



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: EMD 在 GNSS 时间序列周期项处理中的应用
作者: 刘希康, 丁志峰, 李媛, 刘志广
DOI: 10.13203/j.whugis20210029
收稿日期: 2021-01-19
网络首发日期: 2021-07-12
引用格式: 刘希康, 丁志峰, 李媛, 刘志广. EMD 在 GNSS 时间序列周期项处理中的应用. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210029>



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.whugis20210029

引用格式：

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]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210029 (LIU Xikang, DING Zhifeng, LI Yuan, et al. Application of EMD in GNSS Time Series Periodic Term Processing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210029)

EMD 在 GNSS 时间序列周期项处理中的应用

刘希康^{1,2}, 丁志峰¹, 李媛², 刘志广²

1 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100081

2 中国地震局第一监测中心, 天津, 300180

摘要： 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 位置时间序列蕴含着丰富的构造和非构造变形信息, 并具有成分复杂、建模困难, 非构造信息难以有效分离等特点, 利用自适应的经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 方法对川滇地区 24 个 GNSS 连续站时间序列作周期项修正。结果表明, 周期项的修正十分必要, EMD 方法能够根据每个台站信号的自身特性, 自适应的提取不同频率、振幅的周期成分, 这也更符合实际情况, 相比于原始 N、E、U 方向时间序列的平均 RMS (Root Mean Square error, RMS) 分别降低了 19.96%、11.57% 和 38.50%, 是比谐波模型改正更精确、有效的方法。之后, 使用修正后的连续站时间序列模拟流动观测, 发现经过 5~6 年/期观测即可得到相对可靠的台站运动速度, 并通过距离较近的实际连续观测站对流动观测站周期项改正, 验证了 EMD 方法的稳定性和可靠性, 这也为流动 GNSS 观测的实施, 资料的使用和修正提供了参考意见和理论依据。

关键词： 全球导航卫星系统; 周期运动; 流动观测; 谐波模型; 经验模态分解

中图分类号： P228

GNSS 技术能够提供高精度、大尺度、多维的地壳形变监测数据, 在地壳形变监测领域应用已经十分广泛, 也发挥着越来越重要的作用, 特别是 1998 年以来中国大陆地壳运动观测网络 (简称“网络工程”) 和中國大陸构造环境监测网络 (简称“陆态网络”) 建立了 260 多个连续观测台站和 2000 多个流动观测站, 其中 90% 以上流动观测站有 5 年及以上观测资料, 部分超过 20 期。GNSS

时间序列蕴含着丰富的构造变形信息和非构造变形信息（如海潮、大气、积雪、土壤水、海洋非潮汐等），如何去除其中的非构造变形信息对观测资料的准确、有效应用起着至关重要的作用。

收稿日期：2021-01-19

项目资助：国家重点研发计划（2018YFC1503606）；中国地震局青年震情跟踪课题（2020010226，2021010511）；国家自然科学基金（41472180）

第一作者：刘希康，博士生，主要从事地表形变与地下结构方面工作。xikangliu@126.com

通讯作者：丁志峰，研究员。dingzf@cea-igp.ac.cn

诸多研究成果表明我国的 GNSS 时间序列在水平方向主要以线性运动为主^[1,2]，并有弱周期性变化，而高程方向则表现为复杂的周期振荡与非线性运动，且不同测站的周期振荡特性并不相同。在传统模型中，周期性信号一般通过周年或半年正余弦谐波表示，并用最小二乘拟合方法分离，得到的振幅和相位是常数值。而实际上，不同年份间的 GNSS 测站环境变化及其响应具有不规则性^[3-7]，因此用传统的谐波模型求解非构造周期性运动参数可能偏离甚至违背原时间序列的运动特性，进而导致用于噪声分析的残差不可避免地包含某种误差或错误信息^[8]。

近年来，许多学者针对振幅变化的周期项处理进行了大量研究，如 Davis 等^[9]提出一种基于卡尔曼滤波的方法来统计 GNSS 时间序列的周期性现象，但该模型仅适用于随机信号，而很多研究证实 GNSS 时间序列中含有闪烁噪。Chen 等^[10]发现不需先验信息的奇异谱分析方法（Singular Spectrum Analysis, SSA）比最小二乘拟合方法和卡尔曼滤波方法对变振幅周期项的提取效果更优。周茂盛等^[11]提出利用多通道奇异谱分析（Multichannel Singular Spectrum Analysis, MSSA）提取区域站点的共模误差；Gruszczynska 等^[12]利用 MSSA 估计了影响 GNSS 观测的几种常见环境效应因素。然而奇异谱分析法和其改进的多通道奇异谱分析方法对滞后窗口的取值比较敏感，选取不合适的滞后窗口甚至会导致错误的结果^[5]。张晶等^[13]基于主成分分析法（Principal Component Analysis, PCA）发现全球大部分 GNSS 台站都存在非线性周期规律，周年项和半年项占据主导地位；占伟等^[7]对比分析了区域叠加法和 PCA 对高程时间序列共模分量的提取效果，并给出两种方法的使用建议。以上研究均验证了 GNSS 时间序列中变振幅周期信号的存在，并根据不同方法的性能对信号进行了分离，但如何准确地从包含了各种噪声、误差及周期性非构造运动信息的实际观测资料中有效提取出构造运动信息，还需不同思路和方法的不断探索。经验模态分解^[14]是近年发展起来的新型自适应信号时频处理方法，并成功应用在机械故障诊断、生物医学信号特征提取、地震数据分析等领域，它不像 MSSA 或 PCA 方法需要多个信号一起分析提取共模分量，而仅依靠信号自身的时间尺度特性将信号

分解为一定数量的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF), IMF 由观测信号唯一确定, 各 IMF 分量包含了信号不同时间尺度的局部特征, 具有清晰的物理意义, 通过 IMF 分量可以提取信号不同周期的频率成分信息^[15]。与传统谐波分析方法相比, EMD 是直接的、后验的, 不需要提前知晓信号的周期性成分及其对信号的影响程度。

目前, 基于 EMD 及其发展几种的方法在 GNSS 数据处理方面已有许多探索研究和初步应用, 主要包括震前异常特征信息提取^[16-19], 时间序列噪声识别与信号提取^[8,20]和多路径模型改正^[21]三个方面。本文将利用 EMD 方法对 GNSS 连续站时间序列进行周期项改正, 并进一步利用改正后的时间序列模拟流动观测, 查看积累多少期观测资料的情况下才能获得相对准确的运动速度, 并用于实际数据周期项改正处理。

1 EMD 方法原理

EMD 方法就是基于信号本身的局部特征时间尺度, 对原始信号进行平稳化处理, 将复杂的信号分解成 m 个具有不同特征尺度的数据序列, 即本征模态函数 (IMF) 和一个趋势项 $Res(t)$ 。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m IMF_k(t) + RES(t) \quad (1)$$

对信号分解后可以利用相关系数准则^[8]确定 m 个 IMF 信号与噪声的分界本征模态函数 IMF_k 。通过重构被分解序列获得原信号中的周期项、趋势项及噪声序列。

根据 GNSS 解算后时间序列可知, 其采样间隔为 1 天, 如果以年为单位, 则其采样间隔为 1/365 年, 它的倒数即为最大采样频率, 为 365Hz。由奈奎斯特采样定理可知, 时频分析能识别出最大采样率的一半, 即 182.5Hz, 即可得到频谱的全部信息, 换算为最小周期为 1/182.5 年, 也就是其理论上能识别出周期最小为 2 天的信号。

2 模拟信号分析

GNSS 坐标时间序列一般由周期项、趋势项和噪声 3 部分组成。由于实际连续 GNSS 坐标序列中周期性信号的振幅随时间可能是变化的, 在剔除站点位置和阶跃式偏移前提下, 模拟信号加入更接近实际的振幅变化因子^[22]。

$$x(t_i) = a \sin(2\pi t_i) + b \cos(2\pi t_i) + c(t_i) \sin(2\pi t_i) + c(t_i) \cos(2\pi t_i) + d \sin(4\pi t_i) + e \cos(4\pi t_i) + c(t_i) \sin(4\pi t_i) + c(t_i) \cos(4\pi t_i) + \varepsilon(t_i) \quad (2)$$

式中, $x(t_i)$ 为添加时变周期性的模拟信号, a, b, d, e 为常数, 分别取值 2、4、7、9, $c(t_i) = 6e^{0.3\sin(t_i)}$ 为振幅变化因子, $\varepsilon(t_i)$ 为噪声, t_i 为时间年小数。当 $c(t_i) =$ 常数时, (2) 式则转化为传统的谐波周期模型。

图 1 为按 (2) 式设计的 10 年模拟数据, (a)、(b) 分别为固定振幅和时变振幅的年周期、半年周期信号, (c) 为趋势项、趋势项加周期号及添加信噪比 10dB 白噪声的最终合成信号。图 2 为模拟信号的 EMD 分解图。根据相关系数准则将前 5 个分量视为高频噪声, 第 6、第 7 个分量即为周期信号, 第 8 个分量为趋势项。图 3 为分别利用 EMD 方法和传统谐波模型提取的周期信号与模拟周期信号的对比图, 其相关系数分别为 0.9914 和 0.9691。可以发现, EMD 方法提取的振幅随时间是变化的, 与模拟周期信号高度一致, 其分解出的模态分量个数只与信号自身特性相关, 不像谐波模型需提前给出年周期和半年周期先验信息去拟合, 且振幅为固定值。另外, 从图 2 的 IMF6 分量和图 3 可以看到在两端位置由于端点效应出现幅值波动现象, 在实际数据处理时可以通过数据延拓或舍弃两端部分数据来消除此问题的影响^[23], 本文实际数据处理两端各舍弃约 30 天数据。

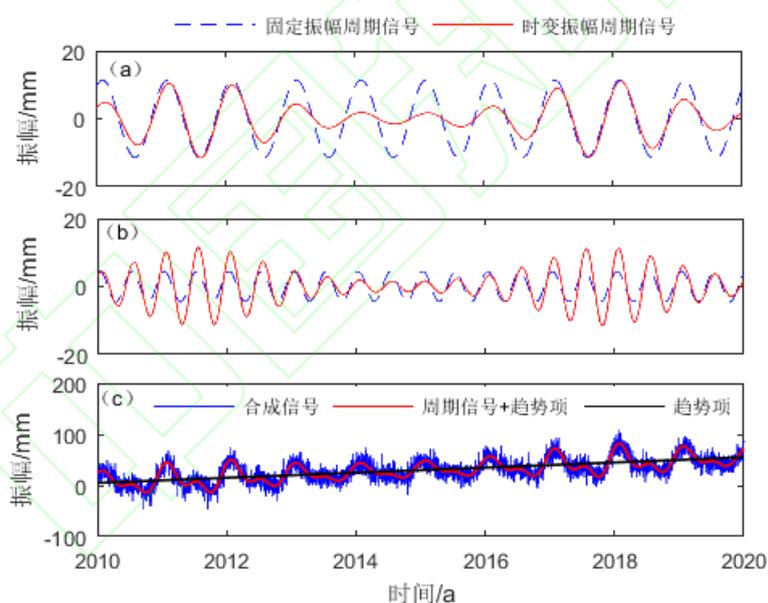


图 1 模拟信号

Fig.1 Simulated Signal

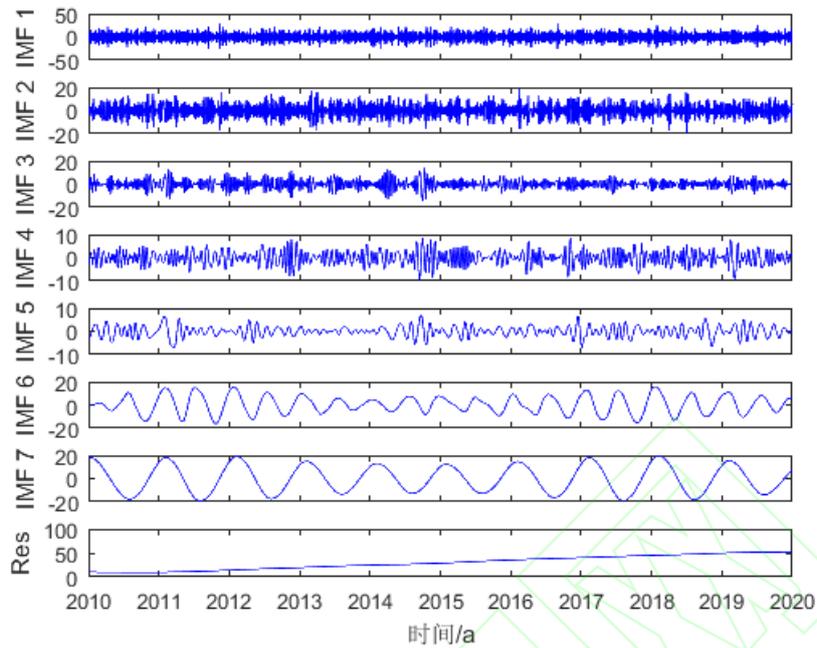


图 2 模拟信号的 EMD 分解

Fig.2 EMD Decomposition of Simulated Signal

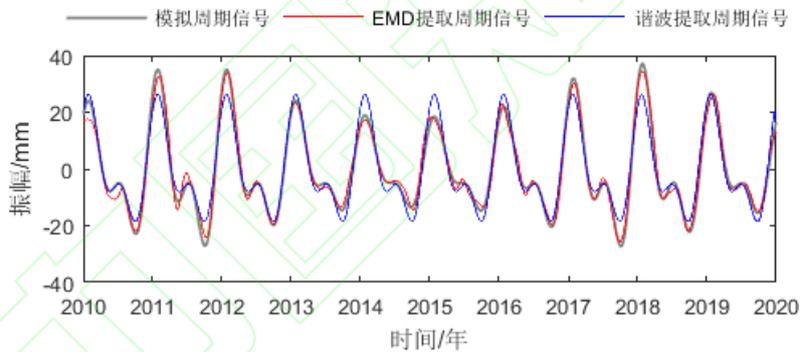


图 3 周期信号对比图

Fig.3 3 Periodic Signals Contrast Diagram

3 GNSS 时间序列周期项提取与应用

3.1 GNSS 数据及处理

本文选取的“陆态网络”和“网络工程”GNSS 连续和流动观测数据，利用 GAMIT/GLOBK^[24] 软件解算完成。首先，利用 GAMIT 获得全球 IGS 站与区域 GNSS 测站的单日松弛解，天线相位中心改正采用绝对天线相位中心模型，大气折射模型采用 VMF1 映射函数，全球固体潮、海潮模型改正遵循 IERS2003 协议，但未进行大气荷载模型改正。之后，将 IGS 站点作为固定框架站点，利用 GLOBK 进行平差，估算出区域站在 ITRF2014 参考框架下的点位坐标时间序列及误差。最后，修复

时间序列因天线更换、强震同震位移等影响造成的阶跃，并剔除异常值。为了便于周期信号的提取，采用最小二乘法去除时间序列中的线性趋势项^[12]。

3.2 周期项提取分析

为了检验谐波模型和 EMD 方法对周期项的改正效能，本文实际资料选取川滇地区数据记录完整率在 95% 以上的 24 个连续站和 2 个流动站（图 4）2011 年 1 月-2020 年 12 月期间的时间序列进行处理。因篇幅限制，以 SCXD 站（四川喜德）南北向时间序列为例，对实际数据 EMD 周期项提取进行说明。

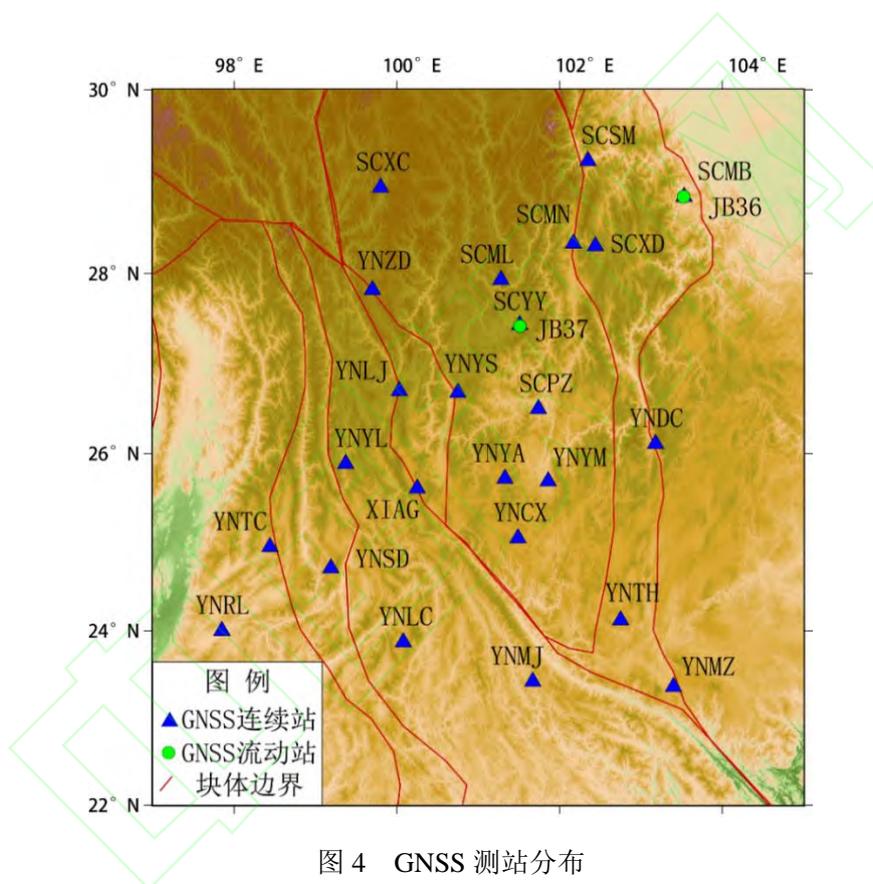


图 4 GNSS 测站分布

Fig.4 Distribution of GNSS Stations

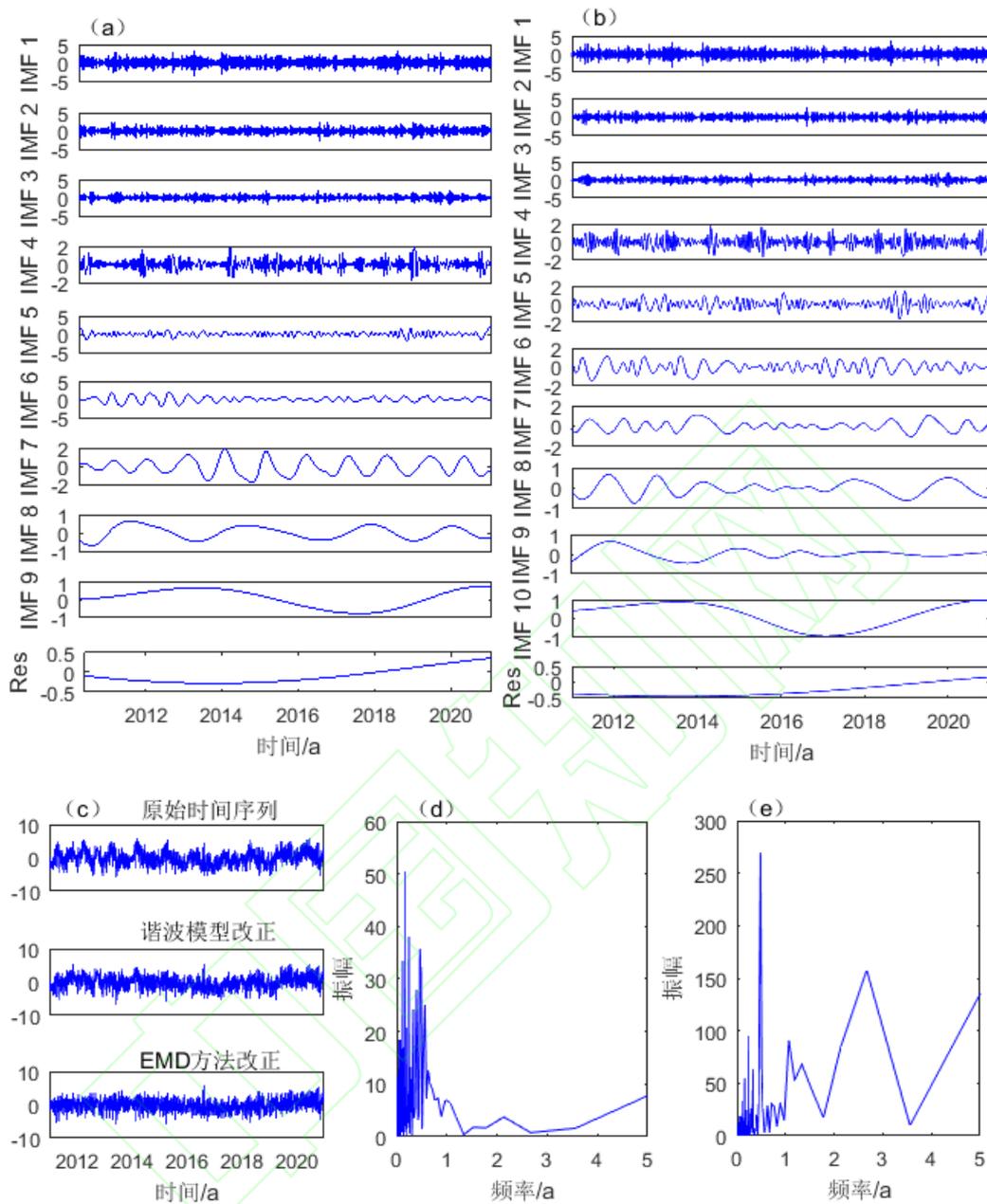


图5 SCXD站南北向时间序列分析

Fig.5 Analysis of SCXD Station Up Direction

图5 (a) 为 SCXD 站南北向时间序列 EMD 分解的 10 个分量，利用相关系数法确定前 5 项为高频噪声，IMF6~IMF9 为周期项重构信号，Res 为趋势项。其中，IMF6 主要为 0.5a 信号，此外还有弱 0.4a 信号，IMF7 主要为 1.0a 信号和弱 0.76a 信号，IMF8 主要为 2.67a 信号。由于信号总长度为 10a，由奈奎斯特采样定理可知其最大只能表征周期为 5a 的周期信号，故 IMF9 可能为 10a 或更长趋势周期信号，FFT 给出其周期为 10.67a。图 5 (b) 为谐波模型周期项修正后的时间序列 EMD

分解后的 IMF 分量。图 5 (c) 为原始时间序列及经谐波模型和 EMD 方法改正后的时间序列。图 5 (d) 为 EMD 改正后残余时间序列的快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 频谱, 其不再含有明显的周期信号, 主要为高频噪声。图 5 (e) 为谐波模型改正后残余时间序列的 FFT 频谱, 结合图 5 (b) 可以发现, 虽然幅值有所降低但依然残留有显著的 0.5a、1.0a 和 2.67a 周期信号, 说明谐波模型改正并不能很好消除周期信号的影响。整体来看, 原始时间序列经 EMD 改正后比谐波模型改正后更加平稳, $RMS^{[25]}$ 由改正前的 1.90mm, 降为 1.69mm 和 1.46mm, 表明 EMD 方法对周期信号提取更具优越性。

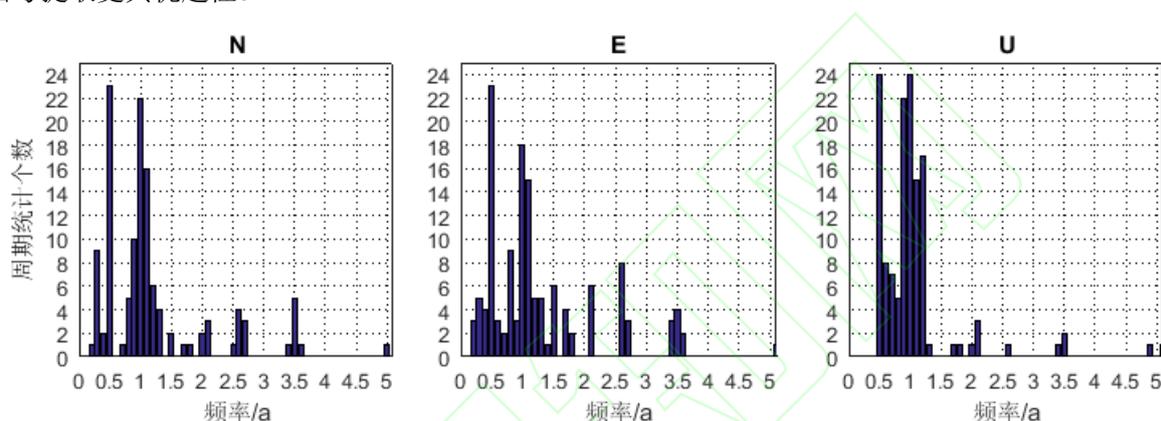


图 6 24 个台站 EMD 方法提取周期项信息统计结果

Fig.6 Statistical Results of Cycle Item Information Extracted by the EMD Method of 24 Stations

在实际资料利用 EMD 方法分解时, IMF 分量一般小于 13 个, 其中有效周期分量一般不多于 7 个, 所以我们利用快速傅里叶变换探测其周期成分时主要选取前 7 种周期。图 6 为川滇地区 24 个台站 N、E、U 三方向数据利用 EMD 方法提取的周期项经快速傅里叶变换后分别取前 7 种主要频率成分的统计结果。结果显示, N、E 方向周期成分较为分散、复杂, 主要周期为 0.5a 和 1.0a, 此外还有明显的 1.1a 周期项, 但并不是每一个台站都具有年周期和半年周期成分, 特别是 E 方向有 6 个台站不具有年周期; U 方向优势周期较多、且集中, 24 个台站均具有 0.5a 和 1.0a 周期项, 此外还有显著的 0.9a、1.1a 和 1.2a 成分, 一个比较有意思的现象是小于 0.5a 周期并不是其主要的 7 个成分之一, 虽然在单个台站资料处理时确实发现有小于半年周期项的存在, 但在周期成分中占比较低。此外, 结果显示部分台站三方向还具有 2.0a、2.5a 或 3.5a 长周期成分, 导致此现象的原因目前还不明确, 需要进一步研究。

表 1 谐波模型与 EMD 方法提取周期项相关系数

Tab.1 Periodic Term Correlation Coefficient of Harmonic Model and EMD Method

站名	相关系数			站名	相关系数		
	N	E	U		N	E	U
SCMB	0.69	0.43	0.83	YNLJ	0.76	0.61	0.91
SCML	0.60	0.65	0.89	YNMJ	0.52	0.37	0.83
SCMN	0.67	0.36	0.91	YNMZ	0.36	0.60	0.82
SCPZ	0.70	0.54	0.90	YNRL	0.65	0.42	0.89
SCSM	0.74	0.53	0.91	YNSD	0.57	0.48	0.93
SCXC	0.61	0.79	0.91	YNTC	0.67	0.27	0.92
SCXD	0.73	0.42	0.90	YNTH	0.75	0.46	0.83
SCYY	0.63	0.43	0.90	YNYA	0.73	0.52	0.84
XIAG	0.52	0.56	0.80	YNYM	0.56	0.14	0.85
YNCX	0.65	0.58	0.88	YNYL	0.79	0.40	0.72
YNDC	0.62	0.55	0.79	YNYS	0.83	0.39	0.92
YNLC	0.53	0.51	0.85	YNZD	0.72	0.67	0.79

表 1 为谐波模型和 EMD 方法提取周期项之间的相关系数，其中 N、E、U 三方向平均相关系数分别为 0.65、0.49 和 0.86，说明两种方法提取到的周期项具有较好一致性。综合图 6 分析，整体水平 N 向振幅相对 E 向较大，周期信号明显，集中在 0.5a 和 1.0a 附近，两种方法相关系数较高。反之，E 向除优势周期信号外，其他信号成分分布较散，相关系数低，不同台站周期项形态差异也较大，其原因可能是水平向内时间序列除了受区域整体年周期、半年周期因素影响外，应该也叠加了局部因素影响。U 方向，信号具有明显的周期性，且两种方法结果相关性很强，说明两种方法在垂向对周期信号的提取均有较好的结果，但从形态和 FFT 频率来看，EMD 方法提取的周期信息更丰富、全面。

表 2 为 24 个测站时间序列的 RMS，结果表明两种修正方法较原始序列均有明显的改进。N 方向原始时间序列平均 RMS 为 2.13mm，相比于谐波模型改正后的 1.94mm，EMD 方法为 1.70mm，提升了 11.07%。E 方向平均 RMS 改正稍差，原始序列为 2.34mm，谐波模型改正后为 2.26mm，EMD 方法为 2.07mm，比谐波模型提高 8.06%。U 方向平均改进效果最好，EMD 方法由原始序列的 8.29mm 降低到 5.10mm，提升 38.50%，比谐波模型提升 10.28%。从单个台站三分量来看，EMD 方法比谐波模型改正均有不同程度的改善，说明 EMD 方法对非构造周期信息的提取更充分，对周期项的修正效果更好。

表 2 测站时间序列的 RMS (mm)

Tab.2 RMS of Stations (mm)

站名	原始序列			谐波改正			EMD 改正		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
SCMB	2.26	2.58	6.89	2.10	2.53	5.40	1.92	2.28	4.90
SCML	2.17	2.93	9.71	2.08	2.77	6.28	1.82	2.61	5.29

SCMN	1.78	1.67	6.60	1.58	1.63	4.46	1.37	1.49	4.21
SCPZ	1.61	1.90	6.98	1.45	1.86	4.72	1.29	1.67	4.30
SCSM	1.95	1.93	7.82	1.78	1.85	5.23	1.65	1.70	4.72
SCXC	1.70	1.77	6.54	1.56	1.50	4.15	1.31	1.33	3.58
SCXD	1.90	1.91	6.80	1.69	1.88	4.90	1.46	1.75	4.30
SCYY	1.96	1.49	6.76	1.69	1.46	4.37	1.50	1.36	3.81
XIAG	3.15	4.71	9.45	3.05	4.55	8.14	2.95	4.37	7.04
YNCX	2.07	2.12	8.04	1.81	2.06	5.75	1.42	1.89	5.14
YNDC	2.01	2.44	8.91	1.89	2.36	7.19	1.75	2.13	6.12
YNLC	2.10	3.27	9.96	1.96	3.20	7.31	1.67	2.95	5.88
YNLJ	2.03	1.66	7.38	1.68	1.55	4.83	1.25	1.42	4.25
YNMJ	1.99	2.09	9.39	1.87	2.04	6.76	1.60	1.87	5.48
YNMZ	2.49	2.56	8.50	2.43	2.46	7.08	2.06	2.29	6.41
YNRL	2.32	2.35	8.62	2.10	2.24	5.99	1.74	1.87	5.11
YNSD	2.30	2.36	9.39	2.09	2.31	6.11	1.72	2.14	5.74
YNTC	1.80	1.97	10.27	1.62	1.94	6.67	1.39	1.62	6.46
YNTH	1.94	2.05	7.22	1.77	1.94	5.37	1.67	1.59	4.42
YNYA	1.77	1.90	8.20	1.60	1.81	5.62	1.42	1.72	4.41
YNYM	2.06	2.48	8.45	1.95	2.38	6.24	1.67	2.23	5.56
YNYL	2.09	2.35	11.57	1.79	2.31	9.08	1.58	2.10	5.89
YNYs	2.06	1.97	8.29	1.58	1.95	5.45	1.33	1.81	4.83
YNZD	3.53	3.66	7.20	3.38	3.54	5.70	3.30	3.42	4.51

3.3 周期信号对流动观测的影响

通过对不同 GNSS 连续站时间序列分析，可以发现 EMD 方法能够根据信号的自身特性，自适应地对非构造变形的周期信号进行定量分离，刻画出更多细节变化，具有更高的应用价值。

由于流动 GNSS 观测采用漫游式观测，每期间隔 1~3 年，每期观测 4 天，每期观测时间不固定，耗费大量的人力物力，但取得的数据量较少，导致速度场求解精度不高，且部分区域 N、U 向周期性明显，特别是 U 向影响较大，所以周期项改正十分必要。目前，已有一些文献[26-30]提出利用流动 GNSS 测站周边的多台连续站修正流动站的周期项影响，并取得了较好成果，但其采用的多为谐波改正模型。本文利用 EMD 方法对周期项进行修正，并进一步探讨利用改正后的连续站时间序列模拟流动观测，在积累多少期观测资料的情况下才能获得比较准确的运动速度，以便为流动 GNSS 观测的周期修正和实施提供参考意见和理论依据。

对研究区选取 8 个连续站三分量时间序列分别进行最小二乘拟合作为参考速度。假设每年随机选取连续 4 天作为一期流动观测资料，查看 EMD 方法需要多少期观测修正才能够达到与参考速度速 95%的差值在 N、E 向小于 1mm/a，在 U 向小于 3mm/a。

表 3 为按上述要求模拟了 10000 次原始时间序列、谐波模型修正和 EMD 方法修正后拟合速度的统计结果信息。标准差变化，N 方向，谐波模型平均提高 11.16%，EMD 方法平均提高 24.33%；E 方向，谐波模型平均提高 5.63%，EMD 方法平均提高 17.88%；U 方向，谐波模型平均提高 37.54%，EMD 方法平均提高 47.15%。

表 4 为利用原始时间序列和 EMD 方法修正周期项后，模拟流动观测满足上述条件要求时所需的观测期数。对比表 3，可以发现周期项对观测资料的影响不可忽略，十分有必要对其进行修正，周期项修正不仅可以提高数据的实际应用价值，在相同目标要求下还可以减少外业工作期数。EMD 方法较谐波模型对周期项的修正效能有很大的提升，周期性越明显改进效果越好，这一点也可以通过三个方向结果进行对比验证，即 U 向改正效果最好，N 向次之，E 向最差。

表3 谐波模型和 EMD 方法周期项修正

Tab.3 Periodic Term Correction of Harmonic Model and EMD Method

站点		原始速度信息统计 (mm/a)				谐波改正速度信息统计 (mm/a)				EMD 改正速度信息统计 (mm/a)				标准差减小百分比	
		<1	1~3	>3	标准差	<1	1~3	>3	标准差	<1	1~3	>3	标准差	谐波	EMD
SCMB	N	9529	471	0	0.49	9823	177	0	0.43	9838	162	0	0.42	13.09%	13.89%
	E	9125	875	0	0.57	9250	750	0	0.55	9739	261	0	0.46	3.48%	18.90%
	U	5048	4590	362	1.45	6835	3128	37	0.99	7756	2235	9	0.83	31.62%	42.60%
SCXC	N	9226	774	0	0.59	9490	510	0	0.55	9880	120	0	0.47	7.42%	20.12%
	E	9469	531	0	0.52	9826	174	0	0.42	9956	44	0	0.35	20.27%	32.76%
	U	3803	4865	1332	1.97	6385	3571	44	1.07	7631	2364	5	0.82	45.68%	58.52%
SCXD	N	9245	755	0	0.56	9626	374	0	0.49	9919	81	0	0.39	13.15%	30.56%
	E	9093	907	0	0.61	9187	813	0	0.59	9510	490	0	0.54	2.30%	10.59%
	U	3853	4974	1173	1.95	5738	4097	165	1.25	6501	3462	37	1.06	35.73%	45.75%
SCYY	N	8786	1214	0	0.63	9493	507	0	0.54	9620	380	0	0.48	15.68%	24.57%
	E	9881	119	0	0.39	9915	85	0	0.38	9971	29	0	0.34	4.44%	13.79%
	U	3577	4864	1559	2.08	6146	3754	100	1.16	7192	2762	46	0.94	44.29%	54.52%
YNMJ	N	9387	613	0	0.53	9573	427	0	0.49	9889	111	0	0.41	7.98%	22.33%
	E	9306	694	0	0.55	9410	590	0	0.53	9682	318	0	0.46	4.17%	16.53%
	U	2599	4423	2978	2.84	3972	4722	1306	1.98	4181	5251	568	1.61	30.40%	43.26%
YNSD	N	8878	1122	0	0.63	9301	699	0	0.55	9759	241	0	0.45	12.07%	28.96%
	E	9145	855	0	0.58	9251	749	0	0.56	9599	401	0	0.47	3.53%	18.56%
	U	2812	4352	2836	2.76	4569	4815	616	1.61	4760	4744	496	1.51	41.54%	45.26%
YNTH	N	9405	595	0	0.53	9634	366	0	0.48	9791	209	0	0.45	11.49%	27.43%
	E	9398	602	0	0.54	9574	426	0	0.50	9985	15	0	0.30	1.53%	16.26%
	U	3542	5114	1344	2.01	5644	4189	167	1.27	7702	2280	18	0.85	37.24%	43.05%
YNYM	N	9808	192	0	0.43	9879	121	0	0.39	9980	20	0	0.31	8.39%	26.80%
	E	9299	701	0	0.56	9438	562	0	0.53	9723	277	0	0.47	5.35%	15.65%
	U	4116	4907	977	1.82	6100	3707	193	1.20	6927	3003	70	1.01	33.78%	44.27%

表 4 模拟流动观测期数

Tab.4 Number of Simulation Flow Observation Periods

站名	SCMB	SCXC	SCXD	SCYY	YNMJ	YNSD	YNTH	YNYM
EMD 修正期数	6	5	5	5	5	5	5	6
原始数据期数	8	6	6	6	6	8	7	7

3.4 实际流动观测资料分析

如图 4 所示，所选研究区内有 2 对相距较近连续站和流动站，并有满足修正后理论上所需最少流动观测期数的观测数据，以便开展实际对比分析，具体信息见表 5。

表 6 为分别利用 SCMB 和 SCYY 连续站资料对 JB36 和 JB37 流动站进行三分量周期项改正后的拟合速度和 RMS 值，并给出了连续站的重合观测期间的拟合速度。图 7 为两个连续站的时间序列及其线性拟合速度直线，以及两个流动观测站周期项修正前后的时间序列及其线性拟合速度直线。可以发现 EMD 方法改正后流动时间序列分布更加集中，但由于两个连续站和流动观测零值点起始年份分别为 2010 年和 1998 年，以及观测站址、环境条件、构造活动剧烈等因素综合影响，虽然两组台站相距很近，但拟合速度依然有明显的差别，特别是 SCYY 组垂向有着正负相反的变化趋势。从 RMS 值看，谐波模型无论垂向还是水平方向对流动站的改正效果都不理想，修正效果不稳定，甚至越来越差，而 EMD 方法除 JB37 站 N 向有 0.01mm 升高外，其他值均有一定的改正效果，特别是垂直方向，说明该方法对非构造信息的去除更加稳定可靠。从整体上看，在水平方向，流动站和连续站均能很好的反映出本区域的构造运动趋势，但是由于其他构造和非构造因素的综合影响，即使相距很近的两个台站运动速度也可能有一定差异，数据长度足够时周期信号对结果的影响并不太大；在垂直方向，周期项的影响很大，无论连续站还是流动站都十分有必要对其修正，在同一区域不同台站的主要周期信号一般具有较好的一致性，但即使相距很近其运动趋势也可能存在很大的差异，说明垂向运动不仅与区域整体运动有关，局部影响因素也很关键。

表 5 2 对连续站-流动站观测信息

Tab.5 2 Pairs of Continuous Station-Mobile Station Observation Information

连续站-流动站	距离 (km)	流动观测年份	重复期数
SCMB-JB36	< 0.8	2011, 2013, 2014, 2015, 2017, 2018	6
SCYY-JB37	< 1.4	2011, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018	7

表 6 流动站周期项改正后拟合速度与 RMS

Tab.6 Fitted Velocity after Correction of the Mobile Station Period Term and RMS

站名		拟合速度 (mm/a)				RMS (mm)		
		连续站	流动站	谐波改正	EMD 改正	原始序列	谐波改正	EMD 改正
JB36	N	-9.17	-10.09	-10.00	-9.87	21.31	21.07	20.98
	E	34.61	35.32	35.35	35.05	75.27	75.31	75.00
	U	-0.04	-1.01	-1.36	-1.06	6.46	7.14	6.32
JB37	N	-18.00	-17.82	-17.92	-17.86	48.01	48.29	48.02
	E	38.11	37.60	37.63	37.51	103.50	103.59	103.29
	U	-0.25	2.73	2.46	2.74	10.58	9.03	8.61

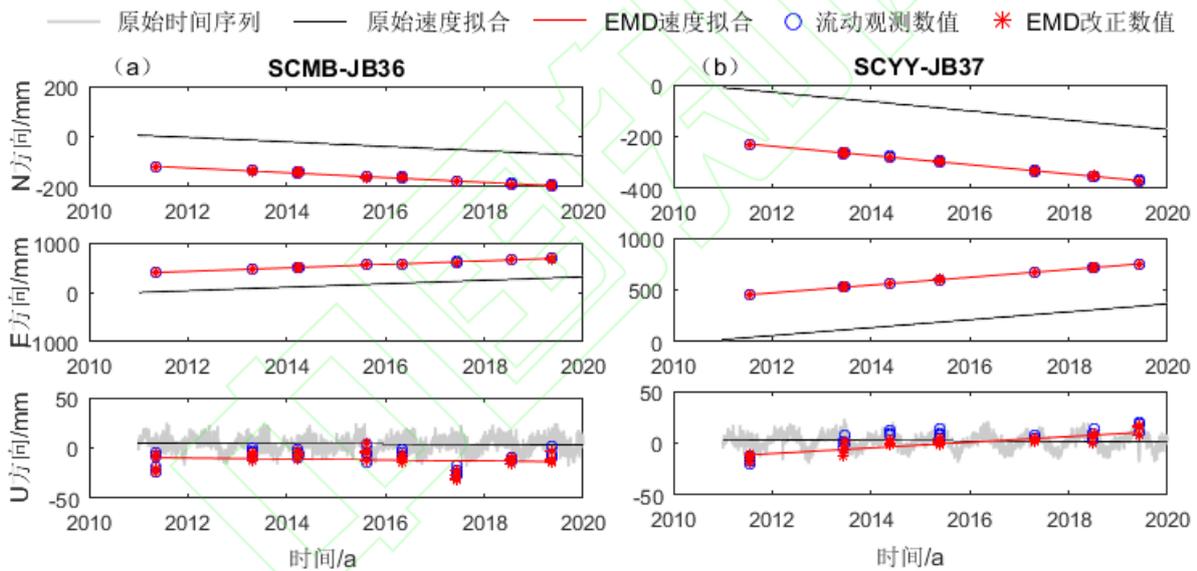


图 7 连续站-流动站周期项修正与速度拟合

Fig.7 Term Correction of Continuous Station-Mobile Station Period and Velocity Fitting

4 结论

通过模拟实验与实际 GNSS 数据的坐标时间序列分析证明, EMD 方法可以有效提取出非构造因素引起的周期项变化, 其成分、幅值和周期变化更符合实际观测情况, 蕴含丰富的非构造运动信息和物理意义, 在时间序列分析中具有一定的优越性, 相比较于传统谐波改正模型也是一种方法上的新应用尝试。此外, 本文首次探索利用 EMD 方法对连续观测资料进行周期项修正后模拟流动观

测, 查看需要多少期观测才能获取比较可靠的台站运动速度, 以便为不同地区流动观测的实施和资料修正提供一些参考依据, 并获得了一些有意义的结果, 并得出以下结论:

(1) 川滇地区不同台站模拟流动观测拟合速度经 EMD 方法修正后最少 5 期, 最多 6 期即可达到目标要求, 如果只对水平方向修正所需的期数会更少; (2) 川滇地区 GNSS 连续站垂直向运动周期性明显, 大部分台站南北向周期性强于东西向, 但也存在个别不同情况; (3) 数据离散程度越大所需观测期数越多, 周期性越强修正效果越好; (4) 台站运动周期项的频率、幅值及其每年最大值出现的时间并不是固定不变的, 可能还与每年具体影响因素的强弱有关; (5) 不同台站运动的时间序列不仅存在 0.5a、1.0a, 还可能还存在 0.9a、1.1a、2.0a 等以往方法很难探测出的周期信号^[9,15,24]; (6) 本文 10000 次统计模拟数据为每年随机选取, 不排除包含相邻两期数据一个在年尾一个在年初的极端情况, 如果近均匀选取所得结果可能会更好, 在实际野外流动观测作业时, 为了减弱周期项的影响建议每期观测选择在相同的月份或季节; (7) 在利用连续观测资料对流动观测资料进行周期项修正时, 建议综合周围其他连续观测资料, 选取最新时间序列变化平稳的时段资料进行周期项提取修正工作, 以消除诸如大震、局部场地变化、仪器维修更换等引起的阶跃和趋势项转折等变化性影响; (8) EMD 方法在周期项修正上明显优于谐波模型改正方法, 并且不需给出先验拟合模型, 它会根据信号的自身特性将信号分解为不同尺度的 IMF 分量, 各分量所蕴含的具体物理意义还需后续工作进一步研究; (9) 利用相关系数方法确定 IMF 分量噪声和信号分界点时, 可能会存在临近一个高频分量划分不准的问题, 需要后续工作完善改进, 对于复杂信号趋势项和周期信号区分问题, 可以通过 FFT 频谱来确定; (10) EMD 方法为周期项提取和修正提供了一种新的思路和途径, 但也存在端点效应和模态混叠问题, 在实际资料处理应用时还有很大改进空间。

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改意见和建议使本文得以完善; 感谢中国地震局第一监测中心提供的 GNSS 数据资料。

参考文献

- [1] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Wanke, et al. Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-Linear Non-linear Variation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010,35(6):665-669 (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)
- [2] Wang Min, Sheng Zhengkang. Present-day Tectonic Deformation in Continental China: Thirty Years of GPS Observation and Research [J]. *Earthquake Research in China*, 2020,36(4):660-683 (王敏,沈正康. 中国大陆现今构造变形:三十年的GPS观测与研究[J]. 中国地震, 2020,36(4):660-683)
- [3] Dong D, Fang P, Bock Y, Chen M K, Miyazaki S. 2002. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from

- GPS-Derived Site Position Time Series. *Journal of Geophysical Research*, 107: B4.
- [4] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Hongfei, et al. Cause Analysis of the Non-linear Variation of the IGS Reference Station Coordinate Time Series inside China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7):2228-2237 (姜卫平,李昭,刘鸿飞,等. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J].地球物理学报, 2013, 56(7):2228-2237)
- [5] Ming Feng, Yang Yuanxi, Zeng Aamin, et al. Analysis of Seasonal Signals and Long-Term Trends in the Height Time Series of IGS Sites in China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2016, 59:1283-1291 (明锋,杨元喜,曾安敏,等. 中国区域 IGS 站高程时间序列季节性信号及长期趋势分析[J]. 中国科学:地球科学, 2016,46(6):834-844+1-3)
- [6] Jiang W, Yuan P, Chen H, et al. Annual Variations of Monsoon and Drought Detected by GPS: A Case Study in Yunnan, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):5874.
- [7] Zhan Wei, Li Jingwei. Extraction and Analysis of the Common-Mode Component of GNSS Time Series in Yunnan [J]. *Journal of Seismological Research*, 2021, 44(1):56-63 (占伟,李经纬. 云南 GNSS 时间序列共模分量提取分析[J]. 地震研究, 2021, 44(1):56-63)
- [8] 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)
- [9] Davis J L, Wernicke B P, Tamisiea M E. On Seasonal Signals in Geodetic Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(B01403).
- [10] Chen Q, Van Dam T, Sneeuw N, et al. Singular Spectrum Analysis for Modeling Seasonal Signals from GPS Time Series [J]. *Journal of Geodynamic*, 2013, 72:25-35
- [11] Zhou Maosheng, Guo Jinyun, Shen Yi, et al. Extraction of Common Mode Errors of GNSS Coordinate Time Series Based on Multi-Channel Singular Spectrum Analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 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)
- [12] Gruszczynska M, Rosat S, Klos A, et al. Multichannel Singular Spectrum Analysis in the Estimates of Common Environmental Effects Affecting GPS Observations [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018,175(5).
- [13] Zhang Jing, Wang Xiaoya, Hu Xiaogong. Analysis of GPS Stations' Time Series Based on PCA Method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(6):613-619 (张晶,王小亚,胡小工. 基于 PCA 方法的 GPS 台站时间序列分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(6):613-619)
- [14] 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 A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995
- [15] Cui Chengeng. Application of a Combined Method of Filtering to GPS Dynamic Observation [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2020, 32(3):40-45 (崔晨耕. 一种组合滤波法在GPS动态观测中的应用 [J].甘肃科学学报, 2020,32(3):40-45)
- [16] Chen C H, Wen S, Liu J Y, et al. Surface Deformation and Seismic Rebound: Implications and Applications [J]. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32:291-313
- [17] Chen C H, Wen S, Yeh Ta-Kang, et al. Observation of Surface Displacements from GPS Analyses before and after the Jiashian Earthquake (M=6.4) in Taiwan [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62:662-671

- [18] C. H.Chen, C. H. Wang, S. Wen, Yeh T K, et al. Anomalous Frequency Characteristics of Groundwater Level before Major Earthquake in Taiwan [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17:1693-1703
- [19] Feng Wei, Ren Jinwei, Jiang Zaisen. GPS Station Short-Term Dynamic Characteristics of Micro Displacement before Menyuan M6.4 Earthquake [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7(4):237-244
- [20] Jia Ruisheng, Zhao Tongbin, Sun Hongmei, et al. Micro-Seismic Signal De-noising Method Based on Empirical Mode Decomposition and Independent Component Analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3):1013-1022 (贾瑞生,赵同彬,孙红梅,等. 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)
- [21] 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. 基于交叉认证的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(4):450-453)
- [22] Lu Tieding, Qian Wenlong, He Xiaoxing, et al. An Improved EMD Method for Determining Boundary IMF [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(7):720-725 (鲁铁定,钱文龙,贺小星,等. 一种确定分界IMF分量的改进EMD方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(7):720-725)
- [23] Guo Xiang. Research on GPS signal denoising based on EMD [D]. East China University of Technology, 2016 (郭翔. EMD在GPS信号去噪中的应用研究[D]. 东华理工大, 2016)
- [24] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT, Version 10.4 [R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010
- [25] Van Dam, T. M., Wahr, J., Lavallée, D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112, B03404.
- [26] Liu Renli, Li Jiancheng, Jiang Weiping, et al. Comparing Vertical Surface Displacements Using GRACE and GPS over Shanxi Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4):426-430 (刘任莉,李建成,姜卫平,等. 联合GRACE与GPS比较山西省垂向地表形变[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2013, 38(4):426-430)
- [27] Zhan Wei, Li Fei, Zhu Shuang, et al. Analysis and Test of Correction to Vertical Velocity Measured by GPS Mobile Observation with Continuous Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7):963-968 (占伟,李斐,朱爽,等. 应用GPS 连续观测修正流动观测垂向速率的分析与试验[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2016, 41(7): 963-968)
- [28] Zhan Wei, Li Fei, Hao Weifeng, et al. Regional Characteristics and Influencing Factors of Seasonal Vertical Crustal Motions in Yunnan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 210(3): 1295-1304
- [29] Li Jingwei, Zhan Wei, Liang Hongbao, et al. Accurate Acquisition and Method Evaluation of GPS Annual Vertical Motion [J]. *Journal of Seismological Research*, 2020, 43(1):95-100 (李经纬,占伟,梁洪宝,等. GPS垂向年周期运动的精确获取与方法评估[J]. 地震研究, 2020, 43(1):95-100)
- [30] Liang Hongbao, Zhan Wei, Li Jinwu. Vertical Surface Displacement of Mainland China from GPS Using the Multisurface Function Method [J]. *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.024>

Application of EMD in GNSS Time Series Periodic Term Processing

LIU Xikang^{1,2} DING Zhifeng¹ LI Yuan² LIU Zhiguang²

1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2 First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

Abstract: Global Navigation Satellite System (GNSS) position time series usually includes both tectonic and non-tectonic deformation information, have the characterizes of complex components, difficult modeling, and difficult to effectively separate the non-tectonic signals from original time series. How to remove the non-tectonic deformation information is very important for the accurate and effective application of the observation data. Empirical Mode Decomposition (EMD) is an adaptive time-frequency processing method, we use this method to correct the period term of 24 GNSS continuous station time series in Sichuan and Yunnan areas. The results show that the correction of the periodic term is necessary, EMD method is able to extract the periodic components of different frequencies and amplitudes adaptively according to each station's own characteristics, which is also more in line with the actual situation. The average Root Mean Square error (RMS) is reduced by 19.96%, 11.57% and 38.50% compared to the original time series of N, E and U direction, respectively. It is a more accurate and effective method than harmonic model correction. Then, we use the modified continuous station time series to simulate the mobile observations, found that relatively reliable motion velocities can be obtained after 5~6 years/period of observations. The stability and reliability of the EMD method were verified by correcting the period term of the mobile station with the actual continuous observation station at a closer distance, which also provides a reference and theoretical basis for the implementation of mobile GNSS observations and the correction of observation data.

Key Words: global navigation satellite System; periodic motion; mobile observation; harmonic models; empirical mode decomposition

First author: LIU Xikang, PhD candidate, specializes in surface deformation and underground structure.
E-mail: xikangliu@126.com

Corresponding author: DING Zhifeng, professor. E-mail: dingzf@cea-igp.ac.cn

Foundation support : The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1503606) ; Earthquake Tracking Project of China Earthquake Administration (2020010226, 2021010511); The National Natural Science Foundation of China(41472180)

网络首发:

标题: EMD 在 GNSS 时间序列周期项处理中的应用

作者: 刘希康, 丁志峰, 李媛, 刘志广

收稿日期: 2021-01-19

DOI:10.13203/j.whugis20210029

引用格式:

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]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210029 (LIU Xikang, DING Zhifeng, LI Yuan, et al. Application of EMD in GNSS Time Series Periodic Term Processing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210029)

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:

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

戴海亮, 孙付平, 姜卫平, 肖凯, 朱新慧, 刘婧

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 371-380

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190107>

一种改进的 BDS-2/BDS-3 联合精密定轨系统偏差处理模型

胡超, 王中元, 王潜心, 饶鹏文

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 360-370

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190132>

使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差

周仁宇, 胡志刚, 蔡洪亮, 赵镇, 饶永南, 陈良, 赵齐乐

武汉大学学报·信息科学版, 2021, doi: 10.13203/j.whugis20200182

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200182>