

单历元 GPS 变形信息特征提取的 EMD 方法

范 千^{1,2}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 江西 抚州 344000)

摘要:为了准确地对单历元 GPS 变形信息特征进行提取,提出应用 EMD(经验模式分解)方法对变形数据进行去噪处理。通过对实际工程算例进行分析并与小波变换及中值滤波方法进行对比,结果表明:EMD 方法的去噪效果优于中值滤波方法,同时 EMD 方法具有自适应滤波去噪的功能,避免了应用小波去噪时其效果与小波基函数的选择相关的缺陷。在对变形数据进行有效去噪的基础上,应用 EMD 方法可以完成对单历元 GPS 变形信息进行有效识别并提取出微弱的变形特征。

关键词:单历元;全球定位系统;变形信号;特征提取;经验模式分解

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0078-05

Empirical Mode Decomposition Method for Single Epoch GPS Deformation Information Characteristic Extracting

FAN Qian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Digital Land Key Laboratory of Jiangxi Province, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi 344000, China)

Abstract: In order to extract single epoch GPS deformation information accurately, a method using Empirical Mode Decomposition (EMD) for deformation data denosing processing is presented. Through analyzing practical GPS deformation monitoring data, and comparing EMD with wavelet transform and median value filter, the results showed that: denosing effect of EMD is better than median filter method. Meanwhile, data denosing with EMD can avoid the defect that denosing effect of wavelet transform is related with choice of wavelet basis function, because EMD has an advantage to do adaptive filtering noise cancellation. Based on effective denosing for GPS deformation monitoring data, this method can achieve effective recognition for single epoch GPS deformation information. Then, weak deformation characteristics information can be extracted.

Key words: single epoch; GPS; deformation signal; characteristic extracting; empirical mode decomposition

在 GPS 动态监测中,单历元解算方法具有无需初始化且对周跳和卫星失锁不敏感等优点^[1-4],但单历元 GPS 监测数据属于高采样频率数据,在实际解算过程中易受到多路径效应、电离层延迟、对流层延迟等多种因素的影响,导致解算出的变形位移信息中含有大量噪声存在。为了准确可靠地提取有用的变形特征,需对原始变形信息进行有效的去噪处理。目前,一般采用的处理方法有数据平滑、Kalman 滤波、小波分析等,其中以小波分析方法研究的最为广泛,并已取得良好的去噪效果^[5-6]。但是,利用小波分析方法对 GPS 变形位移序列数据进行去噪时,需预先指定其小波基函数和分解尺度,而这些设置一般依靠经验来进行确定,所以

收稿日期:2011-06-15

基金项目:江西省数字国土重点实验室开放基金项目(DLLJ201102);福建省教育厅科技项目(JA10045);福州市科技计划项目(2011-S-84);福建省自然科学基金项目(2009J05102);福州大学科研启动基金项目(022355)。

作者简介:范 千(1981—),男,安徽无为为人,讲师,博士,主要从事变形监测数据处理、GPS 定位技术及应用研究。

E-mail:fanqian1981@163.com.

小波分析法并不是一种自适应的去噪方法。

Huang 等^[7]于 1998 年提出了一种新的处理非线性、非平稳信号的方法——经验模式分解 (empirical mode decomposition, EMD)。该方法吸取了小波变换的多分辨率分析的优点,并克服了小波变换中需要选取小波基函数的困难,可自适应地对原始信号进行分解。鉴于此,本文将此方法引入至单历元 GPS 变形特征信息提取中,并以工程实例验证了其可行性和有效性。

1 基本原理

1.1 经验模式分解

经验模式分解方法基于信号本身的局部特征尺度,可自适应地把复杂的信号分解为若干个固有模式函数 (intrinsic mode function, IMF) 之和^[8-9]。IMF 需满足以下两个条件:

1) 在整个数据序列中,极值点的数目与零点的数目相等或最多相差 1;

2) 在任何一点,由数据序列的局部极大值点构成的上包络线和局部极小值点构成的下包络线均值为 0,即信号关于时间轴局部平均对称。

但在实际中,由于信号通常都是非线性、非稳态的,不满足构成固有模式函数 (IMF) 的条件。为此,需采用一种所谓“筛选”算法,将复杂信号进行分解。其基本步骤如下:

1) 确定出信号 $x(t)$ 的所有局部极值点,然后将所有的局部极大值点和极小值点用三次样条曲线进行连接,形成上下包络线 $u_{\max}(t)$ 和 $u_{\min}(t)$ 。

2) 根据极大值包络线与极小值包络线求取均值包络线。记为

$$m(t) = (u_{\max}(t) + u_{\min}(t))/2。 \quad (1)$$

3) 计算 $x(t)$ 与 $m(t)$ 的差值。记为

$$d(t) = x(t) - m(t)。 \quad (2)$$

4) 判断 $d(t)$ 是否满足 IMF 的条件。如果满足条件,则 $d(t)$ 为第一个 IMF;如果不满足条件,则将 $d(t)$ 当作原始数据序列,继续求得 $d(t)$ 极大值、极小值包络线的均值包络线 $m_1(t)$;再判断 $d_1(t) = d(t) - m_1(t)$ 是否满足 IMF 的条件,如不满足,则重复循环 k 次,直到 $d_k(t)$ 满足 IMF 的条件为止。记 $imf_1(t) = d_k(t)$,则 $imf_1(t)$ 为 $x(t)$ 的第 1 个 IMF。

5) 将 $imf_1(t)$ 从 $x(t)$ 中分离出来,将残差 $r_1(t) = x(t) - m_1(t)$ 当作原始数据序列。重复 1)–4) 步骤,得到 n 个 IMF。当 $r_n(t)$ 变成单调函数已不能再从中提取满足 IMF 的分量时,分解过程终止。原始数据序列可被表示为所有 IMF 与最终残差函数之和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t)。 \quad (3)$$

1.2 EMD 去噪方法

使用 EMD 进行信号去噪时,定义如下按尺度标准化模量的累积均值^[6]:

$$\hat{h}_m = \text{mean}(\sum_{i=1}^m (imf_i(t) - \text{mean}(imf_i(t)) / \text{std}(imf_i(t)))) , m \leq n。 \quad (4)$$

其中, $\text{mean}(\cdot)$ 和 $\text{std}(\cdot)$ 分别为求均值和标准差函数, $imf_i(t)$ 表示第 i 尺度的模量。如果 \hat{h}_m 明显偏离零值,则从尺度 m 开始认为是系统的趋势变化所致。去噪后的信号表示为

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=m}^n imf_i(t) + r_n(t)。 \quad (5)$$

2 工程实例分析

对某大型桥梁施工期的 GPS 变形监测数据采用单历元解算方法进行处理,获取三维的变形数据资料。以 X 方向 1 200 个历元的变形量为例采用本文方法进行数据分析,如图 1 所示。

对其进行 EMD 分解,可得到 7 个固有模式量与 1 个趋势项,如图 2 所示。

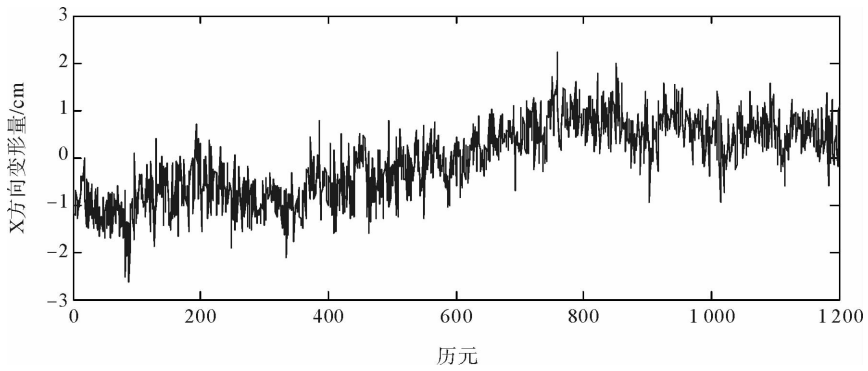


图 1 原始 X 方向变形量图

Fig. 1 Original deformation of X direction

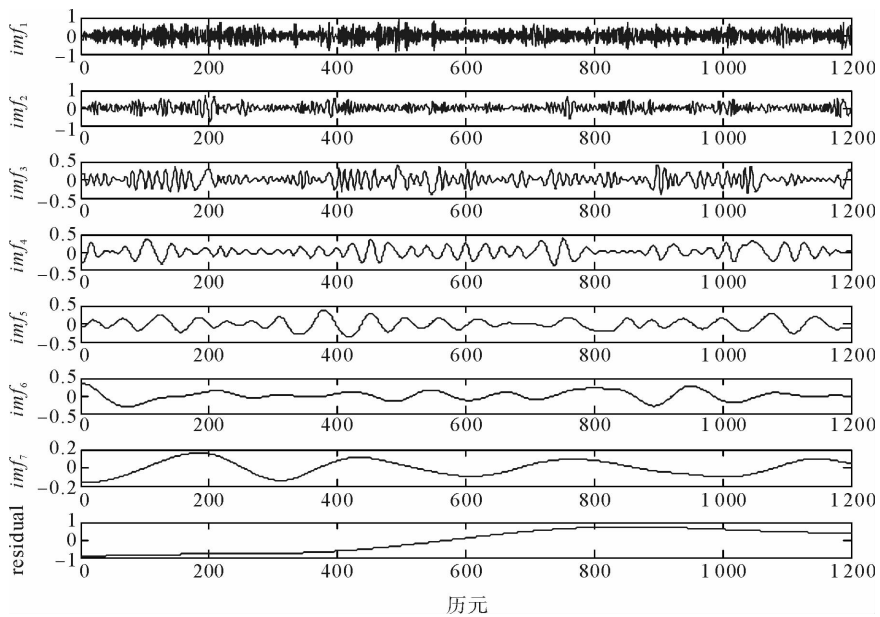


图 2 X 方向变形量的 EMD 多尺度分解图

Fig. 2 Multi-scale EMD decomposition of original deformation of X direction

图 3 给出了标准化模量的累积均值与尺度的关系。可以看出,从尺度 4 开始,标准化模量的累积均值开始比较明显地偏离零值,所以,式(4)中 m 取 4。

应用式(5)对原始变形量进行去噪,得到去噪后的变形量如图 4 所示。可以看出,原始变形量非常小,如不进行去噪处理,其真实的变形特征将完全被强噪声所淹没。同时可以看出,利用 EMD 方法可以对单历元 GPS 变形信息进行识别并可以提取出微弱的变形特征。

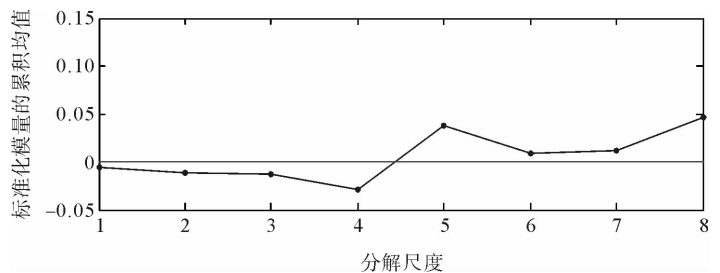


图 3 标准化模量的累积均值与尺度的关系图

Fig. 3 Relationship between scale and the mean of standardized accumulated modes

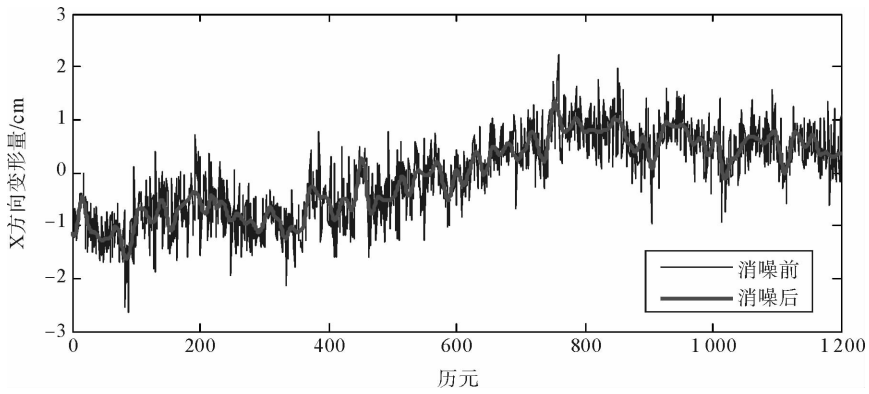


图 4 X 方向变形量的去噪结果图

Fig. 4 Denoising result for deformation of X direction

为了与本文方法进行对比,同时采用小波变换和中值滤波^[10]方法对上述数据进行去噪处理。使用小波变换时,所采用的小波基函数为信号处理中常用的 db6 小波和 sym12 小波,并采用 Heuristic SURE 阈值选取方法确定阈值,其分解层数取 3^[5]。使用中值滤波时,设置其滤波器长度为 9。

为了进行定量的比较,设置评价指标为:

1) 均方误差 RMSE: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n [f(n) - \hat{f}(n)]^2}$ 。其中, $f(n)$ 为原始信号, $\hat{f}(n)$ 为去噪后的估计信号。

2) 信噪比 SNR: $SNR = 10 \times \lg(RMSignal / RMSE^2)$ 。其中, $RMSignal = \frac{1}{n} \sum_n f^2(n)$ 是真实信号功率, $RMSE^2$ 表示为噪声的功率。

比较结果如表 1 所示。

表 1 各种去噪模型的评价指标比较表

Tab. 1 Estimate index comparison of every denoising model

	EMD 方法	db6 小波变换	sym12 小波变换	中值滤波
RMSE/cm	0.373 4	0.382 9	0.384 7	0.391 7
SNR	6.588 8	6.369 5	6.329 7	6.172 4

从表 1 可以看出,EMD 方法具有最小的均方误差和最大的信噪比,其去噪处理结果是最优的;中值滤波方法具有最大的均方误差和最小的信噪比,其结果最差;而小波去噪的效果与小波基函数的选择有关,在本研究中,采用 db6 小波和 sym12 小波去噪的效果均不如 EMD 方法。另外,EMD 方法是根据数据本身固有的特性自适应地分解,显然更具有通用性的特点。

3 结论

EMD 方法具有根据信号本身特征进行自适应滤波去噪的功能,本文将其应用于单历元 GPS 变形信息的特征提取。通过实际工程算例进行分析,并与小波变换及中值滤波方法进行对比,结果表明:EMD 方法去噪效果优于中值滤波方法,并避免了小波去噪效果与小波基函数的选择有关的缺陷。在对变形数据进行有效去噪的基础上,可以完成对单历元 GPS 变形信息进行有效识别并提取出微弱的变形特征。

参考文献:

- [1]李征航,张小红,朱智勤.利用GPS进行高精度变形监测的新模型[J].测绘学报,2002,31(3):206-210.
LI Zhenghang,ZHANG Xiaohong,ZHU Zhiqin. A new model of high accuracy deformation monitoring with GPS[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica,2002,31(3):206-210.
- [2]陈永奇.单历元GPS变形监测数据处理方法的研究[J].武汉测绘科技大学学报,1998,23(4):324-328.
CHEN Yongqi. Development of the methodology for single epoch GPS deformation monitoring[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping,1998,23(4):324-328.
- [3]熊永良,黄丁发,张献洲.一种可靠的含约束条件的GPS变形监测单历元求解算法[J].武汉大学学报:信息科学版,2001,26(1):51-57.
XIONG Yongliang,HUANG Dingfa,ZHANG Xianzhou. A reliable GPS single epoch processing algorithm with known deformation interval constraints[J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University,2001,26(1):51-57.
- [4]余学祥,徐绍铨,吕伟才.GPS变形监测信息的单历元解算方法研究[J].测绘学报,2002,31(2):123-127.
YU Xuexiang,XU Shaoquan,LY Weicai. The research of single epoch algorithm for the GPS deformation monitor information[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2002,31(2):123-127.
- [5]黄声享,刘经南.GPS变形监测系统中消除噪声的一种有效方法[J].测绘学报,2002,31(2):104-107.
HUANG Shengxiang,LIU Jingnan. A novel method for reducing noises in GPS deformation monitoring system[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica,2002,31(2):104-107.
- [6]王坚,高井祥.GPS单历元变形信号小波降噪方法研究[J].工程勘察,2004(3):51-53.
WANG Jian,GAO Jingxiang. A method of GPS single epoch deformation signal denoising by wavelet[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2004(3):51-53.
- [7]HUANG N E,SHEN Z,LONG S R. The empirical mode decomposition and hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London SERIES A,1998,454:903-995.
- [8]刘树林,赵海峰,齐波.基于经验模态分解及自相关分析的微弱信号提取方法[J].大庆石油学院学报,2007,31(5):80-84.
LIU Shulin,ZHAO Haifeng,QI Bo. Approach to weak signal extraction based on empirical mode decomposition and autocorrelation analysis[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,2007,31(5):80-84.
- [9]武安绪,吴培稚,徐平,等.经验模态分解、数值仿真与形变信号滤波试验[J].地震,2007,27(3):20-24.
WU Anxu,WU Peizhi,XU Ping,et al. Empirical mode decomposition,data emulation and test of deformation signal filtering [J]. Earthquake,2007,27(3):20-24.
- [10]彭良玉,杨辉,黄满池.一种新的基于脉冲噪声点检测的自适应中值滤波算法[J].兰州理工大学学报,2009,35(1):77-80.
PENG Liangyu,YANG Hui,HUANG Manchi. A new adaptive median filter algorithm based on detection of impulse noise points[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2009,35(1):77-80.