



### 三种GNSS高程时序降噪方法的效果对比分析

范小猛, 胡川, 张重阳, 李成洪

#### Comparison of three noise reduction methods for GNSS elevation time series

FAN Xiaomeng, HU Chuan, ZHANG Chongyang, and LI Chenghong

引用本文:

范小猛, 胡川, 张重阳, 等. 三种GNSS高程时序降噪方法的效果对比分析[J]. 全球定位系统, 2022, 47(1): 68–73. DOI: [10.12265/j.gnss.2021090701](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021090701)

FAN Xiaomeng, HU Chuan, ZHANG Chongyang, et al. Comparison of three noise reduction methods for GNSS elevation time series[J]. *Gnss World of China*, 2022, 47(1): 68–73. DOI: [10.12265/j.gnss.2021090701](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021090701)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2021090701>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 小波分析和经验模态分解对BDS多路径误差削弱对比研究

Comparative study on wavelet analysis and empirical mode decomposition for BDS multipath error reduction

全球定位系统. 2019, 44(3): 49–55

#### 基于小波变换的CORS高程坐标时序周期性分析与降噪方法研究

Research on periodic analysis and noise reduction method of elevation coordinate timing of CORS based on wavelet transform

全球定位系统. 2019, 44(4): 61–67

#### 高频GNSS信号去噪的小波和多方向主成分分析

Combined method of wavelet and MPCA for high-rate GNSS signal denoising

全球定位系统. 2021, 46(4): 33–39

#### 基于EMD-LSTM耦合预测模型的BDS多路径误差削弱方法研究

BDS multipath errors reducing method based on EMD-LSTM coupled prediction model

全球定位系统. 2020, 45(2): 98–104

#### GNSS干扰源测向方法对比分析

Comparison and analysis of direction finding methods of GNSS interference sources

全球定位系统. 2019, 44(2): 59–62

#### 基于支持向量机的GNSS时间序列预测

GNSS time series prediction based on support vector machine

全球定位系统. 2019, 44(2): 70–75



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2021090701

# 三种 GNSS 高程时序降噪方法的效果对比分析

范小猛, 胡川, 张重阳, 李成洪

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘 要:** 为了探究经验模态分解 (EMD)、整体经验模态分解 (EEMD) 和小波降噪三种方法的降噪性能, 以中国区 6 个国际 GNSS 服务 (IGS) 站高程分量的 5 a、10 a 和 20 a 时序数据为例, 对它们的降噪结果进行比较分析。首先利用线性拟合分离趋势项, 并采用  $3\sigma$  准则剔除异常值, 得到满足符合降噪要求的样本序列; 然后分别用这三种方法分离样本序列中的噪声, 得到降噪后的序列; 最后以信噪比 (SNR)、相关系数、均方根误差 (RMSE) 为评价指标比较分析它们的降噪性能。实验结果表明: 1) 当坐标时间序列质量较差时, EEMD 和小波降噪可以很好的分离噪声; 2) 对于 5 a 和 10 a 时序数据, 小波降噪的效果最好; 对于 20 a 时序数据, EEMD 和小波降噪效果接近, 优于 EMD; 3) 小波降噪抑制有色噪声的能力最佳。

**关键词:** 全球卫星导航系统 (GNSS) 坐标时间序列; 经验模态分解 (EMD); 整体经验模态分解 (EEMD); 小波降噪

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2022)01-0068-06

## 0 引 言

在全球卫星导航系统 (GNSS) 坐标时间序列中, 不仅包含真实信号, 还含有白噪声 (WN)、闪烁噪声 (FN)、随机漫步噪声 (RWN) 等多种有色噪声。合理的分离出信号和噪声, 有助于获取更准确的测站运动参数估值, 对于精化速度场、建立地球框架以及揭示构造变形运动等有着重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

经验模态分解 (EMD)、整体经验模态分解 (EEMD) 和小波降噪是三种较常用的噪声分离方法。HUANG 等<sup>[3]</sup> 在 1998 年讨论了 EMD 在时间序列分析中的应用问题。张双成等<sup>[4]</sup> 将基于 EMD 的时间序列分析法引入 GNSS 坐标序列分析, 对中国境内及周边 9 个国际 GNSS 服务 (IGS) 站三个坐标分量上的序列数据进行处理, 有效地分离出线性趋势项、周期项和噪声项, 证明了 EMD 法降噪的有效性。随着研究的不断深入, 研究人员发现 EMD 存在模式混叠的现象<sup>[5-6]</sup>, 为了改善这个问题, WU 等<sup>[7]</sup> 在 EMD 的基础上提出了 EEMD。张恒璟等<sup>[8]</sup> 采用 EMD 和 EEMD 分别对 BJFS 站和 URUM 站 10 a 左右的高程数据进行处理, 分离序列

趋势项和周期项运动, 发现 EEMD 可以明显减弱模式混叠现象, 但不能完全消除模式混叠, 同时 EEMD 分解时所加入的 WN 会导致其分解结果不唯一。小波分析具有多分辨率、低熵性、去相关性等特点, 得到了 GNSS 时间序列分析研究人员的重视<sup>[9-11]</sup>。魏冠军等<sup>[12]</sup> 采用小波变换阈值降噪对高程分量的坐标时序进行处理, 有效减弱了噪声信息, 证明了该方法降噪的可行性, 但样本序列数据时间长度在 3 a 左右, 没有涉及到更长时间跨度时序的降噪分析。马俊等<sup>[13]</sup> 提出了小波包系数信息熵法, 对 KMIN 站近 5 a 的三个坐标分量上的时序进行了降噪处理, 得到了仅受 WN 影响的时间序列, 消除了有色噪声的影响, 但同样没有对更长时间跨度的坐标时间序列进行分析。

目前, 已经有众多学者对 EMD、EEMD 和小波降噪有了深入研究, 但少有文献考虑到数据长度可能会对降噪效果产生的影响。随着 GNSS 基准站的不断观测, 相关机构已积累了 20 多年的坐标时间序列数据, 为研究上述方法在不同时序长度下的降噪效果提供了可能。针对上述问题, 本文通过对比分析 EMD、EEMD 和小波降噪在不同 GNSS 高程坐标时序长度

收稿日期: 2021-09-07

资助项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究 (一般) 项目 (cstc2017jcyjAX0102); 重庆市教委科学技术研究 (KJ1705132); 2016、2017 年重庆交通大学高层次人才科研启动项目 (16JDKJC-A025, 17JDKJC-A207); 重庆交通大学研究生科研创新项目 (CYS21341)。

通信作者: 范小猛 E-mail: fanxiaomeng0809@163.com

下的降噪效果,采用信噪比(SNR)、相关系数和均方根误差(RMSE)定量评价它们的降噪性能,为相关研究提供一定参考。

## 1 降噪方法

### 1.1 经验模态分解

EMD 是一种基于非线性、非平稳数据的自适应时频信号分解方法,在不同尺度上分析数据,提取有用信息<sup>[3]</sup>。其基本思想是通过筛选,把原始信号  $X(t)$  分解成  $m$  个不同时间尺度的本征模态分量(IMF)和残余项  $r_m$ ,分解流程如下:

1) 寻找原始信号中所有的局部极大、极小值点,利用三次样条函数分别拟合上述点,得到关于时间的上、下包络线,计算两条包络线的平均包络线  $m_1(t)$ ,用原始信号  $X(t)$  减去平均包络得到新的待分解信号  $h_1(t)$

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t). \quad (1)$$

2) 判断  $h_1(t)$  是否满足以下条件:一是待分解的信号中的极值点的个数与过零点的个数应相等或最多相差 1;二是在任意点上,上下包络线的均值为 0,即上下包络线应对称。如果满足上述条件,将  $h_1(t)$  作为分解得到的第一个分量  $IMF_1(t)$ , 然后进行第 3) 步操作,否则将  $h_1(t)$  作为新的原始信号重复第 1) 步操作。

3) 计算剩余信号  $r_1 = X(t) - IMF_1(t)$ , 然后将  $r_1$  作为新的待分解信号。

4) 判断  $r_1$  是否满足以下条件:  $r_1$  为单调变化的残差序列,且不能继续分解得到 IMF 分量。如果满足,EMD 分解过程结束,残余项  $r_m = r_1$ , 否则重复流程 1)~3) 操作。原始信号经过  $m$  次分解可以表示为

$$X(t) = \sum_{i=1}^m IMF_i(t) + r_m. \quad (2)$$

为了获取不含噪声的 GNSS 坐标时间序列,需要对上式中分解出的 IMF 分量进行重构。首先,计算各分量与原始序列间的相关系数;然后识别第一个取局部极小值的相关系数对应的分量  $IMF_k$ , 将其作为信号与噪声之间的分界层;最后,将分界层与之前的 IMF 分量层相加作为高频噪声,然后用原始信号减去重构高频噪声得到降噪后信号<sup>[3]</sup>。

### 1.2 整体经验模态分解

EMD 的缺点之一是模式混叠:信号被 EMD 分解为  $m$  个不同的 IMF 分量后,不同频率的信号会存在于同一个 IMF 分量中,即一个 IMF 分量包含着不同尺度的信号。EEMD 通过在分解前向原始信号中添加白噪声  $w(t)$ ,生成待分解信号,改善模式混叠问题。

$$X_i(t) = X(t) + w_i(t). \quad (3)$$

式中,下标  $i$  表示第  $i$  次分解。其余分解步骤与 EMD 相同,此处不再赘述。将多次分解得到的尺度相同的 IMF 分量整体取平均,作为当前尺度的 IMF 分量,从而得到最终的一系列不同尺度的 IMF 分量数据,按照相关系数准则重构信号即可得到降噪之后的 GNSS 坐标时间序列。本文根据文献<sup>[14]</sup>实验结果,将加入的  $WN$  与原始信号的标准差之比设为 0.1,整体平均次数设置为 100 次。

### 1.3 小波降噪

多分辨率分析是小波分析的重要概念,它是利用特定的小波基函数的伸缩变换,将 GNSS 坐标时间序列在不同分辨率上进行分解,得到能够反映时间序列概貌的低频部分以及能够反映时间序列细节的高频部分,进而对不同分辨率上的信号进行分析<sup>[12]</sup>。小波阈值降噪是在多分辨率分析的基础上,通过设置一定的阈值对分解之后的各个尺度上的信号进行处理,达到分离噪声的目的。小波阈值降噪的具体步骤如下:

1) 小波分解。选取合适的小波基函数,对 GNSS 坐标时间序列进行小波分解,得到不同尺度上的小波系数。

2) 阈值降噪。对分解得到的各个尺度上的信号进行非线性阈值降噪处理,剔除小波系数小于阈值的小波项。

3) 重构信号。将剔除小波项之后的各尺度上的信号重构得到降噪后的 GNSS 坐标时间序列。

经过实验对比,本文采用 Coif3 小波对原始数据进行分解,根据软阈值规则对数据进行降噪处理。

## 2 实验数据和方案

### 2.1 实验数据

由于我国境内的 IGS 站时间序列在水平方向上主要以线性为主,而在高程方向上表现出复杂的非线性运动<sup>[15-16]</sup>,因此本文以高程方向上的坐标时序为例进行分析。为保证实验所需时序长度,选取我国境内 BJFS、KMIN、LHAS、SHAO、URUM、WUHN 共 6 个 IGS 站点所对应的高程方向单日解坐标时序,各站点完整数据的起止历元均为 1999.17—2020.39,截取其中 2000—2019 年的观测数据作为本次实验的原始数据。

采用线性拟合去除原始数据中的趋势项,并且根据  $3\sigma$  准则剔除孤立值。另外,为了避免由于数据缺失造成模式混叠现象,以及满足小波分析要求数据具有均匀取样和零均值的特性,利用线性插值对数据缺失

的部分进行插补,得到适用于降噪分析连续数据。

## 2.2 实验方案

实验方案共分为三种:

方案一:将每个站点共 20 a 的坐标时间序列数据依次分为 4 段,分别为 2000—2004、2005—2009、2010—2014、2015—2019 时间段,得到 24 个时序长度为 5 a 的样本序列;

方案二:将每个站点共 20 a 的坐标时间序列数据平均分为 2 段,分别为 2000—2009、2010—2019,得到 12 个时序长度为 10 a 的样本序列;

方案三:将每个站点 2000—2019 共 20 a 的坐标时间序列数据分别整体作为一段,得到 6 个时序长度为 20 a 的样本序列。

降噪效果通过降噪后信号与原始信号之间的 SNR、相关系数以及 RMSE 来判断。其计算公式分别为:

$$R_{\text{sn}} = 10 \log \left\{ \frac{\sum_{t=0}^{N-1} X(t)^2}{\sum_{t=0}^{N-1} (X(t) - \hat{X}(t))^2} \right\}, \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^N [X(t) - \bar{X}][\hat{X}(t) - \bar{X}]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [X(t) - \bar{X}]^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N [\hat{X}(t) - \bar{X}]^2}}, \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [X(t) - \bar{X}(t)]^2}. \quad (6)$$

式中:  $X(t)$  为原始序列;  $\hat{X}(t)$  为降噪后的真实信号;  $N$  为采样点个数。SNR 体现的是噪声信号在信号中所占的比重,其值越大,表示噪声含量越低;相关系数越接近 1,表示两者的相似度越高,降噪效果越好;RMSE 表示的是两者之间的偏差程度,其值越小代表降噪效果越好。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 降噪结果

经过计算,三种方法在不同样本序列长度下所分解出的分量个数相同,从 5 a 到 20 a 分别为 10、11、12 个。对于 EMD 和 EEMD 而言,根据各 IMF 分量与原样本序列的相关系数得到的信号与噪声间分界层不同:EMD 法得到的不同样本序列分界层数分别为第 5、4、5 层,而 EEMD 法得到的不同样本序列分界层数分别为第 2、5、5 层,根据上述分界层对样本序列进行降噪处理。

图 1 和图 2 描述了不同 IGS 站点高程方向上经过降噪的坐标时间序列。从图中可以发现三种方法都可以有效的对坐标时间序列数据进行降噪,降噪后信号表现出明显的周期性变化,曲线变化也较为平滑。其中,图 1 中 BJFS 站的 5 a-2 样本序列以及 KMIN 站

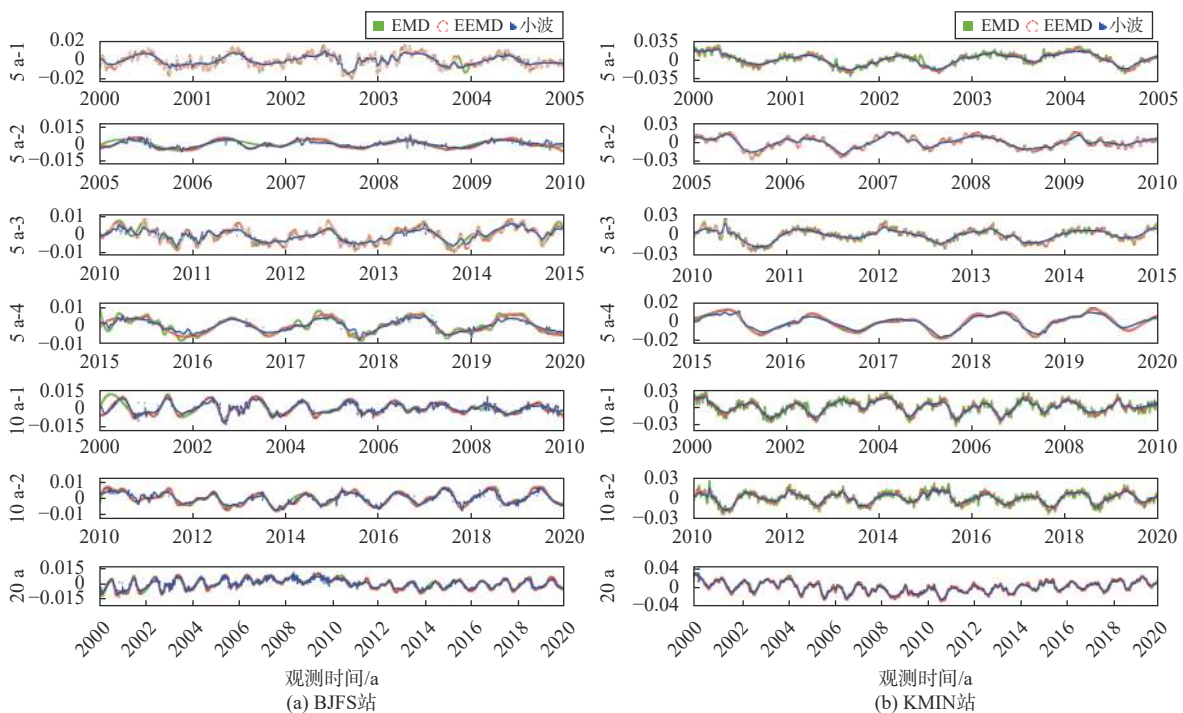


图 1 BJFS 站和 KMIN 站降噪结果对比

的 5 a-4 样本序列的光滑度明显优于其余相同时间跨度的样本序列,其原因可能是在这两个样本数据中缺失历元数较少,数据较为完整.例如 BJFS 站的 5 a-2 样本序列的缺失历元数为 54,仅占样本总数的 3%,

远小于其它曲线光滑度较低的样本序列缺失历元数,说明时间序列中缺失数据的存在会对降噪效果产生一定影响.

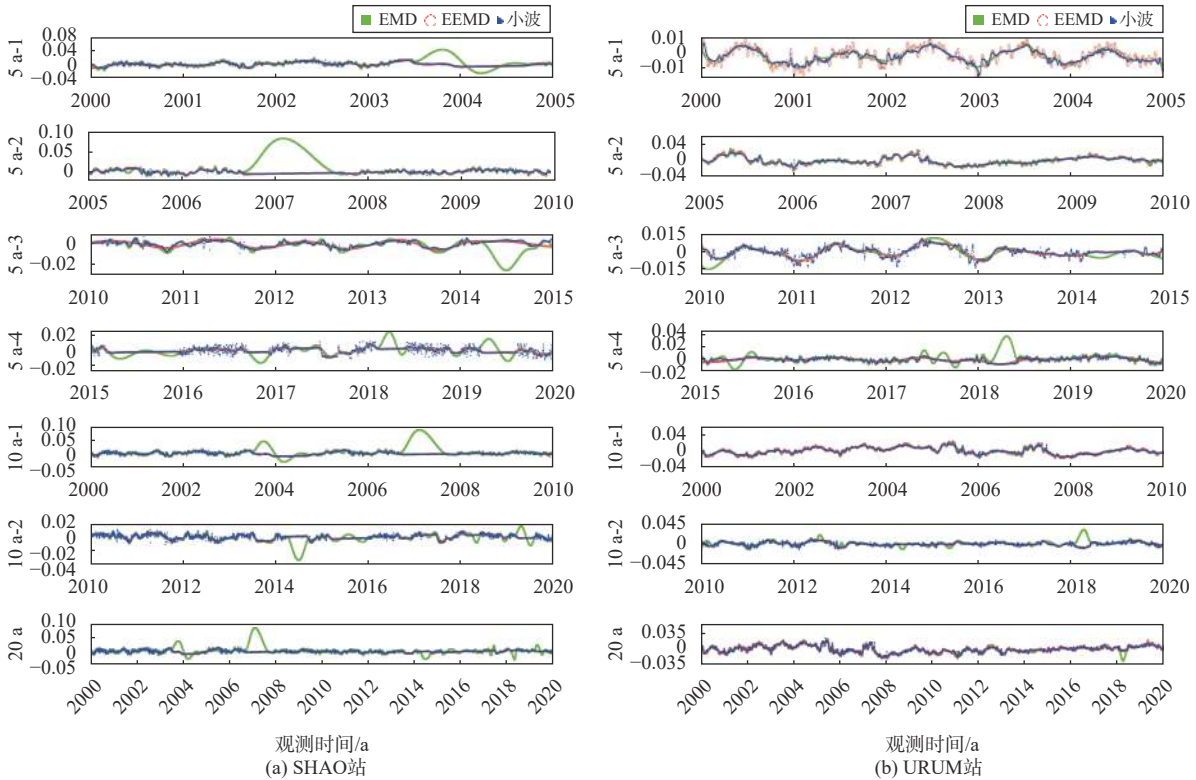


图 2 SHAO 站和 URUM 站降噪结果对比

图 2 中 SHAO 和 URUM 两个站点, EMD 降噪后的曲线在个别时间段呈现出明显的异常波动. 其中 SHAO 站的 5 a-2 样本序列数据在 2007 年前后波动最大, 最大达到了 80 mm, 5 a-4 样本序列数据中异常波动较多, 但波动幅度较小, 其余站点也存在相似的异常波动情况. 这种异常波动现象可能是原始时间序列数据中存在长时间的连续中断, 如 SHAO 站连续中断的历元数为 411, 缺值率达到了 22%, 即便是后续对缺失处进行了插补, 依然会对 EMD 降噪结果造成偏差.

此外, 在上述出现异常波动的时间点, EEMD 和小波降噪得到的序列趋势相似, 振幅为 3~5 mm, 趋势较平缓, 说明即使数据存在长时间的连续缺失, 这两种方法也可以有效减弱插值的影响, 削弱信号中存在的噪声.

### 3.2 降噪结果对比分析

为了进一步说明 EMD、EEMD 和小波降噪的效果, 分别计算不同样本长度下各方法降噪结果的 SNR、相关系数和 RMSE, 其中样本长度为 5 a 和 10 a 时, 将

各指标的平均值作为最终结果, 如表 1 所示.

由表 1 可知:

1) EMD 受初始数据质量的影响较大. 在数据较完整的站点, EMD 降噪序列各评价指标略差或持平于 EEMD 和小波降噪结果; 而在缺失比例大的站点, 各评价指标值明显较差.

2) 相比于 EMD, EEMD 不仅改善了模式混叠问题, 还在一定程度上提高了 EMD 分解的精度, 即便是在缺值数较多的 SHAO 站, EEMD 降噪序列的相关系数数值大部分在 0.7 以上, 降噪效果稳定.

3) 在 5 a 和 10 a 的样本时间序列数据中, 小波降噪序列的评价参数值明显优于 EMD 和 EEMD; 当时间跨度为 20 a 时, EEMD 降噪序列的评价参数与小波相近. 这说明在这三种方法中, 小波降噪的适用性更好, 而 EEMD 更适用于对时间跨度大的坐标时间序列进行降噪分析.

4) 大部分站点的 EEMD 降噪序列和小波降噪序列随着时间跨度的增加, 三个评价参数值均有所增加, 难以根据某一个参数准确说明其降噪性能的强弱.

表 1 各站点评价参数统计

m

站点	评价指标	EMD			EEMD			小波		
		5 a	10 a	20 a	5 a	10 a	20 a	5 a	10 a	20 a
BJFS	$R_{sn}$	6.699 4	4.711 3	6.893 2	7.796 3	5.904 4	7.251 9	6.605 9	6.772 1	5.758 6
	$R$	0.664 5	0.612 8	0.705 9	0.703 6	0.667 9	0.718 3	0.714 7	0.725 4	0.314 2
	RMSE	0.004 4	0.005 0	0.004 8	0.004 2	0.004 7	0.004 7	0.004 4	0.004 5	0.007 1
KMIN	$R_{sn}$	15.216 1	17.085 2	16.648 2	14.981 7	14.454 1	17.743 3	12.655 0	12.494 7	15.906 8
	$R$	0.881 3	0.905 3	0.900 5	0.879 0	0.874 1	0.911 3	0.856 4	0.854 7	0.895 4
	RMSE	0.004 9	0.004 5	0.005 5	0.005 0	0.005 2	0.005 2	0.005 6	0.005 7	0.005 7
LHAS	$R_{sn}$	9.343 3	13.961 0	14.966 0	16.781 0	17.355 0	17.093 8	15.992 4	17.458 6	18.813 2
	$R$	0.784 6	0.870 3	0.886 1	0.897 7	0.906 4	0.905 0	0.900 3	0.913 2	0.925 7
	RMSE	0.005 3	0.004 4	0.004 5	0.003 5	0.003 7	0.004 0	0.003 6	0.003 7	0.003 7
SHAO	$R_{sn}$	-13.326 9	-14.067 6	-18.729 2	6.970 9	7.665 2	7.485 1	22.392 7	14.330 6	14.132 8
	$R$	0.233 0	0.249 5	0.180 5	0.691 1	0.731 5	0.725 9	0.873 1	0.893 3	0.887 4
	RMSE	0.012 4	0.013 4	0.015 0	0.003 9	0.003 9	0.004 1	0.002 7	0.002 8	0.003 1
URUM	$R_{sn}$	4.388 3	4.708 6	11.327 0	10.871 5	11.963 6	16.849 3	11.529 9	15.009 4	16.818 7
	$R$	0.589 1	0.593 4	0.828 3	0.777 1	0.802 1	0.902 6	0.876 4	0.894 6	0.909 3
	RMSE	0.005 5	0.005 7	0.004 8	0.003 9	0.004 0	0.003 6	0.003 4	0.003 5	0.003 6
WUHN	$R_{sn}$	-0.048 5	2.093 3	3.438 7	5.156 8	6.889 5	6.927 6	7.379 3	8.914 3	9.048 7
	$R$	0.506 2	0.620 2	0.672 3	0.605 2	0.702 6	0.706 5	0.742 0	0.772 1	0.780 8
	RMSE	0.007 7	0.007 5	0.007 1	0.005 7	0.005 8	0.006 0	0.005 2	0.005 2	0.005 4

为了进一步探究 EMD、EEMD 和小波降噪对有色噪声的剔除能力,分别计算三种方法降噪序列的谱指数,谱指数越接近零,在一定程度上说明有色噪声的振幅越小,对真实信号的影响也越小<sup>[13]</sup>,结果如图 3 所示。

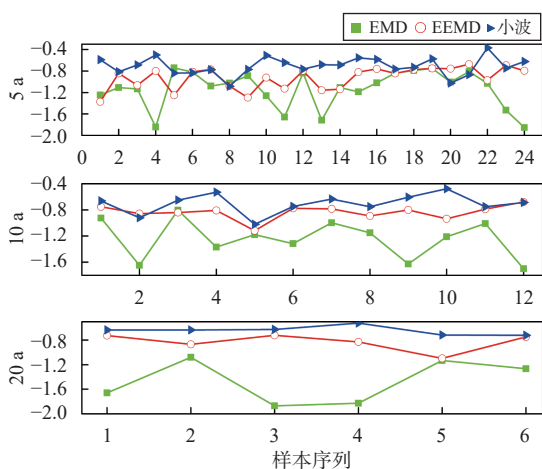


图 3 三种方法得到的降噪序列的谱指数

由图 3 可以得出以下结论: 1) EEMD 降噪后时序的谱指数大于 EMD 降噪序列的谱指数,剔除有色噪

声的能力更好,但是否因 EEMD 方法所加入 WN 产生的影响还有待进一步研究; 2) 小波分析降噪在不同时间跨度的时序数据下都可以更好的抑制有色噪声,使得降噪后的信号更加可靠。

## 4 结论

本文通过设置不同样本长度的降噪实验,对 EMD、EEMD 以及小波分析三种方法的降噪效果进行对比,并利用 SNR、RMSE 和相关系数定量分析了其降噪性能。实验表明:

1) EMD 易受坐标时间序列自身质量的影响,降噪效果相对较差; EEMD 和小波降噪在时间序列存在长时间中断,质量较差时,依然可以得到较好的降噪结果。

2) 随着时序样本长度的增加,三种方法的降噪性能均有提升。其中,小波降噪的适用性最广泛,在不同的样本数据中,降噪性能均优于 EMD 和 EEMD; EEMD 在时间跨度较长的情况下降噪性能更好,与小波降噪性能接近; EMD 降噪效果相对最差。

3) 小波降噪相比于EMD和EEMD, 所得到的降噪序列中含有的有色噪声更少, 更有利于对数据进行后续的分析和使用。

### 参考文献

- [1] 黄立人. GPS基准站坐标分量时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2): 31-33,38.
- [2] 马俊, 曹成度, 闵阳, 等. 基于主成分分析去除GNSS站坐标时间序列有色噪声[C]/第十一届中国卫星导航年会, 成都: 2020.
- [3] 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]. *Mathematical, physical and engineering sciences*, 1998, 454(1971): 903-995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193
- [4] 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.
- [5] 肖瑛, 殷福亮. 解相关EMD: 消除模态混叠的新方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 25-29.
- [6] 胡爱军, 孙敬敬, 向玲. 经验模态分解中的模态混叠问题[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(4): 429-434.
- [7] WU Z H, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in adaptive data analysis*, 2009, 1(1): 1-41. DOI: 10.1142/S1793536909000047
- [8] 张恒璟, 程鹏飞. 基于经验模式分解的CORS站高程时间序列分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 129-134.
- [9] 马俊, 姜卫平, 周晓慧, 等. 联合小波和方差分量估计方法分析中国IGS测站时间序列变化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(4): 629-636.
- [10] 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(3): 371-380.
- [11] WU H, LI K, SHI W Z, et al. A wavelet-based hybrid approach to remove the flicker noise and the white noise from GPS coordinate time series[J]. *GPS solutions*, 2015, 19(4): 511-523. DOI: 10.1007/s10291-014-0412-6
- [12] 魏冠军, 陈晨, 黄逸宇, 等. 基于小波变换的CORS高程坐标时序周期性分析与降噪方法研究[J]. 全球定位系统, 2019, 44(4): 61-67.
- [13] 马俊, 曹成度, 姜卫平, 等. 利用小波包系数信息熵去除GNSS站坐标时间序列有色噪声[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1309-1317.
- [14] 张恒璟, 龙安森, 文汉江. EEMDAN的CORS站高程时间序列分析方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 29-34.
- [15] 姜卫平, 李昭, 刘万科, 等. 顾及非线性变化的地球参考框架建立与维持的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(6): 665-669.
- [16] 袁林果, 丁晓利, 陈武, 等. 香港GPS基准站坐标序列特征分析[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5): 1372-1384.

### 作者简介

范小猛 (1995—), 男, 硕士, 研究方向为GNSS数据处理及应用。

胡川 (1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大地测量数据处理。

张重阳 (1998—), 男, 硕士, 研究方向为大地测量数据处理。

李成洪 (1996—), 男, 硕士, 研究方向为图像处理算法及应用。

## Comparison of three noise reduction methods for GNSS elevation time series

FAN Xiaomeng, HU Chuan, ZHANG Chongyang, LI Chenghong

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to explore the noise reduction performance of the empirical mode decomposition (EMD), ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and wavelet analysis, elevation time series data of different lengths from sin IGS stations are taken as examples. Firstly, the outliers and the trend items in the original data are removed to get the sample sequence meeting the experimental requirements. Then, the sample sequence is denoised by three methods and gets the real signal without noise. Finally, calculating the indexes of signal-noise ratio, correlation coefficient and root mean square error of data to compare the three noise reduction methods. The experimental results indicate that: 1) EEMD and wavelet analysis can well denoise when the quality of coordinate time series is poor. 2) Wavelet analysis has the best denoising performance on the Global Navigation Satellite System (GNSS) coordinate time series with time span of 5 a or 10 a; For 20 a time series samples, EEMD and wavelet analysis have similar denoising effects and are better than EMD. 3) The force of wavelet analysis to eliminate colored noise is better.

**Keywords:** GNSS time series; empirical mode decomposition (EMD); ensemble empirical mode decomposition (EEMD); wavelet noise reduction