

基于交叉证认的 EMD 滤波及其在 GPS 多路径效应中的应用

罗飞雪^{1,2} 戴吾蛟^{1,2} 伍锡锈^{1,2}

(1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083)
(2 湖南省精密工程测量与形变灾害监测重点实验室,长沙市麓山南路 932 号,410083)

摘要:利用交叉证认的方法,提出一种新的基于 EMD 滤波去噪方法,并将其应用于 GPS 多路径效应的研究中。通过模拟实验及实测数据分析表明,该方法能够自适应地选择 IMF 中的信号层数,削弱随机噪声,合理地分离信号和噪声。利用该滤波方法去噪并建立具有重复性的多路径误差效应改正模型,可有效地削弱多路径效应的影响,进而提高 GPS 动态变形监测的精度。
关键词:交叉证认;EMD 滤波去噪;GPS;多路径效应
中图法分类号:P228.41

多路径效应误差是目前高精度 GPS 动态测量的主要误差源^[1-3]。在动态变形监测中,由于 GPS 天线的位置及其周围环境基本不变,可以根据多路径效应的重复性,利用小波滤波^[1]、EMD (empirical mode decomposition)滤波^[2]、Vondrak 滤波^[3,4]、自适应滤波等方法建模来削弱其影响。其中 EMD 是由 Huang 等人提出的一种新的数据处理方法^[5],该方法基于数据本身,将数据从高频到低频逐级分解,可以构成高通、带通和低通 EMD 多尺度滤波,达到对信号进行滤波和去噪的目的^[6]。文献[7]通过频谱分析方法来确定 EMD 的信号层,文献[2]则利用 EMD 分解高斯白噪声的 IMF 分量的能量密度与其平均周期的乘积为一常量这一特性建立新的 EMD 滤波去噪方法。交叉证认方法依据数据本身进行处理,能自适应地选择合适的平滑度对信号进行平滑^[8],在 Vondrak 滤波平滑因子的选取^[3,9]、小波去噪阈值的选择^[10]中取得了良好的效果。

1 基于交叉证认的 EMD 滤波去噪

EMD 多尺度滤波能够充分保留信号本身的非线性和非平稳特性^[11]。对于含有随机噪声的信号,对其进行 EMD 分解后,高频 IMF 分量通

常为噪声部分^[2],因此,对于混有白噪声的信号,只需利用 EMD 对混合信号进行低通滤波。在滤波过程中,平滑度的选择尤为重要,利用交叉证认的方法,能够自适应、合理地选择平滑度,其基本过程如下^[1]。

1) 将观测数据 $(t_i, s_i), i=1, 2, \dots, n$ 分为两部分:奇数序列样本 $(t_{1,2m-1}, s_{1,2m-1})$ 和偶数序列样本 $(t_{2,2m}, s_{2,2m}), m=1, 2, \dots, n/2$ 。将奇数序列样本作为滤波样本,对偶数序列样本随机采样,组成证认样本(样本数为 n_2),实验中取 $n_2=0.1n$ 。

2) 将奇数序列样本进行 EMD 分解,得到 m 个 IMF 分量和一个残余分量。

3) 选择并计算 $k(k=1, 2, \dots, m)$ 至 m 间的 IMF 分量之和作为滤波值 f' ,计算证认样本对滤波值的方差:

$$C(k, p) = \frac{1}{n_2} (s_{2,i} - f'(t_{2,i}))^2 \tag{1}$$

4) 为考虑随机划分,需反映观测数据的总体统计特性,同时也考虑到计算量,选取 10 次不同的随机划分 $P_j, j=1, 2, \dots, 10$,求得 10 个证认样本的方差 $C(k, P_j)$,并计算 C 的均值 \bar{C} 。选择 \bar{C} 最小时的 k ,此时 k 至 m 间的 IMF 分量之和即为 EMD 滤波的信号所在层。

5) 将原始观测数据进行 EMD 分解,并根据

步骤 4)的结果选取 $k+1$ 到 m 间的 IMF 分量之和作为原始资料的信号所在层,经 EMD 重构得到原始资料的滤波序列。

同时,在滤波计算过程中,仅选取资料序列中部 70%的数据进行计算,以防止端点效应的影响。由此可知,基于交叉认证的 EMD 滤波通过求得认证样本对滤波值的方差均值的最小值来确定信号层数,该方法无需通过分析频谱或利用其他经验信息,因而具有自适应性。

2 模拟数据实验及分析

设模拟数据模型为:

$$s_t = \sin(2\pi t/1\,500) + \sin(2\pi t/500) + \sin(2\pi t/100) + e_t$$

(2)

式中, s_t 由周期分别为 1 500 s、500 s、100 s 的 3 个正弦信号再加一个高斯白噪声序列 e_t 组成,数据采样间隔为 1 s,样本数为 4 000,对模拟数据进行 EMD 分解,如图 1(a)所示。图 1(b)是分解的各 IMF 分量所对应的 FFT 结果,从图中可以看到,噪声水平随分解层次的增加而减小,高斯白噪声主要分布在高频的 IMF 分量上。根据基于交叉认证的 EMD 滤波方法,得到 imf5~imf8 和残余分量 res 为信号层,这与 FFT 结果相吻合。

图 2 为不同噪声水平下的基于交叉认证的 EMD 滤波结果,从图中可以看出,基于交叉认证的 EMD 滤波能较合理地分离信号与噪声。表 1

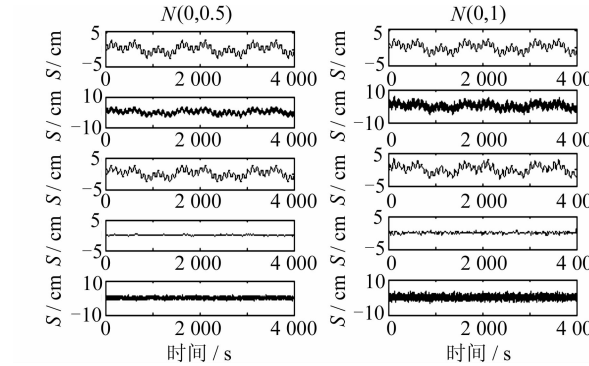


图 2 不同噪声水平下基于交叉认证的 EMD 滤波结果(各子图从上到下依次为原始参考信号、加噪后信号、滤波后信号、滤波值与原始信号的差值序列、滤波值与含噪信号的差值序列)

Fig. 2 Result of EMD Filtering at Different Noise Levels

表 1 基于交叉认证的 EMD 滤波结果

Tab. 1 Result of EMD Base on Cross-validation

噪声水平	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
信号层	imf5 — res	imf5 — res	imf5 — res	imf6 — res	imf6 — res
S_{RMS}/mm	0.129	0.259	0.355	0.499	0.559
N_{RMS}/mm	0.493	0.984	1.492	2.037	2.497
R	0.995	0.980	0.956	0.918	0.902

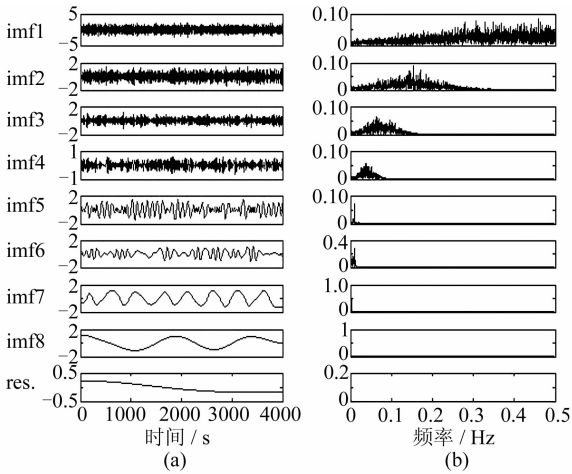


图 1 模拟数据序列的经验模式分解结果及各 IMF 分量的 FFT 结果(噪声水平为 $N(0,1)$)
Fig. 1 EMD Result of Simulation Data and FFT of IMFs(Noise level- $N(0,1)$)

为其定量分析结果,其中 S_{RMS} 为滤波后信号部分的均方根误差, N_{RMS} 为滤波后噪声部分的均方根误差, R 为滤波后信号部分与原始参考信号之间的相关系数。从中可以看出,经 EMD 滤波后的 N_{RMS} 与噪声水平大小很接近,说明残差序列里包含了尽可能多的噪声;同时,相关系数 R 都在 0.87 以上,说明滤波后信号与原始参考信号很相似;在噪声水平小于信号振幅的一半时, S_{RMS} 都比较小,当噪声水平较大时,信号有些失真,100 s 的高频信号未能较好分离出来。

为了与基于交叉认证的小波分析法作比较,

图 3 和表 2 显示了噪声水平为 $N(0,1)$ 时,基于交叉认证的小波滤波(db8 小波和 Haar 小波)和基于交叉认证的 EMD 滤波的实验结果。从中可以看出,基于交叉认证的 EMD 滤波结果与基于交叉认证的 db8 小波滤波结果比较接近,都能较好地将信号与噪声分离开来;而基于交叉认证的 Haar 小波滤波结果相对差一些,说明基于交叉证

认的 EMD 滤波不受小波基选择的影响,自适应地选择信号层,相比小波滤波,更具稳定性。

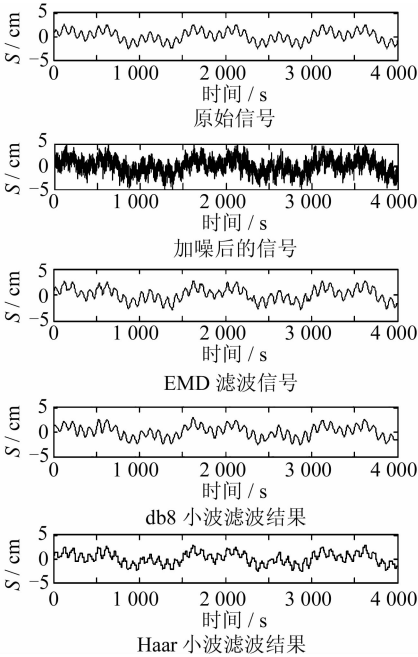


图 3 基于交叉认证的 EMD 滤波曲线和
小波滤波结果(噪声水平为 $N(0,1)$)
Fig. 3 Result of EMD Filter and WT Filter Base on
Cross-validation (Noise Level $\sim N(0,1)$)

表 2 基于交叉认证的 EMD 滤波结果和小波滤
波结果(噪声水平为 $N(0,1)$)

Tab. 2 Result of EMD Filter and WT Filter
Base on Cross-validation (Noise Level $\sim N(0,1)$)

去噪方法	EMD	db8 小波	Haar 小波
信号层	imf5-res	d6-a9	d6-a9
S_{RMS}/mm	0.237	0.209	0.325
N_{RMS}/mm	0.997	0.986	0.990
R	0.976	0.985	0.965

3 GPS 多路径效应削减实验分析

实验数据来源于香港理工大学 2004-11-10~12 连续 3 d 的一次强多路径效应环境下,某固定点的高程位移序列,观测时间约 30 min,采样间隔为 1 s。由于基线非常短,接收机钟差和卫星钟差被消除,电离层、对流层误差被极大地削弱。由于监测点是一固定不动点,数据处理时假定原始坐标为零,因此,实际 GPS 测量得到的位移序列中仅包含随机噪声和多路径误差。将原始坐标时程序列按时间对齐后(后一天比前一天约提前 3 min56 s),如图 4 所示。当周围环境不变或变化很小,且天线位移变化很小时(小于 1 cm/d)时,多路径效应误差可利用其周日重复性进行改正^[12]。即根据多路径重复性的特点,首先将第一

天的原始坐标时程序列进行滤波去噪,并提取精确的多路径误差模型,利用后续的 GPS 观测值减去此项误差,达到提高 GPS 观测精度的目的。

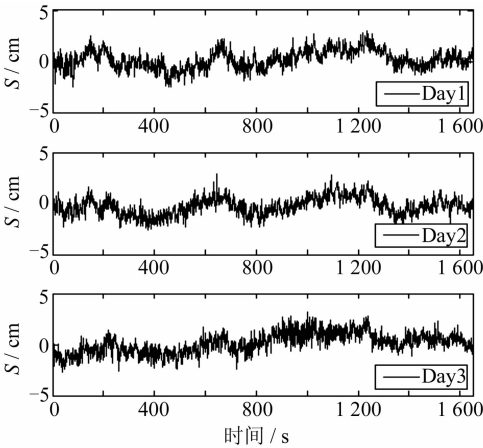


图 4 连续 3 天 H 方向的原始坐标时程序列
Fig. 4 Raw Coordinates of H Direction for
the Three Consecutive Days

从图 4 可以看出,位移序列表现出明显的重复性,通过计算得到相邻两天的相关系数均达到 0.5 以上。图 5 是基于交叉认证的 EMD 滤波结果,前 3 个子图是通过 EMD 滤波提取的多路径效应模型序列。从图 5 可以看出,基于交叉认证的 EMD 滤波可以将多路径效应误差从带有随机噪声的位移序列中分离。将第一天的滤波结果作为精确的多路径效应改正模型,并利用多路径效应的重复性,将第二天和第三天与第一天的多路径效应模型相减,把多路径效应误差扣除。削弱了多路径效应的位移序列如图 5 的后两个子图所示,表 3 是定量分析结果,可以看出经过多路径效应模型改正后,RMS 比滤波前减少了约 25%,有效地削弱了多路径效应的影响。但是交叉认证方

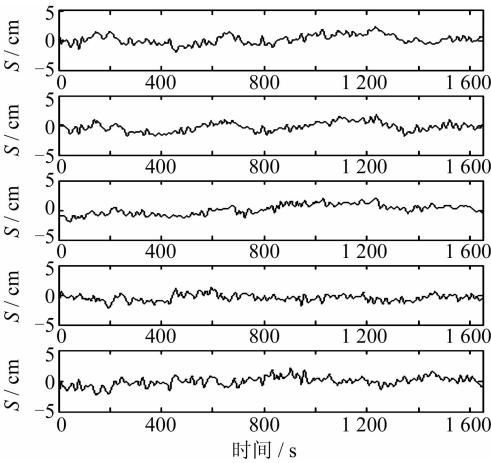


图 5 基于交叉认证的 EMD 滤波结果
Fig. 5 Results After EMD De-noising
Based on Cross-Validation

法实际上是一个反复实验取最佳滤波值的过程,所以计算量比较大。

表 3 连续 3 天多路径效应的 EMD 滤波前后
噪声序列的 RMS 值

Tab. 3 RMS of Noise Series

Day	滤波前/cm	EMD 滤波后/cm
2	0.918	0.728
3	1.001	0.737

参 考 文 献

[1] 钟萍,丁晓利,郑大伟,等. 一种基于交叉认证技术的自适应小波变换及其在削减 GPS 多路径误差中的应用[J]. 测绘学报,2007,36(3):279-285

[2] 戴吾蛟,丁晓利,朱建军,等. 基于经验模式分解的滤波去噪法及其在 GPS 多路径效应中的应用[J]. 测绘学报, 2006, 35 (4) : 321-327

[3] 钟萍,丁晓利,郑大伟. CVVF 方法用于 GPS 多路径效应的研究[J]. 测绘学报,2005,34(2):161-167

[4] 周晓卫,戴吾蛟,朱建军,等. HVF 方法在 GPS 多路径效应研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2007,27(1):107-111

[5] 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]. Proc R Soc Lond A, 1998,454:903-995

[6] 谭善文,秦树人,汤宝平. Hilbert-Huang 变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报,2004,27(2):9-12

[7] 李夕兵,张义平,左宇军,等. 岩石爆破振动信号的 EMD 滤波与消噪[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,37(1):150-154

[8] Clark R M, Thompson R. An Objective Method for Smoothing Palaeomagnetic Data[J]. Geophys J R, 1978, 52(2):205-213

[9] Zheng Dawei, Zhong Ping, Ding Xiaoli, et al. Filtering GPS Time-series Using a Vondrak Filter and Cross-validation[J]. J Geod, 2005, 79: 363-369

[10] 黄文清,戴瑜兴,李加升. 基于 Cross-Validation 的小波自适应去噪方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2008,35(11):40-43

[11] 钟佑明,秦树人,汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报,2002,15(2):233-238

[12] Radova R S. High Accuracy Deformation Monitoring via Multipath Mitigation by Day-to-day Correlation Analysis[C]. The 13th International Technical Meeting of the SAT Division of the ION, Salt Lake City, USA, 2000

第一作者简介:罗飞雪,硕士生,研究方向为 GNSS 工程结构健康监测。
E-mail:misslfx@163.com

EMD Filtering Based on Cross-Validation and Its
Application in GPS Multipath

LUO Feixue^{1,2} DAI Wujiao^{1,2} Wu Xixiu^{1,2}

(1 Department of Surveying Engineering & Geo-Informatics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 Key Laboratory of Precise Engineering Surveying & Deformation Disaster Monitoring of Hunan Province, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

Abstract: The EMD filtering method based on the cross-validation is developed and applied to the study on GPS multipath effects. Experiments with both simulated data and real GPS observations show that the method can select the signals in the IMFs, reduce random error and separate noise from signals adaptively. Using this method to extract and model the correction of Multipath error can weaken the effects of Multipath, and then improve the accuracy of GPS surveying in dynamic deformation monitoring.

Key words: cross-validation; EMD noise filter; GPS; multipath effects