



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 联合交叉验证和 CEEMD-WT 的 GNSS 时间序列降噪方法
作者: 曲轩宇, 李新瑞, 郑蕾, 许豪, 舒宝, 王利
DOI: 10.13203/j.whugis20220570
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-06-27
引用格式: 曲轩宇, 李新瑞, 郑蕾, 许豪, 舒宝, 王利. 联合交叉验证和 CEEMD-WT 的 GNSS 时间序列降噪方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220570>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220570

引用格式:

曲轩宇, 李新瑞, 郑蕾, 等. 联合交叉验证和CEEMD-WT的GNSS时间序列降噪方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220570 (Qu Xuanyu, Li Xinrui, Zheng Lei, et al. A GNSS Time Series Denoising Method with Mixed Use of Cross-Validation and CEEMD-WT[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220570)

联合交叉验证和 CEEMD-WT 的 GNSS 时间序列降噪方法

曲轩宇¹, 李新瑞^{*2}, 郑蕾³, 许豪², 舒宝^{2,4,5}, 王利^{2,4,5}

(1. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙 999077;

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

3. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;

4. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

5. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为降低 GNSS 坐标时间序列的噪声水平, 提出了一种联合交叉验证 (Cross-Validation, CV) 和完备集合经验模态分解 (Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD) 及小波变换的滤波降噪方法, 并利用 4 组模拟数据和 117 个 GNSS 测站的北 (N)、东 (E)、天 (U) 坐标时间序列对所提方法进行验证。首先, 利用 CEEMD 方法将原始时间序列分解为各本征模态分量 (Intrinsic Mode Function, IMF); 然后, 基于 CV 方法确定 IMF 中的纯噪声分量并去除; 最后, 利用小波变换方法去除剩余 IMF 中的噪声, 得到最终降噪结果。模拟数据和真实数据实验结果表明, 该方法可有效削弱原始时间序列中的噪声水平, 与原始时间序列的残差相比, 该方法在 N、E、U 方向上的噪声水平分别降低了 43%、43%、46%。与小波变换、基于 CV 的 CEEMD 和基于相关系数的 CEEMD 方法相比, 该方法可在一定程度上避免产生降噪效果不理想或丢失有用信号的现象。

关键词: 完备集合经验模态分解; 小波变换; 交叉验证; 滤波降噪; GNSS 坐标时间序列

中图分类号: P228

文献标识码: A

A GNSS Time Series Denoising Method with Mixed Use of Cross-Validation and CEEMD-WT

Qu Xuanyu¹, Li Xinrui^{*2}, Zheng Lei³, Xu Hao², Shu Bao^{2,4,5}, Wang Li^{2,4,5}

(1. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, PR China;

4. State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, PR China;

5. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, PR China)

Abstract: Objectives: The coordinate time series derived from Global navigation satellite system (GNSS) technology usually contains noise, which may lead to misinterpretation of some geophysical phenomena. To reduce to noise level of GNSS datasets, a denoising method based on the mixed use of cross-validation (CV),

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877289, 42004024, 42127802); 国家重点研发计划项目 (2021YFC3000503, 2021YFC3000501)

作者简介: 曲轩宇, 博士生, 主要从事 GNSS 定位、多传感器融合及结构健康监测研究。

第一作者联系信息: 香港九龙红磡漆咸道南 181 号, 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 曲轩宇, 852-96078297。

xuanyu.qu@connect.polyu.hk

*通讯作者: 李新瑞, 博士生。lixinrui_98@chd.edu.cn

收稿日期: 2023-06-04

complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) and wavelet transform (WT) is proposed. **Methods:** Specifically, the original GNSS time series is first decomposed into several Intrinsic Mode Function (IMF) components by CEEMD. Then, the CV strategy is applied to divide the IMFs into signal with slight noise components and pure noise components. Finally, after removing the pure noise components, wavelet denoising method is adopted to eliminate the noise in the remaining IMFs to obtain final GNSS time series. **Results:** Both simulated signals and real-world datasets collected from 117 GNSS stations were used to evaluate the performance of the proposed method. Results show that the proposed method can effectively attenuate the noise in the original time series. Compared with the residuals of the original time series, the residuals of denoising results derived from the proposed method are reduced by 43%, 43%, and 46% in the north (N), east (E), and up (U) directions, respectively. **Conclusions:** Compared with wavelet transform, CV-based CEEMD and correlation coefficient-based CEEMD methods, the proposed method can effectively reduce the noise effects in GNSS time series.

Keywords: Complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD); Wavelet Transform (WT); Cross-validation; Filtering and denoising; GNSS coordinate time series

0 引言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 已广泛应用于获取大时空尺度下的高精度三维位置及形变信息。典型的应用包括区域地壳形变监测^[1]、地震同震位移监测^[2, 3]、冰后回弹分析^[4]及全球板块运动研究^[5]等领域。然而, GNSS 坐标时间序列的精度和可靠性会受到如 GNSS 数据处理策略、多路径效应、电离层及对流层延迟等多种误差源影响^[6-8], 进而可能会导致对某些地球物理现象的误解释^[9]。因此, 如何去除坐标时间序列中的误差影响, 降低序列的噪声水平, 对提高区域 GNSS 坐标时间序列精度、分析形变机理具有重要意义。

近年来, 各种空间滤波技术已被开发用于消除或减弱 GNSS 时间序列中的误差影响, 如小波变换 (Wavelet Transform, WT)^[10, 11]、经验模态分解^[12] (Empirical Mode Decomposition, EMD) 等方法。WT 具有良好的时频特性及多分辨率分析能力, 可有效去除观测序列中的高频噪声^[13, 14]。EMD 作为一种非参数自适应信号处理方法, 可依据信号本身固有的时间尺度信息, 将原始时间序列分解为一系列从高频到低频的本征模态分量 (Intrinsic Mode Function, IMF) 和残余项, 并通过去除前几个含有高频噪声的 IMF 以达到去噪效果^[15-17]。但 EMD 在信号分解过程中易受到端点效应和模态混叠影响。Wu 等^[18]在 EMD 的基础上提出了集合经验模态分解 (Ensemble EMD, EEMD) 方法, 有效解决了模态混叠问题; Yeh 等在 EEMD 的基础上提出了完备集合经验模态分解^[19] (Complementary EEMD, CEEMD) 方法, 通过向信号添加正负白噪声的互补处理方法, 来消除重构信号中的残余辅助噪声, 进一步提高了计算效率和信号重构精度。实现 EMD 降噪的关键一步是确定噪声和信号的分界 IMF, 戴吾蛟等^[20]根据 IMF 的能量密度与平均周期的乘积为常量的特性选择分界 IMF; 张双成等^[16]、贾瑞生等^[21]则利用相关系数 (Correlation coefficient, CC) 法确定信号与噪声的分界层。

交叉验证 (Cross-Validation, CV) 方法作为一种自适应选择平滑度进行信号平滑的方法^[22, 23], 在 WT 去噪^[10, 24, 25]、EMD 去噪^[26, 27]等领域取得了广泛应用。传统的基于 CV 的 CEEMD 降噪方法 (CVCEEMD), 由于验证样本选择的随机性和随机划分次数的选择都会使 CV 结果产生差异性^[22], 导致降噪效果不理想或丢失有用信号。对于 GNSS 坐标时间序列而言, 经 CEEMD 分解后的前几个高频 IMF 分量仍可能含有部分短周期信号 (如季节性周期、月周期), 易被传统的 CVCEEMD 方法剔除。因此, 为了提高 CEEMD 滤波结果的精度, 最大限度地减小周期项信号被当作噪声剔除的概率, 本文提出了一种联合 CV 和 CEEMD-WT (CVCEEMD-WT) 的方法, 用于 GNSS 坐标时间序列的去噪处理。

1 基于 CV 的 CEEMD-WT 滤波去噪

本文所提的 CVCEEMD-WT 方法流程图如图 1 所示。首先使用 CEEMD 将原始时间序列分解为多个

IMF 分量，然后利用 CV 法将 IMF 分量分为纯噪声信号和含有少量噪声的有用信号两部分，最后再利用 WT 对后者进行二次降噪处理以获得最终的降噪结果。

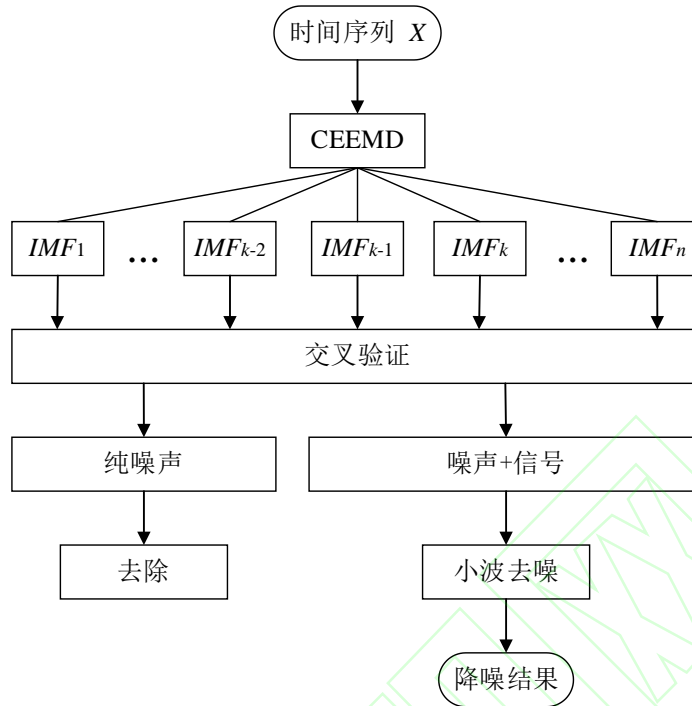


图 1 数据处理流程图

Fig.1 Flowchart of Data processing

具体步骤如下：

- 1) 将时间序列 $(x_i, y_i), (i = 1, 2, \dots, N)$ 分为两部分：奇数序列样本 $(x_{1,2m-1}, y_{1,2m-1})$ 和偶数序列样本 $(x_{2,2m}, y_{2,2m}), (m = 1, 2, \dots, N_1)$ ， N 为奇数时， $N_1 = (N - 1)/2$ ； N 为偶数时， $N_1 = N/2$ 。将奇数序列作为滤波样本，并对偶数序列随机采样，将随机采样数据作为验证样本（样本数为 N_2 ），实验中取 $N_2 = 0.2N$ 。
- 2) 对奇数序列 $(x_{1,2m-1}, y_{1,2m-1})$ 进行 CEEMD 分解^[19]，得到 q 个 IMF 分量和一个残余向量 R 。
- 3) 循环计算 $k (k = 1, 2, \dots, q)$ 至 q 间的 IMF 分量之和作为滤波值 f' ，并计算验证样本对滤波值的方差：

$$C(k, p) = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} [y_{2,i} - f'(x_{2,i})]^2 \quad (1)$$

式中， p 为对偶数序列的某次随机划分； $(x_{2,i}, y_{2,i}), (i = 1, 2, \dots, N_2)$ 表示选取的验证样本； $f'(x_{2,i})$ 是用三次样条插值对滤波值 f' 在 $x_{2,i}$ 时刻内插得到的。

- 4) 考虑到随机划分的统计特性和计算量，选取 M 次（实验选取 $M = 20$ ）不同的随机划分 $p_j (j = 1, 2, \dots, M)$ ，求得 M 次随机划分的方差 $C(k, p_j)$ ，并计算其均值：

$$\bar{C}(k, p) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M C(k, p_j) \quad (2)$$

选择 \bar{C} 最小时的 k ，此时 k 至 q 间的 IMF 分量之和即为 CEEMD 滤波的信号所在层。

- 5) 对原始观测数据进行 CEEMD 分解。首先根据步骤（4）的结果，将 1 至 $k - 2$ 的 IMF 分量之和作为纯噪声分量进行去除；将 $k - 1$ 到 q 间的 IMF 分量之和作为信号+噪声所在层，对其进行 CEEMD 信号重构，得到初始滤波结果 $(x_i, y_i)_c$ 。

- 6) 由于 WT 可有效去除观测序列中的高频噪声，并最大限度地保留低频信号^[13, 14]，因此，本文使用 WT 方法对初始滤波结果 $(x_i, y_i)_c$ 中残余的高频噪声进行去除，进而得到最终的降噪结果。其中，小波基选取 dbN 小波^[28]，阈值函数选择软阈值函数。

同时，在 CV 计算过程中，为防止 CEEMD 滤波计算过程中端点对计算结果的影响，仅选取观测数据中部 70% 的数据作为 CV 样本的选择范围。CVCEEMD-WT 方法顾及到 CV 的随机性对滤波结果的影响，并结合了 CEEMD 方法在处理非线性非平稳数据和 WT 在处理高频噪声方面的优势，可最大限度地减

少原始数据中的有用信号（如短周期）被当做噪声剔除的概率。

2 模拟数据实验与分析

2.1 模拟数据

为验证 CVCEEMD-WT 方法的降噪效果，共构建了 4 组模拟信号，并将 CVCEEMD-WT 方法的去噪结果与 WT、CVCEEMD^[26, 27] 和基于相关系数的 CEEMD (CCCEEMD)^[16, 21] 去噪方法进行比较。其中，信号 1 (f_1) 由周期项、趋势项组成；信号 2 (f_2) 和信号 3 (f_3) 分别为 Blocks 和 HeaviSine 信号^[29, 30]；信号 4 (f_4) 是信号 2 和信号 3 之和，分别在 4 组模拟信号中加入有色噪声 e_t 。则有：

$$f_1 = 3 \sin\left(\frac{2\pi t}{360}\right) + 2 \cos\left(\frac{2\pi t}{360}\right) + \sin\left(\frac{4\pi t}{360}\right) + 2 \cos\left(\frac{4\pi t}{360}\right) + 0.005t \quad (3)$$

$$f_2 = h_j * K(t - t_j) + e_t, K(t) = (1 + \text{sgn}(t))/2 \quad (4)$$

$$f_3 = 4 \sin(4\pi t) - \text{sgn}(t - 0.3) - \text{sgn}(0.72 - t) \quad (5)$$

$$f_4 = f_2 + f_3 \quad (6)$$

$$e_t = \text{wgn}(t) - 0.5\text{wgn}(t - 1) \quad (7)$$

式中， $h_j = [4, -5, 3, -4, 5, -4.2, 2.1, 4.3, -3.1, 2.1, -4.2]$ ； sgn 表示符号函数； $\text{wgn}(t)$ 表示均值为 0，方差为 10 的高斯白噪声 (White Gaussian Noise, WGN)； f_1 的采样率为 1s， f_2 、 f_3 的采样率为 1/2048s；模拟数据采样点数 $n = 2048$ 。 $t_j = [0.1, 0.13, 0.15, 0.23, 0.25, 0.40, 0.44, 0.65, 0.76, 0.78, 0.81]$ ；图 2 所示为构建的 4 组模拟信号以及添加噪声后的信号。

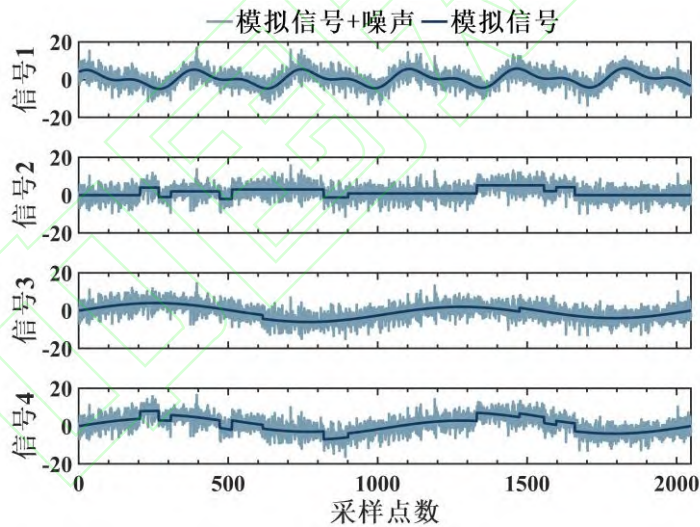
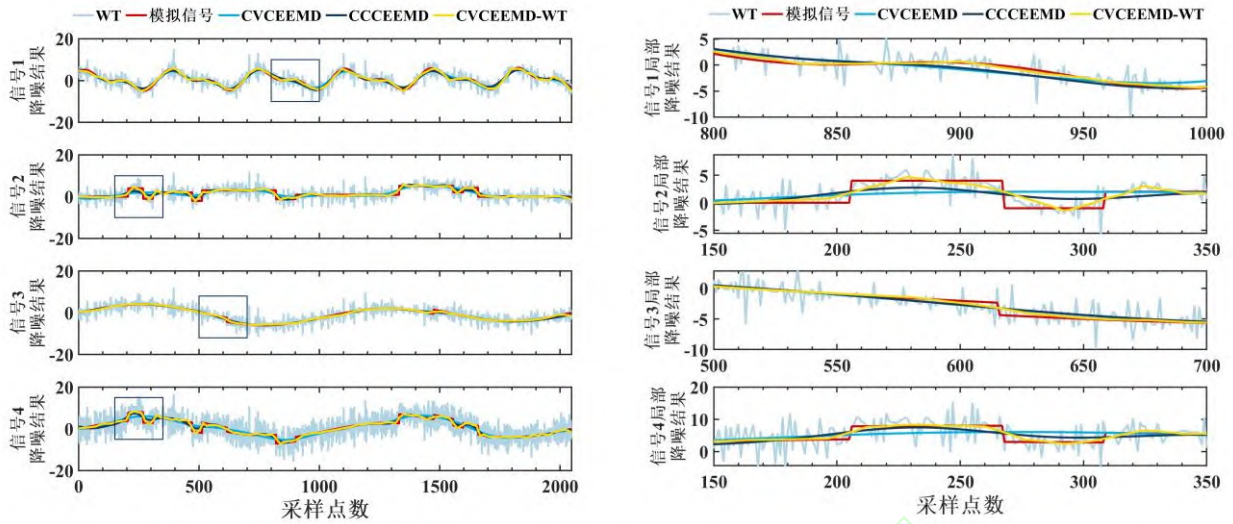


图 2 4 组模拟信号及噪声序列

Fig.2 Four simulated signals and noise sequences

2.2 实验结果与分析

图 3 为利用 WT、CVCEEMD、CCCEEMD 以及 CVCEEMD-WT 方法降噪后的结果，图 3(b)为对图 3(a)中部分时段（黑色矩形）的局部放大结果。其中，CCCEEMD 方法利用相关系数法确定噪声与信号的分界 IMF，将分界之上的高频噪声滤除，再使用 WT 方法对分界 IMF 进行去噪，进而得到最终降噪结果^[21]。从图 3 可以看出，4 种方法均能去除原始时间序列中的有色噪声，但 WT 去噪不彻底，滤波后的序列仍含有较多噪声；CVCEEMD 和 CCCEEMD 方法虽能有效去除有色噪声，但滤波后的序列丢失了部分有用信号，存在失真现象；CVCEEMD-WT 滤波结果与真值吻合度较好，能够有效地将信号和噪声分离开来，同时不会过多丢失有用信号。



(a) 4种方法降噪结果

(b) 局部放大后的降噪结果

图3 4种方法降噪结果比较

Fig.3 Comparisons of denoising results based on four methods

为定量分析各方法的降噪效果，表1给出了上述4种方法降噪结果的信噪比 (Signal-to-noise Ratio, SNR)^[21] 及均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)^[31]值。SNR和RMSE的计算公式为：

$$S_{SNR} = 10 \log \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)^2}{\sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - s(n))^2} \quad (8)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [s(n) - x(n)]^2} \quad (9)$$

式中， $s(n)$ 为降噪后的信号， $x(n)$ 为原始未含噪信号， N 为采样点个数。若降噪后信号的SNR越高，RMSE越小，说明降噪效果越好。

由表1可知，4种方法均能提高降噪后序列的SNR值，同时降低原始信号的RMSE值，说明4种方法均可有效去除原始信号的噪声分量；4组模拟信号中，CVCEEMD-WT方法相较于另外3种方法，保证了SNR值提升最大的同时，RMSE值降低到了最小，说明CVCEEMD-WT方法在去除噪声的同时，最大限度地保留了信号部分；相对于CVCEEMD和CCCEEMD方法，CVCEEMD-WT方法SNR值平均提升比例分别为48%和20%，RMSE平均降低比例分别为35%和26%，说明CVCEEMD-WT方法能够自适应地选择信号层并提供更可靠的降噪效果。

表1 基于4种不同方法的模拟信号去噪结果统计

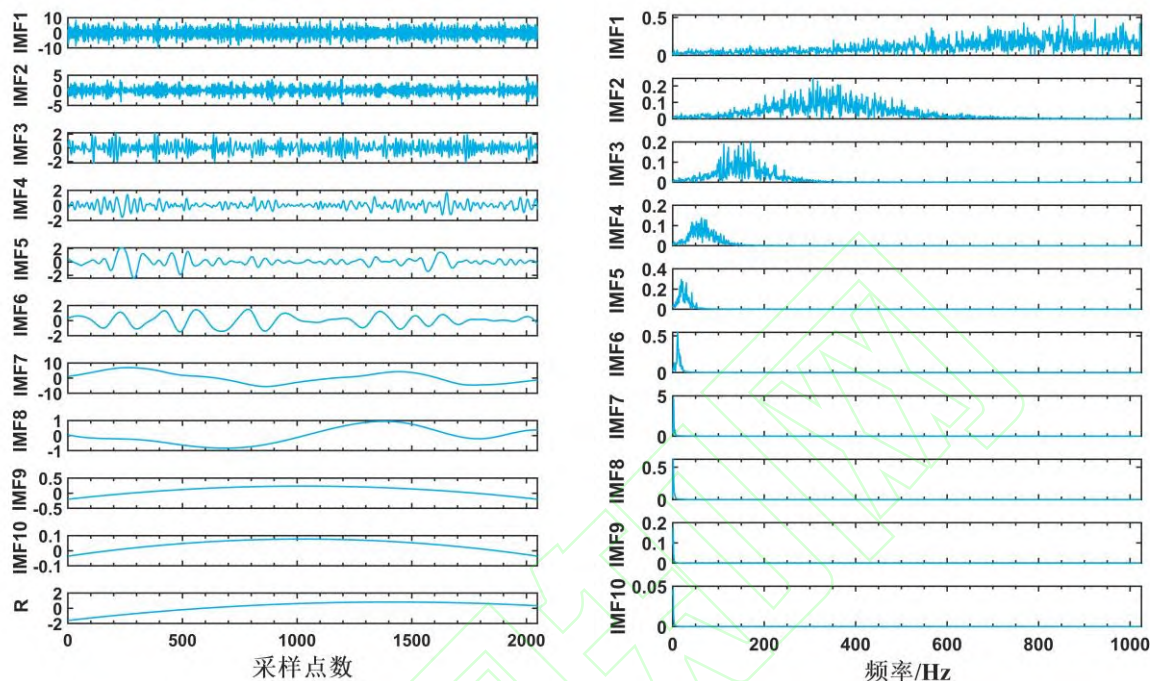
Tab.1 Statistics of simulated signal denoising results based on four different methods

信号	SNR/dB					RMSE/mm				
	原始	WT	CV	CC	CVWT	原始	WT	CV	CC	CVWT
1	-1.45	5.95	13.05	14.00	16.90	3.50	1.49	0.66	0.59	0.42
2	-5.24	2.07	5.28	8.18	10.04	3.50	1.51	1.04	0.75	0.60
3	-1.43	6.17	20.67	19.54	21.48	3.50	1.46	0.28	0.32	0.25
4	0.43	1.31	10.49	12.72	17.04	3.50	3.16	1.10	0.76	0.51

注：原始指模拟信号+噪声；CV指CVCEEMD方法；CC指CCCEEMD方法；CVWT指CVCEEMD-WT方法，下同。

以模拟信号4为例，进一步分析了CVCEEMD-WT方法在选择信号重构层数方面的有效性。采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 方法对CEEMD分解得到的IMF进行频谱分析，结果如图4所示。当采用传统CV方法，计算得到验证样本对滤波值的方差均值 \bar{c} 最小时 k 为6，最终重构信号应为 $B_1 = \sum_{k=7}^n IMF_k + R$ 。利用CCCEEMD方法得到的信号与噪声的分层为IMF6，此时最终重构信号应为 $B_2 = \sum_{k=7}^n IMF_k + R + WT(IMF_6)$ ，其中 $WT(IMF_6)$ 表示使用WT方法对分界层IMF6进行去噪后的结果。

但对 CEEMD 分解结果及其 FFT 结果进行分析可以发现, $IMF5$ 和 $IMF6$ 分量中存在信号和噪声混叠现象, 即 $IMF5$ 和 $IMF6$ 中仍含有少量有用信号, 此时若直接按传统 CV 方法或相关系数法进行重构, 会丢失部分有用信号。因此, 利用 CVCEEMD-WT 方法首先将 $IMF1\sim IMF4$ 作为纯噪声剔除, 将 $IMF5\sim IMF10$ 作为信号+噪声所在层, 对其进行 CEEMD 信号重构, 得到初始滤波结果 B_3 , 再对其进行 WT 去噪, 将初始滤波结果 B_3 中残余的高频噪声去除, 进而得到最终的降噪结果 B 。CVCEEMD-WT 方法顾及到 CV 的随机性对滤波结果的影响, 可降低原始数据中的有用信号被当做噪声剔除的概率。



(a) CEEMD 分解结果

(b) FFT 结果

图 4 模拟信号 4 的 CEEMD 分解及各 IMF 的 FFT 结果

Fig.4 CEEMD decomposition results of simulated signal No. 4 and corresponding FFT results of each IMF

3 GNSS 坐标时间序列分析

3.1 数据来源

为了进一步验证 CVCEEMD-WT 方法的有效性, 并考虑到观测时长和数据缺失情况, 选取了 117 个北美地区的 GNSS 坐标时间序列进行降噪分析。国际 GNSS 服务数据分析中心 SOPAC (The Scripps Orbit and Permanent Array Center) 提供了去除粗差后的北 (N)、东 (E)、天 (U) 相对坐标时间序列, 其数据下载地址为 <http://garner.ucsd.edu/pub/timeseries/measures/ats/inputFiles>。实验区域及测站分布如图 5 所示, 在进行分析前还需对原始时间序列进行预处理, 以去除序列中的平均值和跳跃项。

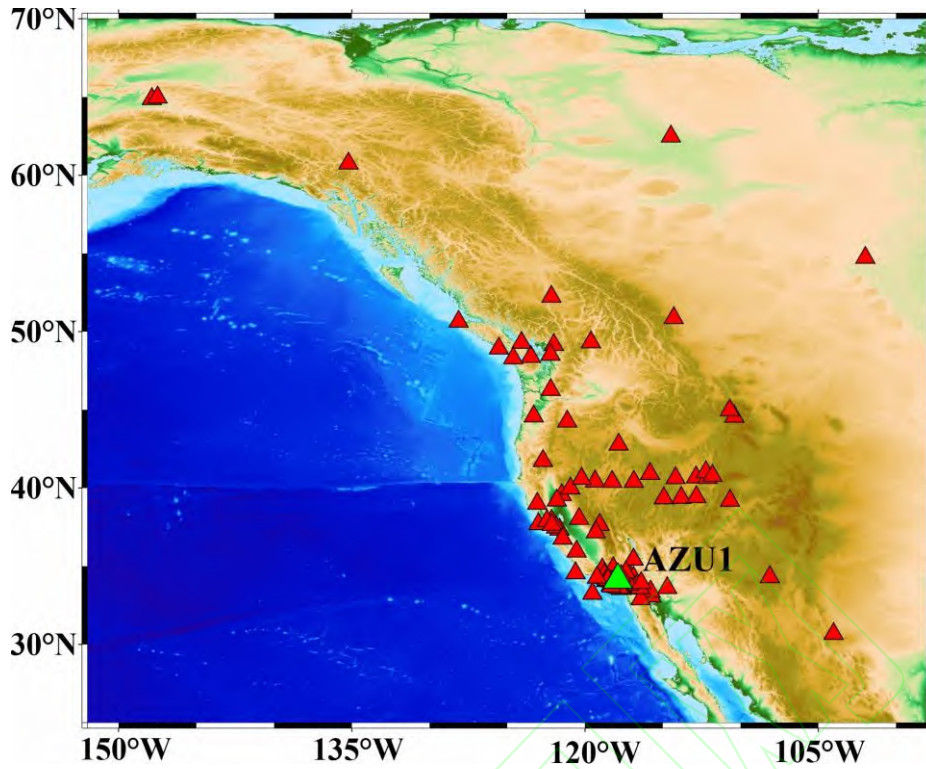
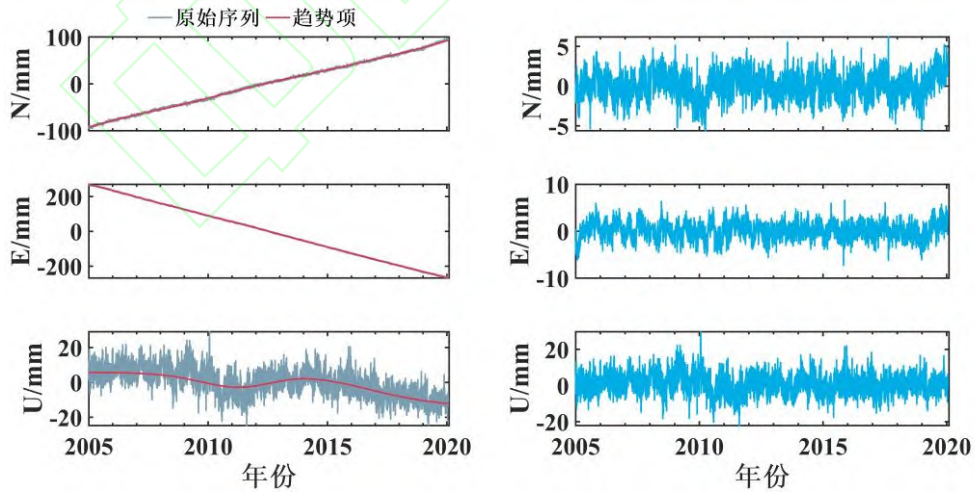


图 5 本文所用的 GNSS 测站分布
Fig.5 Distribution of GNSS stations used in this study

3.2 实验结果与分析

本文以 AZU1 站（图 5 绿色三角符号）为例进行分析，图 6(a)给出了预处理后时间序列及利用 CEEMD 方法得到的趋势项，图 6(b)给出了去除趋势项后的剩余项（剩余项=原始时序-趋势项）。从图 6(a)中可以看出，N、E 方向存在明显的线性运动趋势，而 U 方向具有明显的周期性，且存在一个非线性趋势项。由图 6(b)可知，原始坐标时间序列显示出了显著的非线性变化和时变振荡，表明受白噪声及有色噪声影响，原始信号是非线性非平稳的时间序列。



(a) 预处理后的时间序列 (b) 去除趋势项后的剩余项

图 6 AZU1 站预处理及去除趋势项后的时间序列

Fig.6 Preprocessing results and residual time series of AZU1 station

理论上，经预处理后的 GNSS 时间序列包含趋势项、季节信号及空间相关噪声^[32]。但由于 GNSS 坐标时间序列真实值未知，因此本文以扣除趋势项和季节信号后的残差序列的标准差 (Standard Deviation, STD)

^[29]和降噪结果的复合评价指标 T 值^[11, 33]作为评价标准, 对各方法降噪效果进行分析。针对各 GNSS 站时间序列的剩余项, 进一步使用 Hector 软件提取了季节信号^[34], 从而得到残差序列用来准确分析各方法的去噪效果。对于复合评价指标的构建, 选取了关注降噪信号细节信息的均方根误差和逼近信息的平滑度, 经归一化、变异系数定权并线性组合后即可得到 T 值^[11]。根据各指标的意义与特征可知, 对于各方法的降噪结果, 其残差 STD 和降噪结果的 T 值越小, 表示降噪效果越好。

以 AZU1 站 U 方向为例 (如图 6(b) U 方向), 其季节信号如图 7(a) 中红色曲线所示, 可以看出, Hector 软件获取的季节项信号与原始序列具有较好的一致性, 季节信号振幅与原序列基本一致。利用上文提到的 WT、CVCEEMD、CCCEEMD 以及 CVCEEMD-WT 方法对去除趋势项后的剩余项进行降噪处理, 降噪结果分别如图 7(b)、7(c)、7(d)、7(e) 所示。其中 WT 结果仍然受到高频噪声的影响, CVCEEMD、CCCEEMD 和 CVCEEMD-WT 方法均可有效去除原始时间序列中的高频噪声影响。

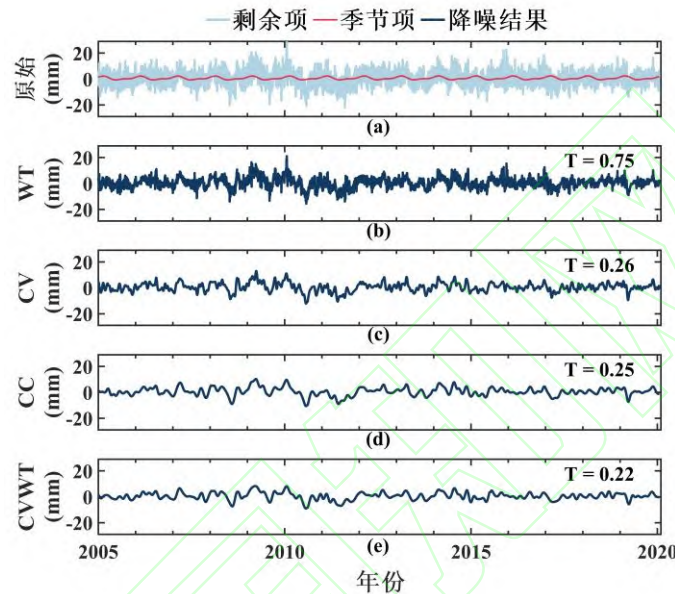


图 7 AZU1 站 U 方向降噪结果及季节项. (a) Hector 获取的 AZU1 站 U 方向的季节项及剩余项; (b)-(e) 4 种方法降噪结果及复合指标 T

Fig.7 Denoising and seasonal results of the U component at the AZU1 station. (a) Seasonal trend and residual component of the U-direction at the AGMT station based on the Hector Software; (b)-(e) denoising results derived from the four methods and corresponding T values

图 8 为对 AZU1 站 U 方向各降噪结果扣除季节项后的残差序列。由图 7 和图 8 可以看出, 4 种降噪方法均可去除原始时序中的高频噪声, 但 WT 方法相对于另外 3 种方法去噪水平有限, 残差序列中依然存在较多噪声; CVCEEMD-WT 方法得到的降噪残差 STD 和 T 值均比 CVCEEMD 和 CCCEEMD 方法得到的结果更小, 说明 CVCEEMD-WT 方法可以在去除高频噪声的同时保留更多的有用信号。

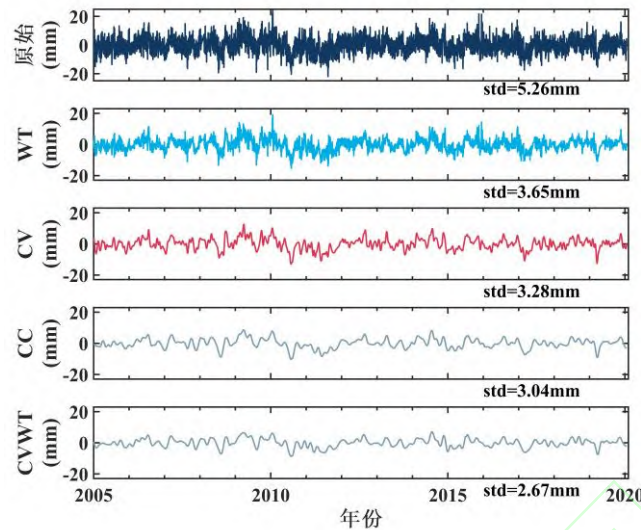
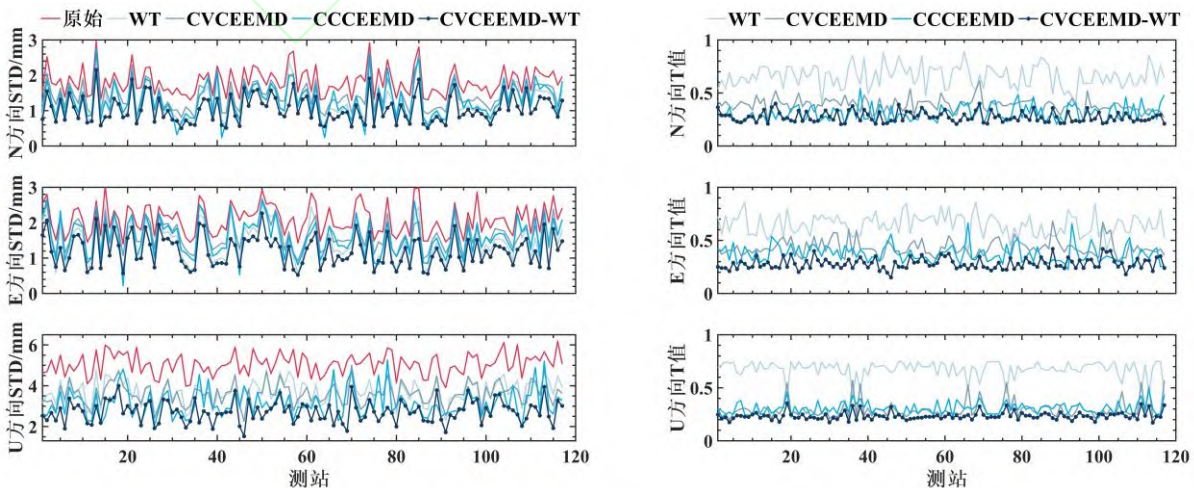


图 8 AZU1 站 U 方向原始和降噪残差序列

Fig.8 Original and denoised residual time series of the U component at the AGMT station

图 9 统计了 117 个 GNSS 测站 N、E、U 3 个方向原始和降噪残差的 STD 以及降噪结果的 T 值。表 2 给出了 117 个 GNSS 测站 3 个方向的残差 STD 和降噪结果 T 值的均值。从图 9(a) 和表 2 中可以看出, 117 个 GNSS 测站中, 原始时间序列残差的 STD 均为最大值, 4 种滤波方法所得残差的 STD 相较于原始序列均有明显提升, 说明 4 种方法均可不同程度的去除序列中的噪声。超过 90% 的测站降噪结果中, 由 CVCEEMD-WT 方法得到的残差 STD 处于最低水平, 说明了 CVCEEMD-WT 方法可稳定有效地去除原始 GNSS 时间序列中的噪声影响。此外, 由 CVCEEMD-WT 方法得到的 T 值整体上低于其他方法所得 T 值, 表明 CVCEEMD-WT 方法在降噪的同时考虑了信号的细节信息和逼近信息, 保留了更多的有用信号。

基于 CEEMD 的降噪效果(CVCEEMD 和 CCCEEMD) 在 U 方向上整体上优于 WT 结果, 可能是由于 CEEMD 方法在处理非线性非平稳的时间序列时具有一定的优势。值得注意的是, 多数测站的 N、E 方向的 WT 降噪结果要优于 CVCEEMD 和 CCCEEMD 结果, 其原因可能是: 原始时序中水平方向(即 N、E 方向)的噪声水平较低, 而相关系数法和传统的 CV 方法在确定 IMF 最佳重构层数时存在一定程度的误差, 使部分有用信号被当做噪声剔除。与此同时, CVCEEMD-WT 方法在初始滤波结果中保留了较多的原始信号, 再利用 WT 去噪后初始滤波结果中的高频噪声得到有效去除, 在一定程度上避免了有用信号被误删除的可能, 从而实现了较优的降噪效果。与原始时间序列的残差相比, CVCEEMD-WT 方法降噪残差的 STD 均值在 N、E、U 方向分别降低了 43%、43%、46%; 与 CVCEEMD 方法相比, N、E、U 方向的去噪性能分别提升 37%、40%、32%; 相对于 CCCEEMD 方法, 去噪性能分别提升 23%、32%、16%。



(a) 原始和降噪残差的 STD

(b) 降噪结果的复合评价指 T 值

图 9 117 个 GNSS 测站 NEU 方向的 STD 和 T 值

Fig.9 Standard deviations (a) and T values (b) of NEU components of 117 GNSS stations

表 2 117 个 GNSS 测站 NEU 方向的 STD 和 T 值均值
Tab. 2 Average of STDs and T values for N-E-U components at 117 GNSS stations

方向	STD/mm					T			
	原始	WT	CV	CC	CV-WT	WT	CV	CC	CV-WT
N	1.82	1.26	1.38	1.28	1.04	0.66	0.39	0.31	0.27
E	2.09	1.49	1.64	1.58	1.20	0.65	0.43	0.37	0.28
U	5.05	3.72	3.59	3.15	2.72	0.68	0.30	0.31	0.23

4 结论

针对传统基于 CV 的 CEEMD 方法在 GNSS 坐标时间序列的噪声识别与剔除过程中存在的问题, 本文结合了 CEEMD 在处理非线性、非平稳数据和 WT 在处理高频噪声方面的优势, 提出了一种联合 CV 和 CEEMD-WT 的自适应滤波降噪方法。CVCEEMD-WT 方法有效削弱了 CV 随机性产生的影响, 同时在初始滤波结果中保留了更多的有用信号, 并利用 WT 对初始滤波结果中残余的高频噪声进行二次降噪处理, 实现较优的降噪效果。通过 4 组模拟信号和 117 个 GNSS 连续跟踪站坐标时间序列的降噪处理验证了 CVCEEMD-WT 方法的有效性, 并得出以下结论:

(1) 真实数据分析结果表明, 相对于 WT、CVCEEMD 及 CCCEEMD 方法, CVCEEMD-WT 方法的降噪效果分别提升 27%、36%、24%。

(2) CVCEEMD-WT 方法可稳定有效的识别水平和垂直方向的噪声项, 能够在初始筛选准则产生误差时对降噪结果进行纠正, 极大程度的避免了有用信号被误删的可能。超过 90%的测站降噪结果中, CVCEEMD-WT 方法得到的结果均为最优, 证明了本文方法的可靠性和稳定性。

(3) CVCEEMD-WT 方法顾及到前几个 IMF 分量中混叠的低频信号, 能够在保留原始数据有用信号(如季节信号)的同时, 剔除信号层中残留的高频噪声, 在一定程度上改善了 CEEMD 方法存在的模态混叠效应, 降低了有用信号被当作噪声剔除的概率。

致谢

本文的 GNSS 数据资料由 SOPAC 提供, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Tarayoun A, Mazzotti S, Craymer M, et al. Structural Inheritance Control on Intraplate Present-Day Deformation: GPS Strain Rate Variations in the Saint Lawrence Valley, Eastern Canada[J]. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 2018, 123(8): 7004-7020
- [2] Wang Yuebing, Gan Weidong, Chen Weitao, et al. 2018. Coseismic displacements of the 2017 Jiuzhaigou M7.0 earthquake observed by GNSS: Preliminary results[J]. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 2018, 61(01): 161-170 (王阅兵, 甘卫军, 陈为涛, 等. GNSS观测的九寨沟7.0级地震同震位移初步结果[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(01): 161-170)
- [3] Li Zhicai, Ding Kaihua, Zhang Peng, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi Earthquake from GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497 (李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS观测的2021年青海玛多地震 (Mw 7.4) 同震形变及其滑动分布[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1489-1497)
- [4] Mazzotti S, Lambert A, Henton J, et al. Absolute gravity calibration of GPS velocities and glacial isostatic adjustment in mid-continent North America[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011,38: L24311, doi:/10.1029/2011GL049846
- [5] Prawirodirdjo L, Bock Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B08405, doi:10.1029/2003JB002944

- [6] JIANG Weiping. Data Processing Methods and Applications of the GNSS Reference Station Network[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017 (姜卫平. GNSS基准站网数据处理方法与应用[M]. 武汉大学出版社, 2017)
- [7] Zhou Maosheng, Guo Jinyun, Shen Yi, et al. 2018. Extraction of common mode errors of GNSS coordinate time series based on multi-channel singular spectrum analysis[J]. *Chinese J. Geophys (in Chinese)*, 2018, 61(11): 4383-4395 (周茂盛, 郭金运, 沈毅, 等. 基于多通道奇异谱分析的GNSS坐标时间序列共模误差的提取[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4383-4395)
- [8] Zhuang wenquan, Li jun, Hao ming, et al. Analyze the characteristics of crustal activity in the southern Sichuan-Yunnan using GNSS data and focal mechanism solution[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(07): 732-738+746 (庄文泉, 李君, 郝明, 等. 利用加密GNSS数据和震源机制解分析川滇块体南部现今地壳活动特性[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(07): 732-738+746)
- [9] Zhou X H, Yang Y L, Chen Q S, et al. A robust trend estimator for GNSS time series in the presence of complex periodicity and its evaluation on multi-source products of IGS and IGMAS[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4):103
- [10] Zhong P, Ding X L, Zheng D W, et al. Adaptive wavelet transform based on cross-validation method and its application to GPS multipath mitigation[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(2): 109-117
- [11] Zhu Jianjun, Zhang Zhetao, Kuang Cuilin, et al. A Reliable Evaluation Indicator of Wavelet De-noising[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015,40(05):688-694 (朱建军, 章浙涛, 匡翠林, 等. 一种可靠的小波去噪质量评价指标[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(05): 688-694)
- [12] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995
- [13] Ogaja C, Wang J, Rizos C. Detection of Wind-Induced Response by Wavelet Transformed GPS Solutions[J]. *Journal of surveying engineering*, 2003, 129(3): 99-104
- [14] Kaloop M R, Kim D. De-noising of GPS structural monitoring observation error using wavelet analysis[J]. *Geomatics, natural hazards and risk*, 2016, 7(2): 804-825
- [15] Liu Xikang, Ding Zhifeng, Li Yuan, et al. Application of EMD in GNSS Time Series Periodic Term Processing[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*: (2021-01-19) [2022-08-31]. doi: 10.13203/j.whugis20210029 (刘希康, 丁志峰, 李媛, 等. EMD在GNSS时间序列周期项处理中的应用[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): (2021-01-19)[2022-08-31].DOI:10.13203/j.whugis20210029)
- [16] Zhang Shuangcheng, He Yuefan, Li Zhenyu, et al. EMD for Noise Reduction of GPS Time Series[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(12): 1248-1252 (张双成, 何月帆, 李振宇, 等. EMD用于GPS时间序列降噪分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(12): 1248-1252)
- [17] Li Yanyan, Yin Haitao, Han Linqiao. A Denoising Method of MSMPCA Based on CEEMD for Coseismic Deformation Monitoring with High-Frequency GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 352-360 (李艳艳, 殷海涛, 韩林桥. 利用MSMPCA去噪的CEEMD方法监测高频GNSS同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(03): 352-360)
- [18] Wu Z, Huang N. Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41
- [19] Yeh J R , Shieh J S , Huang N E . Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Novel Noise Enhanced Data Analysis Method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2010, 2(2): 135-156
- [20] Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun, et al. EMD Filter Method and Its Application in GPS Multipath[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(04): 321-327 (戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等. 基于经验模式分解的滤波去噪法及其在GPS多路径效应中的应用[J]. 测绘学报, 2006, 35(04): 321-327)
- [21] Jia RuiSheng, Zhao TongBin, Sun HongMei, et al. Micro-seismic signal denoising method based on empirical mode decomposition and independent component analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2015, 58(3): 1013-1023 (贾瑞生, 赵同彬, 孙红梅, 闫相宏. 基于经验模态分解及独立成分分析的微震信号降噪方法[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 1013-1023)
- [22] Nason G P. Wavelet Shrinkage Using Cross-Validation[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B, Methodological*,

1996, 58(2): 463-479

- [23] Clark R M, Thompson R. An objective method for smoothing palaeomagnetic data[J]. *Geophysical Journal International*, 1978, 52(2): 205-213
- [24] Zhong Ping, Ding Xiaoli, Zheng Dawei, et al. An Adaptive Wavelet Transform Based on Cross-validation and Its Application to Mitigate GPS Multipath Effects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(03): 279-285 (钟萍, 丁晓利, 郑大伟, 等. 一种基于交叉验证技术的自适应小波变换及其在削减GPS多路径误差中的应用[J]. 测绘学报, 2007, 36(03): 279-285)
- [25] Wang Dejun, Xiong Yongliang, Xu Shaoguang. A Precise Kinematic Single Epoch Positioning Algorithm Using Moving Window Wavelet Denoising[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 779-784 (王德军, 熊永良, 徐韶光. 利用窗口小波去噪的高精度动态单历元定位算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(06): 779-784)
- [26] Luo Feixue, Dai Wujiao, Wu Xixiu. EMD Filtering Based on Cross-Validation and Its Application in GPS Multipath[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 450-453 (罗飞雪, 戴吾蛟, 伍锡锈. 基于交叉验证的EMD滤波及其在GPS多路径效应中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(04): 450-453)
- [27] Wang Huanxue, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, et al. An Empirical Mode Decomposition Algorithm Based on Cross Validation and Its Application to Lidar Return Signal De-Noising[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 234-241 (王欢雪, 刘建国, 张天舒, 等. 一种基于交叉验证和经验模态分解的滤波算法及其在激光雷达回波信号降噪处理中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 234-241)
- [28] Dai Hailiang, Sun Fuping, Jiang Weiping, et al. Application of Wavelet Decomposition and Singular Spectrum Analysis to GNSS Station Coordinate Time Series[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 371-380 (戴海亮, 孙付平, 姜卫平, 等. 小波多尺度分解和奇异谱分析在GNSS站坐标时间序列分析中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(03): 371-380)
- [29] Li Y, Xu C, Yi L, et al. A data-driven approach for denoising GNSS position time series[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(8): 905-922
- [30] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, 81(3): 425-455
- [31] Alharbi N, Hassani H. A new approach for selecting the number of the eigenvalues in singular spectrum analysis[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 353(1): 1-16
- [32] Bogusz J, Klos A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 655-664
- [33] Yang Bing, Yang Zhiqiang, Tian Zhen, et al. Denoising analysis of GNSS coordinate time series by combining EMD-HD and wavelet decomposition[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(9): 1881-1889 (杨兵, 杨志强, 田镇, 等. 联合EMD-HD和小波分解的GNSS坐标时间序列降噪分析[J]. 测绘学报, 2022, 51(9): 1881-1889)
- [34] Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, et al. Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data[J]. *Journal of geodesy*, 2013, 87(4): 351-360

网络首发:

标题: 联合交叉验证和CEEMD-WT的GNSS时间序列降噪方法

作者: 曲轩宇, 李新瑞, 郑蕾, 许豪, 舒宝, 王利

DOI: 10.13203/j.whugis20220570

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

曲轩宇, 李新瑞, 郑蕾, 等. 联合交叉验证和CEEMD-WT的GNSS时间序列降噪方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220570 (Qu Xuanyu, Li Xinrui, Zheng Lei, et al. A GNSS Time Series Denoising Method with Mixed Use of Cross-Validation and CEEMD-WT[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220570)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

参数优化变分模态分解的GNSS坐标时间序列降噪方法

鲁铁定, 何锦亮, 贺小星, 陶蕊

武汉大学学报（信息科学版），2023-04-14 08:58, doi: 10.13203/j.whugis20220363

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220363>

