

王奉伟,周昀琦,周世健,罗亦泳.LMD 方法变形监测数据粗差探测与修复[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(11):1295-1299. doi:10.11956/j.issn. 1008-0562.2016.11.018

WANG Fengwei, ZHOU Shijian, LUO Yiyong. Gross error detection and correction with deformation observation data based on local mean decomposition method[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2016,35(11):1295-1299. doi:10.11956/j.issn. 1008-0562.2016.11.018

LMD 方法变形监测数据粗差探测与修复

王奉伟^{1,2}, 周昀琦³, 周世健⁴, 罗亦泳¹

(1. 东华理工大学 测绘工程学院, 江西 南昌 330013; 2.流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 江西 南昌 330013; 3.香港理工大学 土地测量与地理资讯系, 香港 999077; 4.南昌航空大学, 江西 南昌 330063)

摘 要: 针对变形监测数据中粗差探测与修复问题, 提出一种基于局部均值分解(LMD)的粗差探测方法, 并结合三次样条插值方法对粗差点进行修复.通过 LMD 方法对变形序列进行分解得到其 PF 分量, 根据高频分量的奇异点确定可疑粗差点, 将分解分量去除高频分量进行重构, 利用数学检验方法确定粗差点位置.剔除粗差点后, 采用三次样条插值方法进行修复粗差点.研究表明: 局部均值分解方法在变形监测数据处理中的粗差探测效果明显, 三次样条插值修复也基本准确, 为大坝变形多尺度分析奠定了较好的基础.

关键词: 局部均值分解; 变形监测; 粗差; 探测与修复; 三次样条插值

中图分类号: TU 196

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2016)11-1295-05

Gross error detection and correction with deformation observation data based on local mean decomposition method

WANG Fengwei^{1,2}, ZHOU Yunqi³, ZHOU Shijian⁴, LUO Yiyong¹

(1. School of Surveying and Mapping Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring, National Administration of Surveying, mapping and Geoinformation, Nanchang 330013, China; 3. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, HongKong Polytechnic University, HongKong 999077; 4. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: For the problem of gross error detection and correction, this paper deeply analyzed the theory of Local Mean Decomposition(LMD) and the spline method. Then the LMD method of gross error detection is proposed. By using the LMD method, the deformation sequence is decomposed. Through the theory of high frequency Product Function and mathematical statistics, the gross error is found. Experimental results of two models showed that the LMD method can detect gross error effectively, so it is able to overcome the problem of gross error detection and correction. So the LMD method is very suitable to be applied to detect the error before to do the deformation analysis and prediction of the deformation object.

Key words: LMD; deformation observation; gross error; detection and correction; spline

0 引言

目前粗差探测是进行数据预处理保证测量数据可靠性的关键过程之一.当观测序列中出现粗差时, 传统的数据处理方法很难取得最优结果, 因此在进行数据处理之前, 就需要对其进行粗差探测.

实际上, 粗差的出现, 尤其是大粗差的出现往往会给经典平差结果带来严重的影响.甚至它的存在会导致数据处理结果严重失真, 或者完全不能使用.因此, 探测并剔除观测数据中的粗差是完全必要的.

目前常用的粗差探测方法主要有抗差估计迭代法、 t 检验法和狄克松判别法等^[1-4].但由于一

收稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374007); 测绘地理信息江西省研究生创新教育基地项目(2310700008)

作者简介: 王奉伟(1988-), 男, 山东 菏泽人, 硕士研究生, 主要从事现代大地测量数据处理方面的研究.

通讯作者: 周世健(1966-), 男, 江西 安福人, 博士, 教授, 主要从事空间数据分析、GIS 质量评价等方面的研究. 本文编校: 朱艳华

辽宁工程技术大学学报(自然科学版)网址: <http://202.199.224.158/> <http://xuebao.lntu.edu.cn/>

般变形监测具有较强的非平稳性和非线性, 这些方法的应用均受到了一定限制. 本文中基于局部均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)原理, 考虑利用 LMD 方法对变形序列进行分解得到其 PF (Product Function) 分量, 根据高频分量的奇异点确定可疑粗差点, 将分解分量去除高频分量进行重构, 计算原始序列与重构序列的差值, 计算中误差, 以残差绝对值大于两倍中误差为粗差探测条件, 确定粗差点位置. 剔除粗差点, 采用三次样条插值方法进行修复粗差点. 通过实例分析, 局部均值分解方法在变形监测数据处理中的粗差探测效果明显, 三次样条插补修复与实测值基本一致, 效果良好, 为大坝变形多尺度分析奠定了较好的基础. 结果表明 LMD 方法能够充分发掘数据本身所蕴含的物理机制和物理规律, 为变形监测数据的粗差探测提出了一种新的方法.

1 LMD 原理

LMD 的整体思路就是依据信号的局部时间尺度特征, 将信号从高频到低频自适应地逐级分解出来, 分解后的每个分量都是平稳且具有物理意义的. 对于任意信号 $x(t)$, 其分解过程如下^[5-12]:

(1) 求解信号局部极值点 n_i , 解得相邻的局部极值点的平均值 $m_i = (n_i + n_{i+1}) / 2$, 将所有相邻的平均值点 m_i 用直线连接起来, 采用滑动平均法进行平滑处理, 求得局部均值函数 $m_{11}(t)$.

(2) 根据 $a_i = |n_i - n_{i+1}| / 2$ 将所有相邻两个包络估计值 a_i 用直线连接, 采用类似于过程 (1) 的方法进行平滑处理, 求包络估计函数 $a_{11}(t)$.

(3) 局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中去除得

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t). \quad (1)$$

(4) 通过除以包络估计函数 $a_{11}(t)$ 对 $h_{11}(t)$ 进行解调, 得到 $s_{11}(t) = h_{11}(t) / a_{11}(t)$. 对 $h_{11}(t)$ 重复上述步骤便能得到 $h_{11}(t)$ 的包络估计函数 $a_{12}(t)$. 假如 $a_{12}(t)$ 不等于 1, 说明 $s_{11}(t)$ 不是一个纯调频信号, 需要重复上述迭代过程 n 次, 直至 $s_{1n}(t)$ 为一个纯调频信号.

(5) 将所有得到的包络估计函数相乘便可以得到包络信号 (瞬时幅值函数),

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t). \quad (2)$$

(6) 将包络信号 $a_1(t)$ 和纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 相乘便可以得到原始信号的第一个 PF 分量 $P_1(t) = a_1(t)s_{1n}(t)$, 其包含了原信号中最高的频率成分, 是一个单分量的调幅-调频信号, 其瞬时幅值即为包络信号.

(7) 将第一个 PF 分量 $p_1(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来, 得到一个新的信号 $u_1(t)$, 将 $u_1(t)$ 作为原始数据重复以上步骤, 循环 k 次, 直到 u_k 为一个单调函数为止. 原始信号 $x(t)$ 能够被所有的 PF 分量和 u_k 重构,

$$x(t) = \sum_{p=1}^k p_p(t) + u_k(t), \quad (3)$$

即将所有 PF 分量的瞬时频率与瞬时幅值按照时间-频率-幅值的三维分布重新组合, 便能得到原信号基于 LMD 分解的完整的时频分布.

2 LMD 粗差探测与修复的原理

观测数据序列是建模的基础, 而粗差的存在会影响建模的精度, 因此在进行数据处理建模之前需要对观测数据进行粗差探测和剔除. 对观测数据进行粗差剔除的方法有很多种, 通常采用的方法有抗差估计选权迭代法等多种方法, 通常采用数理统计的方法进行粗差的定位和剔除. 文中依据粗差发生的类别进行探讨.

通常情况下, 信号中的粗差点主要是信号的幅值在某一时刻发生突变, 引起信号的不连续, 信号的突变处一般为粗差点. 而对于变形监测数据通常表现为低频信号或者是一些比较平稳的信号, 而其他噪声信号通常表现为高频信号^[13-15]. 基于以上理论实践, 文中提出基于局部均值分解的变形监测数据粗差探测方法将观测值作为一组非平稳信号, 粗差则是信号中的奇异点, 步骤如下:

(1) 将观测值序列采用 Matlab^[16] 程序进行 LMD 信号分解, 提取高频分量;

(2) 通过高频分量或者重构观测序列进行粗差探测, 一般情况下, 当粗差存在时, 高频分量会出现模极大值点, 模极大值点处极有可能为粗差点. 因此对分解的高频分量进行分析, 确定可疑粗差点的位置;

(3) 为进一步确定粗差点位置, 通过数理统计方法对可疑点进行粗差判断, 计算重构序列与原始序列的差值, 若差值绝对值大于两倍中误差, 则认为该值为粗差;

(4) 确定粗差点后, 将粗差点剔除, 进一步利用三次样条插值方法修复粗差点.

3 实例分析

为进一步验证 LMD 探测粗差的可行性, 文中利用模拟仿真和实际工程两个实例通过人为的对原始序列加入粗差, 利用 Matlab 程序进行处理, 进一步探究 LMD 方法探测粗差的能力和效果.

3.1 仿真实例

文中以 $x = \cos(t \cdot \pi), t = 0, 0.1, \dots, 2$ 为仿真序列, 为从理论上探究 LMD 方法探测粗差的效果, 在 $t = 1$ 处加入粗差, 仿真数据序列见图 1, 通过对序列进行 LMD 分解得到图 2 的 LMD 分解图.

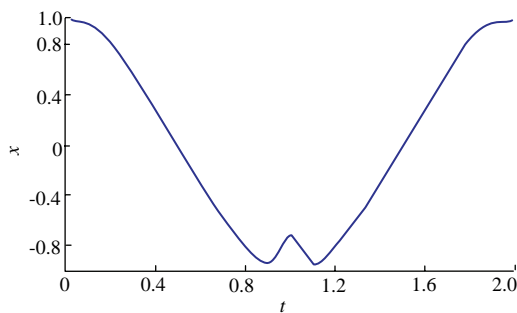
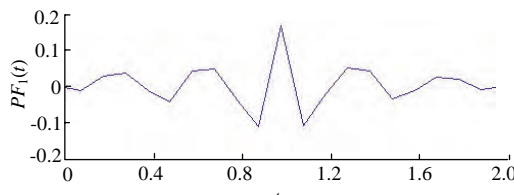
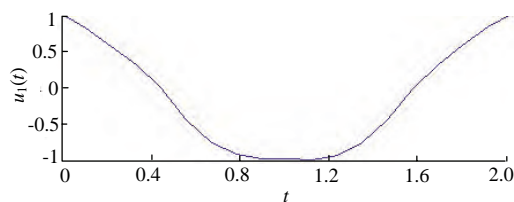


图 1 仿真数据序列

Fig.1 origin data of simulation



(a) PF_1 分量



(b) 余量 $u_1(t)$

图 2 LMD 仿真数据序列分解图

Fig.2 LMD multi-scale of simulation data

由图 1 和图 2 可知, 高频 PF_1 分量中根据模极大值位置, 可以确定可疑粗差点为 $t=0.5, 0.9, 1.0, 1.1, 1.5$ 处, 为进一步确定粗差点位置, 利用数学模型进行检验. 用仿真原始序列与 $u_1(t)$ 近似信号相减, 即

$$S = s - \hat{s}, \tag{4}$$

式中, s 为原始序列; \hat{s} 为去除高频分量的近似信号; S 为去除趋势项的时间序列. 如果差值 S 的绝对值大于该时间序列的 2 倍中误差, 则认定该值为粗差点. 经计算, 各可疑点的实测值与拟合值的绝对误差见表 1.

表 1 仿真实例粗差探测结果

Tab.1 gross error detection result

t	误差绝对值	$2\delta=0.1148$ (δ 作为标准差)	探测结果
0.5	0.0429	$<2\delta$	正常点
0.9	0.1113	$<2\delta$	正常点
1.0	0.1681	$>2\delta$	粗差点
1.1	0.1083	$<2\delta$	正常点
1.5	0.0334	$<2\delta$	正常点

由表 1 可知, $t=1.0$ 处误差绝对值大于 2 倍中误差, 则认定该值为粗差, 应进行剔除. 与文中所加入粗差点位置相同, 表明采用 LMD 方法进行粗差探测具有可行性.

3.2 工程实例

对某建筑物基坑施工过程中所观测的沉降变形监测数据, 共进行 45 期观测. 为进一步说明 LMD 粗差探测的效果, 在第 11、20 和 32 期数据中加入粗差, 原始序列见图 3, 对原始序列进行 LMD 分解见图 4.

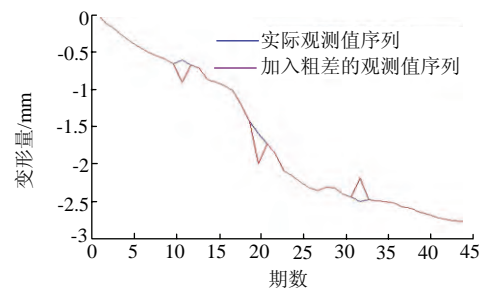


图 3 沉降观测数据序列

Fig.3 data of settlement observation

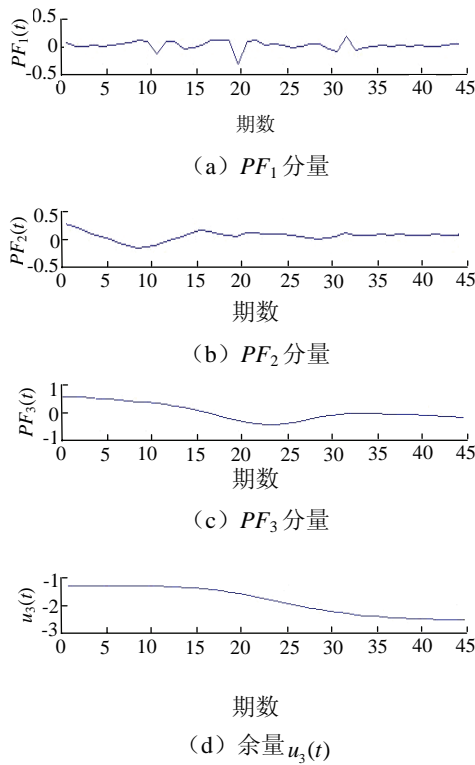


图 4 LMD 变形数据序列分解

Fig.4 LMD multi-scale decomposition

由图 4 可知,由第一个高频 PF 分量可以得到,可疑粗差点为 $10^{\#}$ 、 $11^{\#}$ 、 $12^{\#}$ 、 $20^{\#}$ 、 $31^{\#}$ 、 $32^{\#}$ 和 $33^{\#}$,说明这些点为观测序列奇异点,有可能为粗差.为进一步探测这些点是否为粗差点,利用数据统计进行验证.用原始序列去除 LMD 近似信号序列所得到的时间序列,利用实例 1 中相同的方法进行确定粗差点.计算结果见表 2.

表 2 工程实例粗差探测结果

Tab.2 gross error detection result of project example

期数	误差绝对值	$2\delta=0.1576$ (δ 作为标准差)	探测结果
10	0.0839	$<2\delta$	正常点
11	0.1586	$>2\delta$	粗差点
12	0.0846	$<2\delta$	正常点
20	0.3195	$>2\delta$	粗差点
31	0.1055	$<2\delta$	正常点
32	0.1689	$>2\delta$	粗差点
33	0.0735	$<2\delta$	正常点

由表 1、表 2、图 1~图 4 可知,利用 LMD 方法对于时间序列模型进行粗差探测的可行性和效果相对不错,仿真实例和实际变形监测工程案例均准确的探测出了粗差点的位置,为序列模型粗差探

测方法提供了一种新的思路,但是对于其它多因素相互影响的观测序列,本文的方法值得进一步去研究和探讨.下面采用三次样条插值方法对剔除的粗差点进行插补修复,结果见表 3 和图 5.

表 3 粗差点真实值与修复值比较

Tab.3 actual value of gross error point and correction

期数	实测值	含粗差观测值	三次样条修复值	残差绝对值
11	-0.62	-0.92	-0.6956	0.0756
20	-1.60	-2.00	-1.6149	0.0149
32	-2.51	-2.20	-2.4699	0.0401

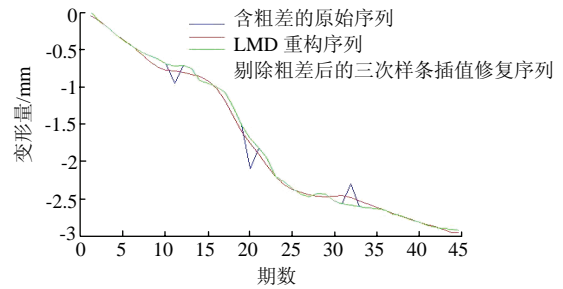


图 5 含粗差原始、重构和修复序列对比

Fig.5 comparison of three data series

当确定粗差点后,将粗差点进行剔除,剔除粗差点后对原始观测序列数据处理具有很大的影响,利用三次样条插值方法对观测序列进行插补修复.由表 3 和图 5 可得,采用三次样条插值修复的粗差点的值与实测值基本一致,具有相当高的精度,解决了剔除粗差点后带来的不良影响,为后续数据处理工作奠定了好的基础.通过两个实例可以发现,基于局部均值分解的变形监测数据粗差探测与修复方法具有一定的可行性,探测粗差效果良好,三次样条插值的修复数据也达到了较高的精度,为序列模型粗差探测方法提供了一种新的思路.但是对于大坝变形等多因素互扰的观测序列,本文方法值得进一步去研究和探讨.

4 结论

(1) 针对变形监测数据中粗差探测与修复问题,提出一种基于局部均值分解 LMD 的粗差探测方法,并结合三次样条插值方法对粗差点进行修复.根据高频分量的奇异点确定可疑粗差点,将分解分量去除高频分量进行重构,计算原始序列与重构序列的差值,利用数学模型确定粗差点.剔除粗差点后,采用三次样条插值方法进行修复粗差点.

(2) 通过仿真和实际工程两个实例分析, 局部均值分解方法在单因素作用变形监测序列数据处理中的粗差探测效果明显, 三次样条插值修复也基本准确. 实验结果验证了 LMD 方法进行粗差探测的有效性, 是一种新的粗差探测方法, 值得应用.

(3) 本文提出的 LMD 结合数学模型粗差探测方法主要针对单因素作用变形监测数据序列, 针对多因素主导的变形监测, 如大坝变形监测序列的粗差探测效果值得进一步探究.

参考文献:

- [1] 龚循强, 刘国祥, 周秀芳. 高速铁路桥墩沉降监测数据粗差探测方法研究[J]. 铁道建筑, 2013(10):34-36.
GONG Xunqiang, LIU Guoxiang, ZHOU Xiufang. Study on the gross error detection of rail-way deformation[J]. Railway Engineering, 2013(10):34-36.
- [2] 刘文生, 唐守路. 稳健估计的两种粗差探测方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(1):54-58. doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2015.01.011.
LIU Wensheng, TANG Shoulu. Two kinds of gross error detection method based on robust estimation[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2015, 34(1):54-58. doi:10.11956/j.issn.1008-0562.2015.01.011.
- [3] 张文春, 孙晓磊, 李伟东, 等. 深基坑监测网的稳健估计方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(5):577-581. doi:10.3969/j.issn.1008-0562.2014.05.001.
ZHANG Wenchun, SUN Xiaolei, LI Weidong, et al. Robust estimation method in monitoring network for deep foundation pit[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2014, 33(5):577-581. doi:10.3969/j.issn.1008-0562.2014.05.001.
- [4] 王奉伟, 周世健, 周清, 等. 选权迭代法残差初值求解方法比较[J]. 测绘科学, 2015, 40(8):18-21.
WANG Fengwei, ZHOU Shijian, ZHOU Qing, et al. Comparison between three methods in initial residuals problem of selecting weight iteration method[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(8):18-21.
- [5] CORTES C, VAPNIK V. Support vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3):273-297.
- [6] 任达千. 基于局部均值分解的旋转机械故障特征提取方法及系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [7] 程军圣, 杨宇, 于德介. 一种新的时频分析方法局部均值分解方法[J]. 振动与冲击, 2008, 27(增刊):129-131.
CHENG Junsheng, YANG Yu, YU Dejie. A new time frequency analysis method-the local mean decomposition method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(S):129-131.
- [8] 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[M]. The Royal Society, 1998.
- [9] KLIONSKI D M, ORESHKO N I, GEPPENER V V, et al. Applications of empirical mode decomposition for processing nonstationary signals[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2008, 18(3):390-399.
- [10] MADNIC D P, GOLZ M, KUH A, et al. Signal processing techniques for knowledge extraction and information fusion[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [11] LEE Y S, TSAKIRTZIS S, VAKAKIS A F, et al. Physics-based foundation for empirical mode decomposition[J]. AIAA Journal, 2009, 47(12):2 938-2 963.
- [12] 张亢. 局部均值分解方法及其在旋转机械故障诊断中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [13] 冯小磊, 华锡生, 黄红女. 观测值序列的粗差探测方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(3):56-59.
FENG Xiaolei, HUA Xisheng, HUANG Hongnv. Gross-error detection for observation data series[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(3):56-59.
- [14] VAPNIK V. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998:360-374.
- [15] 方扬, 王广兴, 杜玉军. 三种粗差检验方法的比较分析[J]. 测绘通报, 2009(9):4-8.
FANG Yang, WANG Guangxing, DU Yujun. Comparison of three methods of gross error detection[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(9):4-8.
- [16] 张智星. Matlab 程序设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.