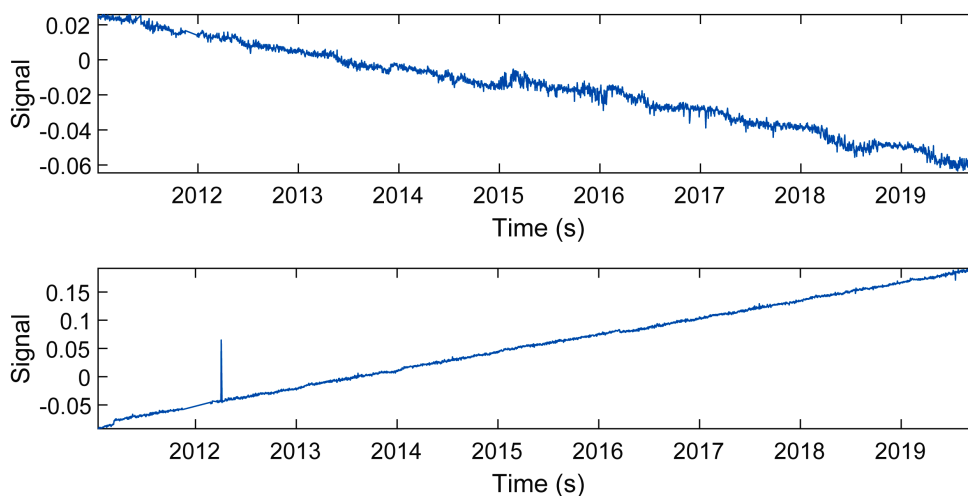
### 3. 算例实验分析

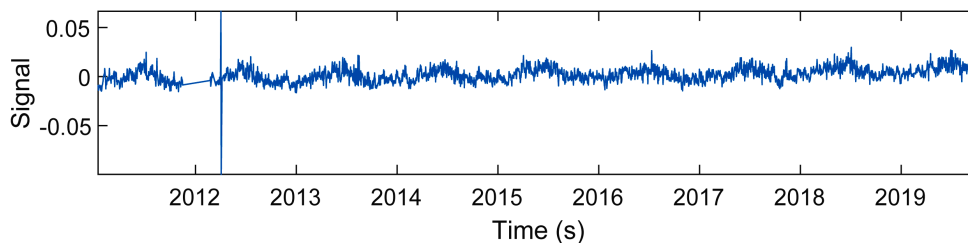
以某地 GNSS 连续基准站位置时间序列为例, 使用变分模态分解(VMD)对其噪声分析。数据由中国地震台网中心地球物理台网 GNSS 数据产品发布平台提供, 根据站点事件, 进行粗差剔除。

#### 算例分析

用上述方法对某地 GNSS 连续基准站位置时间序列的 N、E、U 方向做去噪处理, 以某地(SXTY)站为例说明该方法的降噪效果。SXTY 站点坐标序列如图 1 所示。

由图 1 可知, U 方向具有明显的周期性, 且存在一个非线性的趋势, 而 N、E 方向则以明显的线性运动为主。

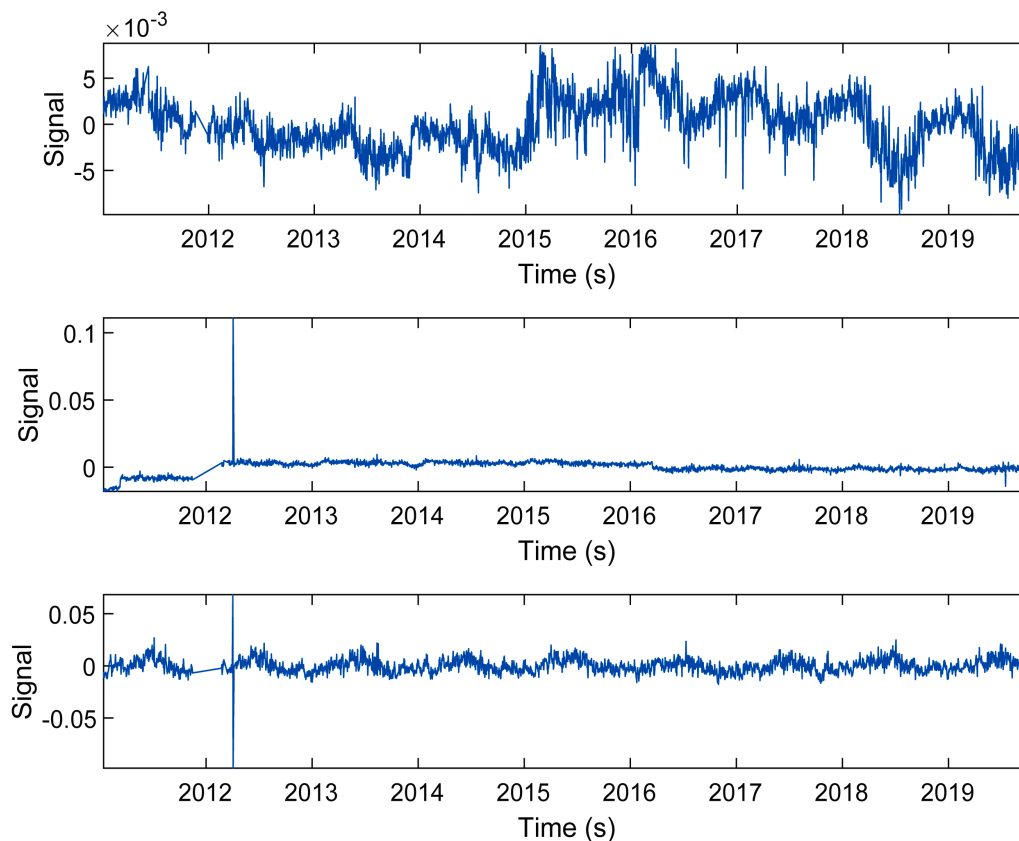




**Figure 1.** Time series of SXTY station

**图 1.** SXTY 站时间序列

图 2 为 SXTY 的 N、E、U 三个方向区属的时间序列，可以看出，去趋势后，三个方向表现出明显周期性变化，U 方向周期性变化较 N、E 两个方向更为明显。其他站点的时间序列去趋势后的结论与 SXTY 站的相同，说明周期性变化不仅存在于垂直 U 方向，水位 N、E 方向也有体现，但其线性运动在视觉上掩盖了周期性变化。



**Figure 2.** Diminuer trend time series of SXTY station

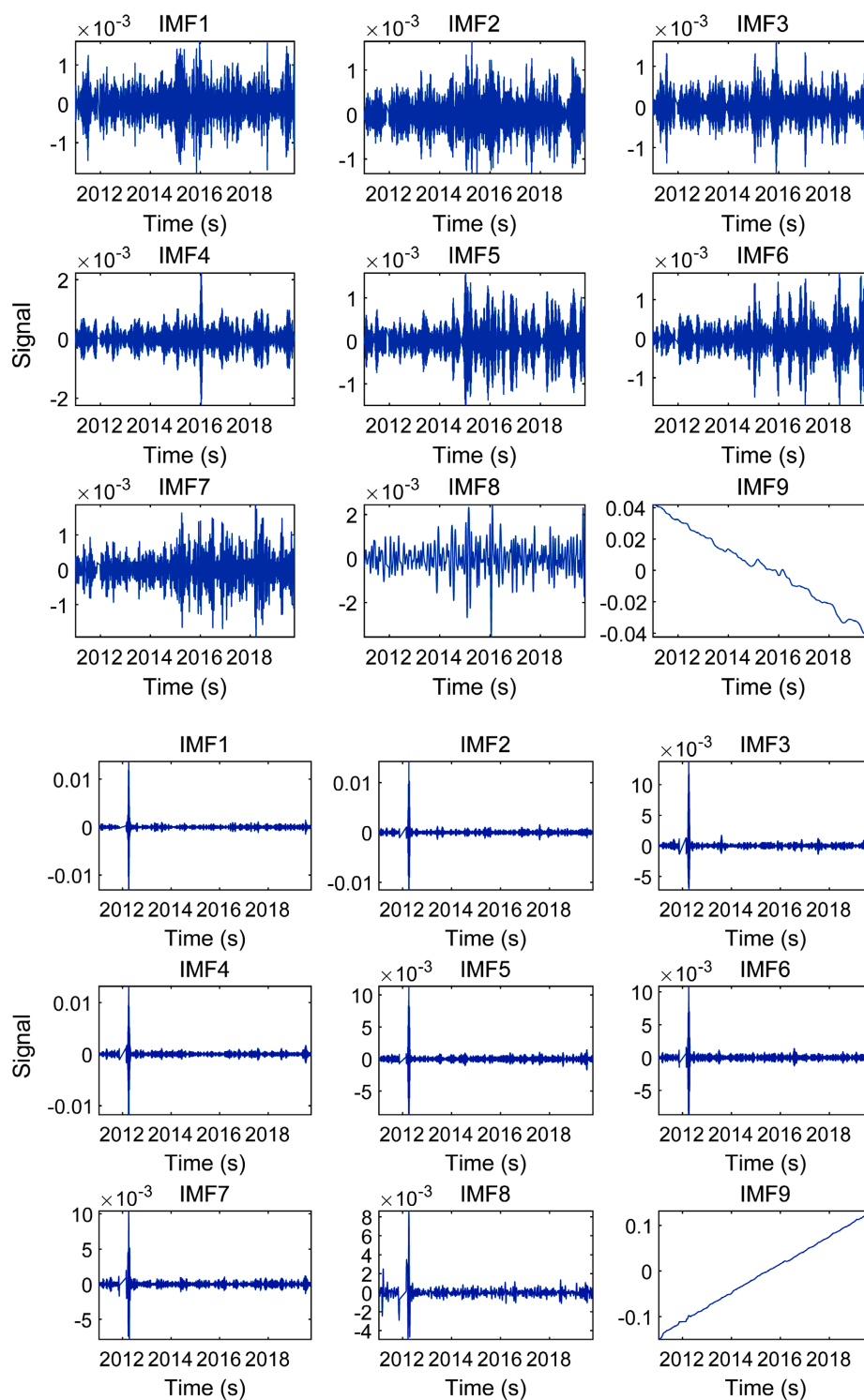
**图 2.** SXTY 站去趋势时间序列

用变分模态分解(VMD)对去趋势的时间序列进行模态分解，得到 9 个模态分量。图 3 显示，在 9 个模态分量中，第 1、2 的模态分量以高频信号为主，该两个分量为噪声信号，即对 3 到 9 的模态分量进行重构。图 4 为去噪前后坐标序列对比图。

根据所得结论，对 N、E、U 三个方向序列进行重构，发现去除噪声的时间序列更明显看出各分量周期性变化。水平方向振幅为 3~5 mm，U 方向振幅在 6~11 mm，去噪后的时间序列更能反映出序列本身的

运动特性。

分别对原始序列和去噪序列进行均方差, 如表 1 所示, 发现 N、E、U 三个均方差接近于 0, 且分量最小, 说明该分量去噪效果更好, 证明变分模态分解(VMD)能去除噪音成分, 保留时间序列真实信息, 为监测预报人员服务。



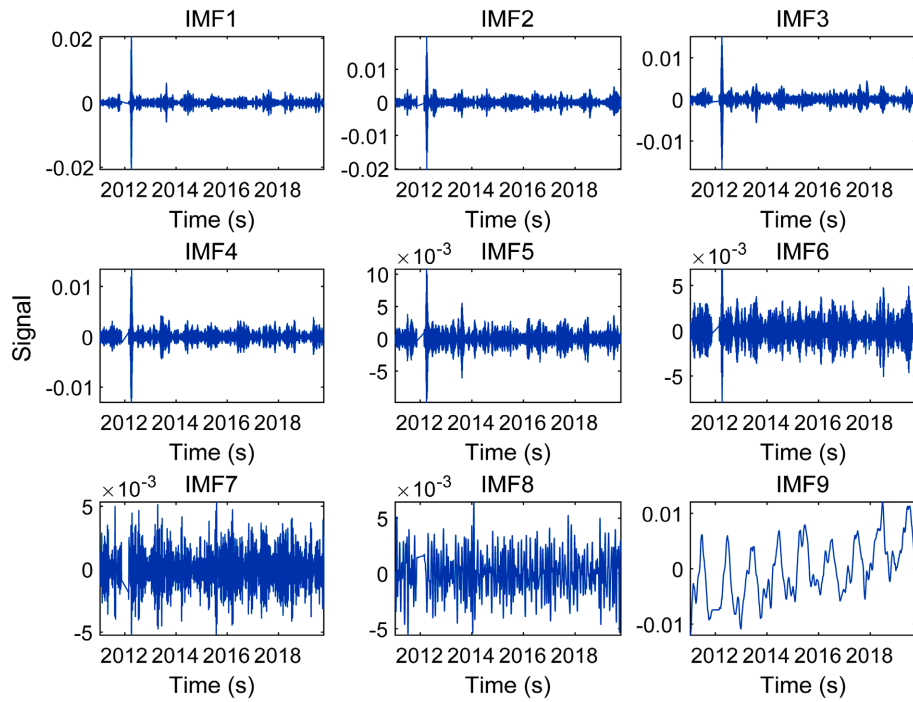


Figure 3. Results of mode decomposition  
图 3. 模态分解结果

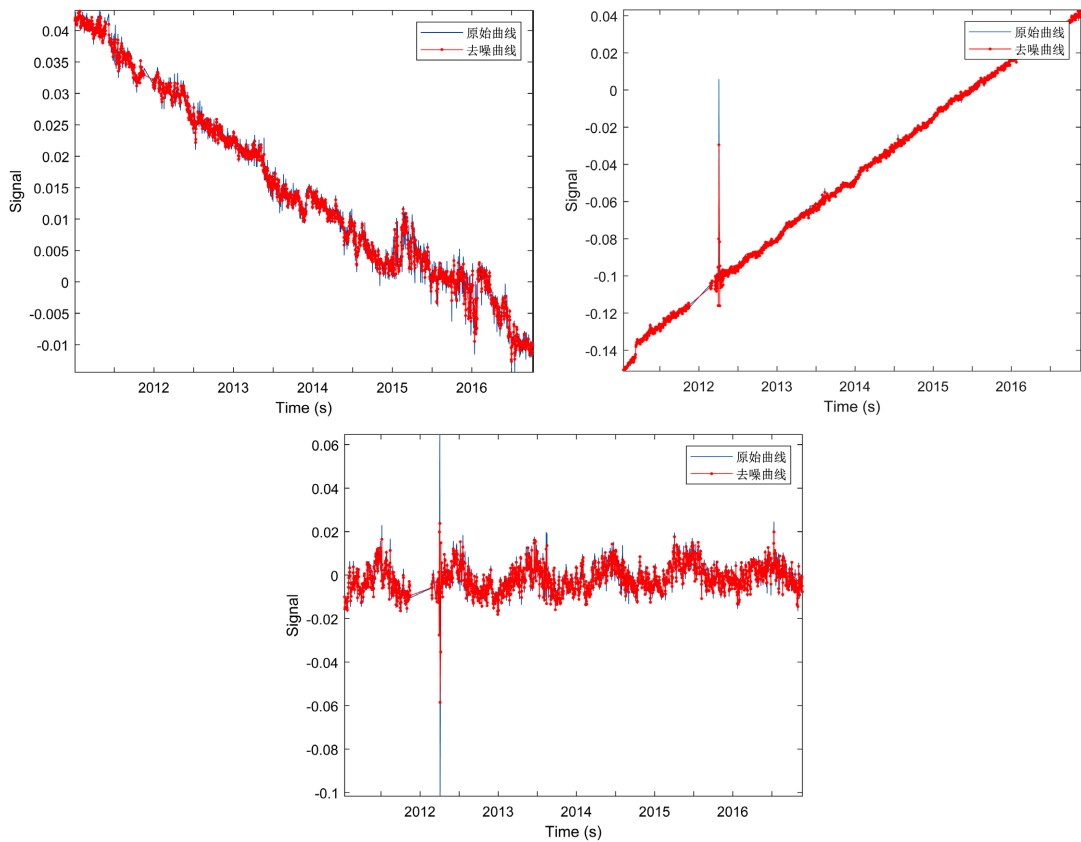


Figure 4. Removing noise sequence and original time sequence  
图 4. 去除噪声序列与原始时间序列

**Table 1.** Root Mean Square Error (RMSE) calculation results of raw data and denoised data  
**表 1.** 原始数据与去噪数据的均方根误差(RMSE)计算结果

	N	E	U
RMSE	0.3989	0.3571	0.3502

#### 4. 结论

本文用 VMD 方法对去趋势的时间序列进行模态分解, 其中  $k$  值设置为 9, 得到 9 个模态分量, 高频信号主要集中在第 1、2 模态分量中, 去除高频信号, 重构 3~9 的模态分量, 重构序列与原始序列对比, 吻合度和光滑度都比较好, 使用均方根误差(RMSE)计算原始时间序列和去噪的时间序列, 其值接近于零, 说明变分模态分解(VMD)能对 GNSS 基准站时间序列中的噪声进行剔除, 达到去噪的目的。

#### 参考文献

- [1] 李莉娟, 韩萌萌. LMD-SVD 方法在坐标时间序列去噪中的应用[J]. 测绘标准化, 2023, 39(3): 172-177.
- [2] 鲁铁定, 谢建雄. 变分模态分解结合样本熵的变形监测数据降噪[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(1): 1-6.
- [3] 罗亦泳, 姚宜斌, 黄城, 等. 基于改进 VMD 的变形特征提取与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4): 612-619.
- [4] 徐华明, 孟飞飞, 俞春燕. 边坡 GNSS 变形监测数据去噪方法研究[J]. 测绘技术装备, 2023, 25(3): 31-36.
- [5] 侯增楠, 黄征凯, 王琰, 等. 一种改进 WVSSA 算法的 GNSS 时间序列降噪方法[J]. 导航定位学报, 2023, 11(4): 97-103.
- [6] 张志宇. 变分模态分解新小波阈值法在 GNSS 坐标时间序列去噪中的应用[J]. 北京测绘, 2023, 37(6): 892-897.