

高层建筑物 GPS 观测中的小波分析

李开伟, 汪仁银, 陈锐, 韩立

(四川水利职业技术学院, 四川 成都 610000)

摘要: 采用 GPS 进行高层建筑物实时动态观测被认为是有效的方法, 如何处理海量 GPS 振动观测数据是一个重要的问题。本文根据 GPS 振动观测数据特点, 将小波分析技术应用于 GPS 振动观测数据处理, 研究了不同小波基、分解尺度、阈值选择对观测数据去噪的影响, 获得了有益的结论。

关键词: 小波分析; 高层建筑物; GPS; 数据处理; 小波基; 分解尺度

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2017)04-0106-05

0 引言

城市中高层建筑物日益增多, 为了保证高层建筑物的安全, 需要对其进行实时监测。GPS 具有全天候、实时性、高精度等优势, 能够实时监测物体的动态变化, 将 GPS 监测技术应用于高层建筑的安全监测, 以保证建筑物安全运营, 被认为是十分有效的方法^[1-4]。GPS 高层建筑物观测数据主要包括两个方面, 一是建筑物自身振动以及外界环境引起的实际位移, 另一类是观测误差引起的噪声。如何准确处理大量监测数据, 获取建筑物的变形趋势是一个值得研究的问题。小波分析技术由于具有优异的局部时频特性和多分辨率分析特性等优点, 通过小波变换可对信号的不同频率成分进行分解, 已被广泛应用于数据处理领域^[5-8]。建筑物的振动位移变化缓慢, 观测噪声频率变化高, 两者与小波多分辨率分析中的低频部分和高频部分分别对应。将小波分析技术应用于高层建筑物 GPS 观测数据处理, 根据 GPS 监测数据特点和高层建筑物位移特性, 研究小波分析在其中的应用, 包括如何选择小波基、最佳分解尺度的确定以及最优阈值准则确定。

1 小波分析简介

1.1 小波分析理论

小波分析的主要思想是小波变换, 小波变换是

小波函数与被变换函数与作卷积的结果^[9]。设满足条件的小波基函数为 $\varphi(t)$, 小波基函数经过平移 τ 和伸缩 a 后得到:

$$\varphi_{a,\tau}(t) = \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), \quad (1)$$

式中: τ 为时移因子; a 为尺度因子。将 $\varphi_{a,\tau}(t)$ 与被变换函数 $f(t)$ 作卷积, 得到连续小波变换

$$\begin{aligned} WT_f(a, \tau) &= \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, a > 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $WT_f(a, \tau)$ 称为小波变换系数。现实中往往需要对离散数据进行研究, 离散小波变换是指对尺度因子 a 和时移因子 τ 的离散化, 离散化时通常取 $a = a_0^m, \tau = nb_0 a_0^m, m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}$, 代入式(2)可得:

$$\varphi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \varphi(a_0^{-m} t - nb_0), \quad m, n \in \mathbb{Z}. \quad (3)$$

相应的离散小波变换为

$$\begin{aligned} WT_f(a, \tau) &= \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle \\ &= a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\varphi}(a_0^{-m} t - nb_0) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

小波变换是一个时间和频率的局部变换, 能通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度细化分析。低频信号可以采用较低的时间分辨率来提高频率的分辨率, 高频信号可以采用较低的频率分辨率来换取精确的时间分辨率。GPS 振动观测值

序列可以采用小波变换技术进行 GPS 振动观测数据的数据处理。

1.2 小波分析去噪

小波阈值去噪是小波分析中主要使用的去噪方法,小波阈值去噪具有实现简单、去噪效果好的特点^[10]。小波阈值去噪主要包括,1) 小波分解。选择一个合适的小波基函数和合理的小波分解尺度 N 进行小波分解;2) 高频系数阈值量化。对高频部分选择合适的阈值 δ 进行处理,所有小于 δ 的小波系数被划为噪声,而超过阈值 δ 的小波系数的数值被缩减后再重新取值;3) 小波重构。将分解后各层低频部分和高频部分进行小波重构,获得去噪后的信号。

在工程领域中,选择合适的小波基是小波分析处理结果好坏的关键,不同的小波基具有不同的时频特征^[11],一个工程问题用不同的小波基函数进行分析可能会有不同的结果。根据 GPS 高层建筑物观测数据特点,研究出适合的小波基函数具有重要的意义。同时,在提取变形趋势时,不同小波分解尺度下信号的表现形式不同,如何根据信号特性选择最好的分解尺度也是一个需要研究的问题。

小波阈值去噪的核心在阈值的选取,它直接关系到降噪的质量。小波阈值确定模型主要是基于样本估计选取阈值,主要包括以下四个准则:1) 自适应阈值准则,对一个给定的阈值 t ,计算出它的似然估计,然后最小化得到所选的阈值。2) 固定阈值准则,其计算公式为: $thr = \sqrt{2\log(n)}\sigma$,式中, n 为信号的长度; σ 是噪声强度,阈值大小与信号长度有关。3) 启发式阈值准则,它是前两者的折中。4) 极值阈值准则,采用极小极大值原理选择阈值。

本文研究在高层建筑物 GPS 动态观测数据处理中小波基函数和分解尺度及四种阈值确定准则下的去噪效果,并利用信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)、平滑度(r)指标进行量化分析。

2 实验分析

选择某高层建筑物观测中的 GPS 动态监测数据,观测建筑物在 X,Y,Z 三个方向的位移变化,原始观测数据如图 1 所示。从图 1 可以看出原始观测序列受到噪声影响严重,无法得到建筑物变化趋势和振动周期。建筑物的位移表现为在前 120 观测历元振幅和频率较大,之后趋于稳定,前 120 历

元可以视为建筑物受到地震等突发外界因素影响下的振动,120 历元之后表现为建筑物受到风振、温度等自然因素影响下的自然位移。下面进行实验分析。

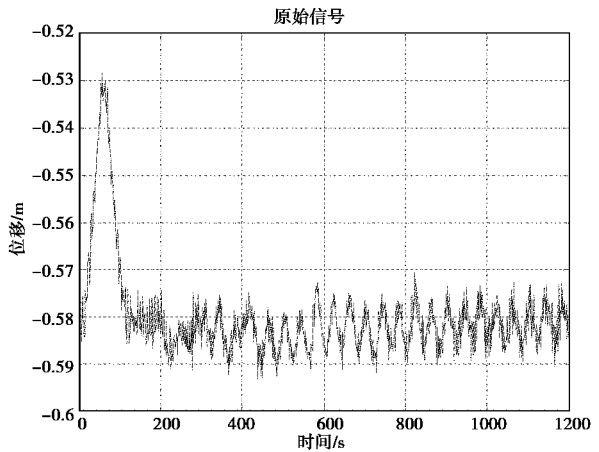


图 1 原始观测信号

2.1 小波基函数选择

在小波分析中,首先就是选择合适的小波基进行小波变换。工程上常用的小波基函数包括 db 系列、sym 系列、coif 系列小波基函数^[12-14]。实验时截取 120 历元后的 30 个观测序列进行分析,实验使其它参数保持不变,选取 db1-db3、sym1-sym3、coif1-coif3 波基函数对原始信号进行 3 层小波分解和重构,采用去噪效果好的默认阈值法去噪,选择 ddencmp 函数获得默认阈值,使用 wdencomp 函数进行消噪。实验结果如图 2 所示,评价指标如表 1 所示。经小波分析去噪后,得到了较为光滑的去噪结果,容易得到建筑物的振动趋势和振动周期,验证了小波分析在 GPS 振动观测中数据处理的能力。

表 1 小波基函数去噪评价指标

小波函数	SNR	RMSE	r
db1	75.48	0.05	0.00
db2	78.10	0.04	0.22
db3	78.50	0.04	0.11
sym1	75.48	0.05	0.00
sym2	78.10	0.04	0.22
sym3	78.50	0.04	0.11
coif1	78.13	0.04	34.80
coif2	79.09	0.04	0.20
coif3	78.92	0.04	0.11

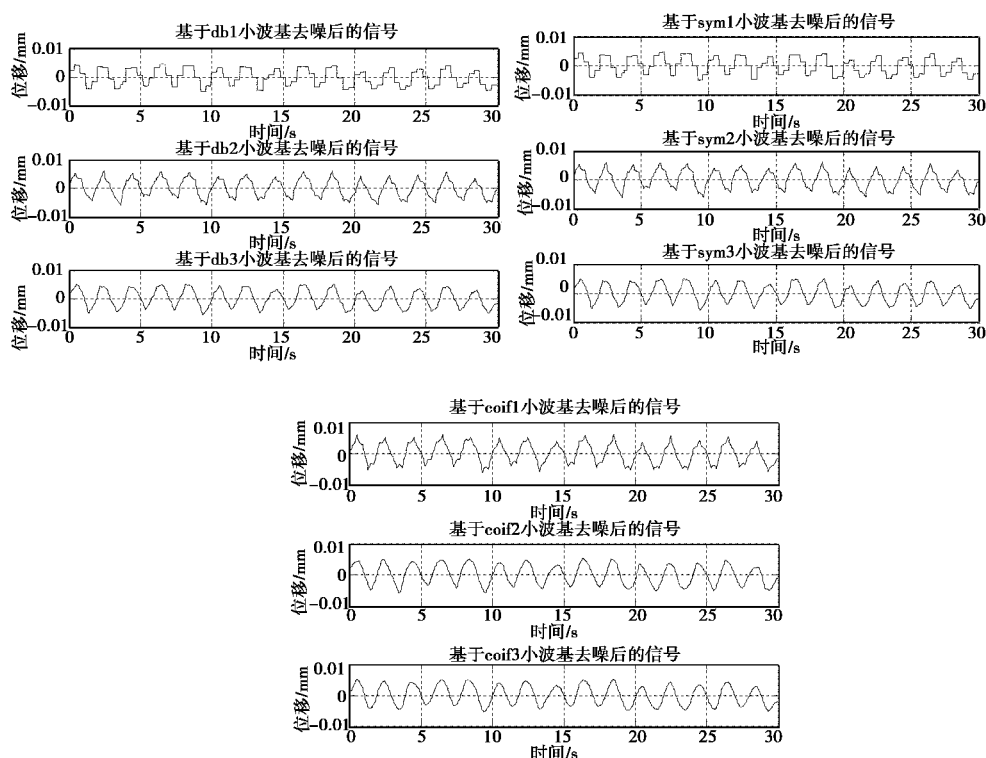


图 2 不同小波基函数去噪结果

信噪比是衡量含噪信号去噪效果好坏的重要指标,信噪比越大说明这种方法的去噪效果越好。均方根误差表现了原始信号与去噪后信号之间的差异,均方根误差越小表示信号去噪的效果越好。平滑度表示去噪后信号的光滑程度,平滑度的值越小,表示信号越光滑,去噪的效果越好。从表中可以发现,db系、sym系、coif系小波基函数都具有较好的去噪能力,在阶数相同时,coifN小波基函数去噪效果要略优于dbN和symN。三种小波基函

数去噪效果的差别主要在平滑度上,阶数的改变对平滑度有较大影响。从图中也可以看出3阶小波基函数去噪后信号图平滑,又较好的保留了信号的信息特征,可以用来提取变形趋势。

2.2 分解尺度选择

针对实验数据,选择coif3小波基函数对原始信号做各层分解,并通过评价指标进行分析,限于篇幅有限,本文仅显示前6层实验结果,去噪后信号效果如图3所示,各项评价指标如表2所示。

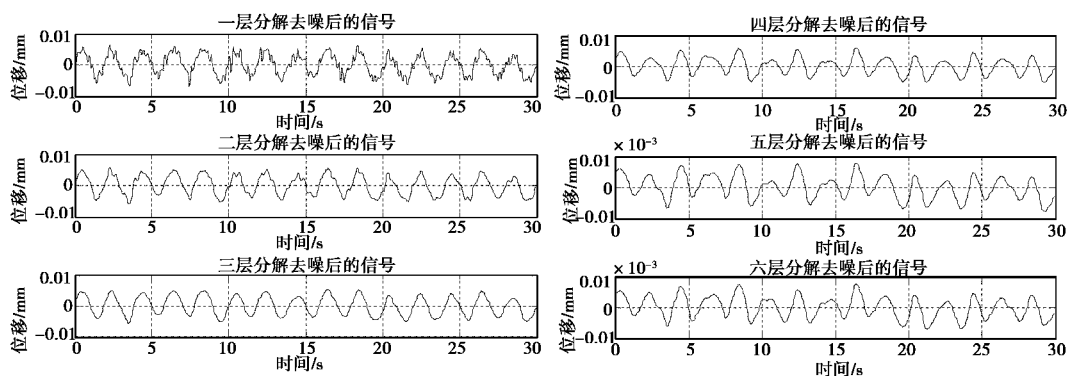


图 3 不同分解尺度的去噪结果

表 2 不同尺度去噪评价指标

分解尺度	SNR	RMSE	r
1	84.46	0.03	0.37
2	80.25	0.04	0.26
3	79.19	0.04	0.16
4	74.86	0.05	0.15
5	72.47	0.06	0.11
6	72.18	0.06	0.04

根据图 3 和表 2 分析可以发现,随着分解尺度的增加,信噪比逐渐降低,前 3 层分解去噪效果较好,5 层以后去噪效果趋于稳定;均方根误差逐渐增大,在 5 层以后趋于稳定;平滑度逐渐变好,当分解尺度增加时,平滑度的值较小。可以认为,在 GPS 高层建筑物观测数据处理时,当小波分解尺度越小时信噪比和均方根误差值越好,但平滑度却在变差。3 层小波分解后的各项指标较好,很好的保留了信号特征,平滑性也较好,所以在处理 GPS 观测信号时,选择分解尺度为 3 较好。

2.3 小波阈值选择

四种阈值确定准则都有不同的适用范围,针对不同的数据类型,不同作者提取了最优的阈值确定准则。本文对此进行了实验,研究高层建筑物 GPS 动态观测数据处理中四种阈值选取准则的好坏。实验选取了全部的观测序列,选择了去噪效果好的 coif3 小波基函数,进行 3 层尺度分解,选择软阈值处理,去噪后结果如图 4 所示,各项评价指标如表 3 所示。

根据图 4 和表 3 分析,四种阈值确定准则下,原始信号基本消除了噪声的干扰,获得了建筑物的动态变形特征。自适应阈值最小且与原始观测值大小相近,启发式阈值按固定阈值准则确定的,两者相同。固定阈值准则去噪后的信号平滑性更好,自适应阈值保留了原始信号较多的特征,而固定阈值存在过度去噪的问题。从评价指标上看,自适应阈值信噪比和均方根误差指标最好。可以发现,选用自适应阈值准则去噪效果更好,并且保留了原始信号中存在的粗差,在处理 GPS 高层建筑物动态观测数据时使用自适应阈值准则处理效果更好。

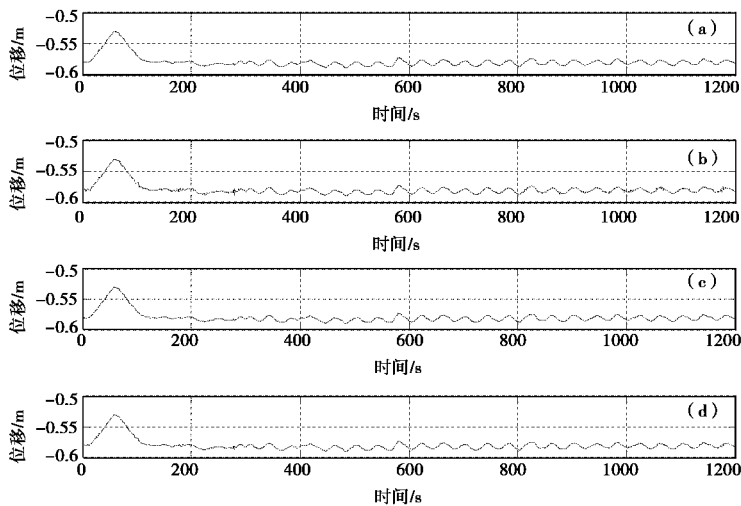


图 4 四种阈值准则下去噪结果(a)启发式阈值;(b)自适应阈值;(c)固定阈值;(d)极值阈值

表 3 四种阈值去噪评价指标

Z 方向数据	THR	SNR	RMSE	R
启发式阈值	3.77	181.81	0.08	0.34
自适应阈值	0.59	185.03	0.07	1.95
固定阈值	3.77	181.77	0.08	0.34
极值阈值	2.26	182.63	0.08	0.34

将小波分析应用于 GPS 高层建筑物数据处理取得了很好的效果,验证了小波分析在 GPS 数据处理中的能力,为了获得更好的去噪结果,本文分析了小波基、分解尺度和阈值选择去去噪的影响,得到了有益的结论。

3 结束语

高层建筑物日益增多,高层建筑物由于其自身特性,随时都处于动态形变之中,对高层建筑物进行安全监测是保证建筑物安全的重要手段。面对大量 GPS 动态监测数据,将小波分析技术应用于监测数据处理,得到建筑物的振动趋势和周期,是十分有效的处理方法,本文的研究为工程应用中选择和利用小波分析技术处理高 GPS 数据提供了参考。

参考文献

- [1] 王中元,周天强,张鹏飞. 高层建筑物 GPS 动态变形监测数据处理[J]. 测绘科学,2012(1):47-50,37.
- [2] 黄丁发,丁晓利,陈永奇,等. GPS 多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. 测绘学报,2001(1):36-41.
- [3] 匡翠林,戴吾蛟. GPS 监测高层建筑风致振动变形及小波应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010(9):1024-1028.
- [4] 伊晓东. GPS 用于强风引起的超高层建筑物位移测量研究[J]. 测绘通报,2009(3):8-11.
- [5] 张勤,蒋廷臣,王秀萍. 小波变换在变形监测中的应用研究[J]. 测绘工程,2005,14(1):8-10.
- [6] 夏开旺,田林亚,杨永平. 基于小波分析的坝区 GPS 信号噪声研究[J]. 水电自动化与大坝监测,2006,30(4):51-55.
- [7] 夏秋,周金国. 小波分析在 GPS 变形监测数据处理中的应用[J]. 地理空间信息,2011,9(6):40-44.
- [8] 李海文,周海峰,蒋霖. 基于 db10 小波基函数函数的 GPS 信号去噪效果分析[J]. 勘察科学技术,2012,04:18-19,57.
- [9] 王涛,田林亚,侯建梅,等. 利用小波变换进行 GPS 振动观测值的异常探测[J]. 测绘工程,2017(5):52-56.
- [10] 罗志才,陈永奇,刘焱雄. GPS 用于监测高层建筑物动态特征的模拟研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000(2):100-104.
- [11] 姚丽慧,高井祥,王坚. 不同小波函数对粗差识别效果的比较[J]. 北京测绘,2011(3):20-23,92.
- [12] 姚刚,刘星,郑求兴,等. 高层建筑环境激励动态特性的 GPS 监测研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005(5):45-49.
- [13] 查显杰,傅容珊,戴志阳,等. 小波基函数函数选择对 SAR 干涉图去噪的影响[J]. 遥感信息,2008(2):17-20,34.
- [14] 谭善文,秦树人,汤宝平. 小波基函数时频特性及其在分析突变信号中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2001(2):12-17.

作者简介

李开伟 (1981—),男,硕士,讲师,主要研究方向为工程测量、摄影测量与遥感。

汪仁银 (1974—),男,讲师,主要从事工程测量、地图制图及工程测量专业课程教学和管理工

作。

陈锐 (1982—),男,讲师,主要从事工程测量、工程测量专业课程教学工作。

High-rise Buildings GPS Data Processing Based on Wavelet Analysis

LI Kaiwei, WANG Renyin, CHEN Rui, HAN Li

(Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 610000, China)

Abstract: Using GPS to high-rise building real-time dynamic observation is considered to be effective, how to deal with massive amounts of GPS observation data vibration is an important issue. In order to improve the automation of process GPS data, based on GPS observation data vibration characteristics, wavelet analysis technology was applied to the GPS observation data processing in this paper. The impact of different wavelet decomposition scales and wavelet bases and threshold criterion to GPS observation data de-noising are studied based on extracting the dynamic change trend in high-rise buildings, beneficial conclusions are obtained.

Keywords: Wavelet analysis; high-rise buildings; GPS; data processing; wavelet base; decomposition scale