

一种小波包混合滤波方法及其应用

章浙涛¹ 朱建军¹ 匡翠林¹ 张 勇¹

1 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙, 410083

摘要: GPS 变形监测数据的采样频率逐渐提高, 对数据预处理提出了更高要求。提出了一种改进方法, 即在小波包分析的基础上, 结合高阶系数加权中值滤波以及整体加权均值滤波的混合滤波方法对数据进行预处理。实验证明, 该方法能简单快速且最大程度地去除大量数据中的随机非随机噪声、粗差等无用信息, 同时突出了监测目标中趋势项、周期项等有用信息, 适用于处理采样频率较高的变形监测数据, 是一种实用的数据处理方法。

关键词: GPS 变形监测; 数据去噪; 小波包分析; 加权中值滤波; 加权均值滤波

中图法分类号: P207

文献标志码: A

GPS 变形监测数据可以有效分析观测目标的信息, 但受卫星、接收机及信号传播等影响, 监测数据中难免存在各种噪声, 为了准确提取有用信息, 必须进行噪声剔除。GPS 数据中噪声主要包括随机噪声、非随机噪声和粗差^[1-2], 可以通过适当的滤波方法进行处理。小波包分析比小波分析具有更精细的分解能力, 近年来已被广泛应用于 GPS 变形监测领域中。如吴江飞使用小波包分析的方法处理了 GPS 数据并将其用于周跳的检验和修复^[3]; 刘齐芬等基于小波包分析减弱了 GPS 数据中的相关噪声^[4]; Yi 等利用类似的方法剔除了桥梁变形监测数据中的噪声^[5]。小波包分析虽然能较好地消除随机噪声与非随机噪声的影响, 却不能有效地剔除粗差^[6-7], 而实际工程中, 很难准确分离大量数据中的各项噪声并分别进行处理; 另一方面, 由于现今 GPS 变形监测数据的采样频率越来越高, 有的甚至已达 100 Hz^[8], 而一般情况下桥梁、建筑物等监测目标变形缓慢, 因此相邻点间的变形会很小。为了更好地得到趋势项、周期项等信息, 需要对数据进行平滑操作。针对上述问题, 本文依据混合滤波思想, 结合加权中值滤波、加权均值滤波的方法, 提出了一种基于小波包的混合滤波方法, 经验证, 改进方法去噪优于传统方法, 尤其适用于采样率较高的 GPS 变形监测领域。

1 去噪方法原理

1.1 加权均值滤波

加权均值滤波是将滤波窗口中心点的值用窗口内各个值取加权平均来代替的一种方法, 它提高了中心点及其附近点的权重, 是一种特殊的均值滤波方法^[9]。其表达式如下:

$$\hat{X}(N) = \frac{1}{M} \sum_{N \in S} \omega_M X(N) \quad (1)$$

式中, $\hat{X}(N)$ 为滤波后观测值; $X(N)$ 为观测值, $N = 1, 2, 3, \dots, n$ 为采样点; M 为窗口大小; S 为窗口内观测值的集合; ω_M 为其归一化后对应的权值。

加权均值滤波本质上属于低通滤波器, 它可以提高信号的平滑度, 去噪效果优于均值滤波。研究发现, 窗口越大则信号越平滑, 但可能会丢失重要的细节信息, 实际应用中, 常用窗口大小为 5, 权值根据信号特征进行确定。

1.2 加权中值滤波

中值滤波的基本思想是将信号中某点的值用其邻域内各个值的中间值来替代, 加权中值滤波则提高了该点及其附近点的权重^[10]。数学表示如下:

$$\hat{X}(N) = \text{med} \left[\begin{array}{c} \omega_1 \diamondsuit X(1) \cdots \omega_2 \diamondsuit X(2) \\ \cdots \\ \cdots \omega_M \diamondsuit X(M) \end{array} \right] \quad (2)$$

式中, $\hat{X}(N)$ 为滤波后观测值; $X(N)$ 为观测值, $N = 1, 2, 3, \dots, n$ 为采样点; M 为窗口大小; $\text{med}[\cdot]$ 为对窗口内观测值进行中值运算; ω_M 为权值; \diamond 表示加权运算, $3\diamond X$ 表示有 3 个 X 的值。

加权中值滤波相比中值滤波而言更能保护信号的有用信息, 是一种非线性处理方法, 它可以有效剔除信号中的粗差值。为尽可能保护有用信息, 滤波窗口不能太大, 实际中常采用 5 点加权中值滤波的方法, 权值根据信号特征进行选取。

1.3 小波包分析

小波包分析方法不仅像小波分析一样对低频部分进行分解, 还能对高频部分进行分解, 提高了时频分辨率, 更能准确分离各频段的信息, 因此是一种更高精度的小波分析方法, 其分解如图 1 所示。

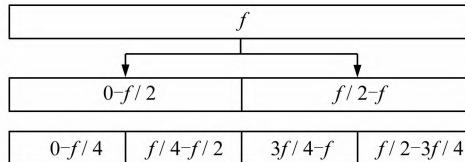


图 1 小波包分解示意图

Fig. 1 Wavelet Packet Decomposition

小波包分解和重构的算法分别如式(3)和式(4)所示^[11]:

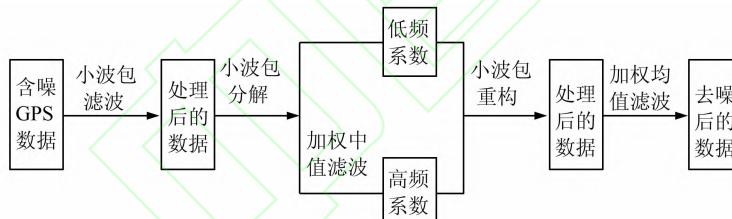


图 2 改进的混合滤波方法算法

Fig. 2 Algorithm of Improved Hybrid Filter Method

2) 高频系数加权中值滤波。选定恰当的滤波窗口及相应权值, 利用小波包进行分解, 对高频系数进行加权中值滤波处理并重构, 得到新的信号。

3) 整体加权均值滤波。同样选定恰当的滤波窗口及相应权值, 对新的信号进行加权均值滤波处理, 得到最后的去噪信号。

2 模拟实验验证

2.1 实验设计

实验设计了一组模拟的 GPS 变形监测数据, 如图 3 所示, 模拟数据包含 3 个周期项以及 1 个趋势项, 采样频率为 1 Hz, 长度为 1 000 个采样点, 通过式(5)产生。同时为了进一步验证该法的稳健性, 向模拟数据中分别加入不同噪声以便更

$$\begin{cases} d_q^{t+2k} = \sum \alpha_{p-2q} d_p^{t+1,2k} \\ d_q^{t+2k+1} = \sum \beta_{p-2q} d_p^{t+1,2k+1} \end{cases} \quad (3)$$

$$d_q^{t+1,k} = \sum (\alpha_{q-2p} d_p^{t+2k} + \beta_{q-2p} d_p^{t+2k+1}) \quad (4)$$

式中, α, β 为滤波器系数; d 为分解系数; p, q 为分解层数; t, k 为节点号。

小波包滤波是一种基于频率域的滤波方法, 算法步骤主要包括小波包分解、确定最优树、进行阈值处理和小波包重构 4 个步骤, 其中阈值处理是关键步骤。小波包分析是一种有效的去噪方法。

1.4 改进的混合滤波方法

由于小波包分析方法不能十分有效地剔除粗差, 同时为了增加滤波后数据的平滑度, 本文利用加权中值滤波的抗粗差性以及加权均值滤波的平滑性, 在小波包分析的基础上, 采用高频系数加权中值滤波以及整体加权均值滤波进行处理, 整体流程如图 2 所示。

改进的混合滤波方法具体算法步骤如下:

1) 小波包滤波。选定合适的小波基函数、分解层次、熵标准以及阈值, 进行小波包分解、最优树寻找、阈值处理以及小波包重构等过程, 得到滤波后的信号。

好地符合实际情况, 根据工程经验并利用正交实验设计的思想, 分为 9 种情况, 随机非随机噪声的信噪比与粗差率分别为: 2/0.02、2/0.01、2/0.005、5/0.02、5/0.01、5/0.005、10/0.02、10/0.01、10/0.005。

将改进方法与加权均值滤波、加权中值滤波、小波包滤波以及基于高频加权中值的小波包滤波方法进行对比。同时为确保能准确评判各方法的去噪效果, 选用工程应用中被广泛使用的信噪比(SNR)为评价指标, 信噪比越大则去噪效果越好。另外, 为保证去噪效果仅与去噪方法有关, 统一选取了最为常用的参数, 即加权均值滤波与加权中值滤波窗口大小都为 5, 权值恒定, 小波包滤波的小波基函数为 db4, 分解层数为 3, 熵标准为 sure, 进行软阈值去噪, 阈值恒定。

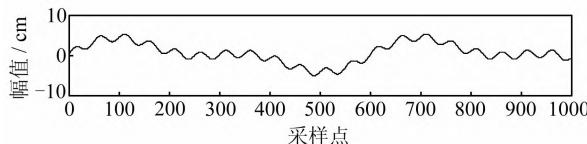


图3 模拟的GPS变形监测数据

Fig. 3 GPS Deformation Monitoring Data of Simulation

改进的混合滤波方法具体算法步骤如下:

$$S = 3\sin(2\pi t/600) + 2\sin(2\pi t/300) + \sin(2\pi t/50) + 0.0001t \quad (5)$$

2.2 实验分析

图4是在噪声污染最严重的情况下($2/0.02$)通过改进的混合滤波方法去噪后得到的数据,从图4中可以看出该方法去除了含噪数据中绝大部分的噪声,同时又保留了其平滑性,具有较好的去噪效果。

将各种含噪数据分别经上述滤波方法处理后得到的SNR如表1,同时计算各方法去噪数据的平均信噪比,如表2所示。分析表1、表2

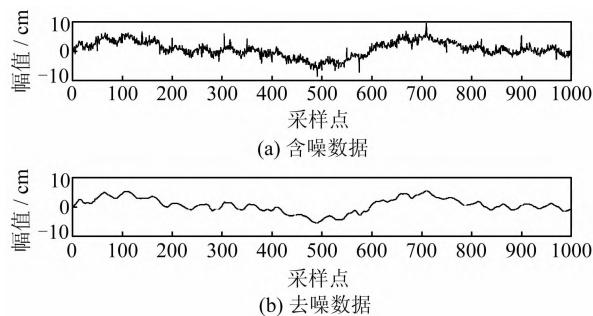


图4 改进方法的去噪效果

Fig. 4 De-noising Effect of Improved Method

的结果,可以发现单一滤波方法因为无法准确处理每一种噪声,去噪效果不如混合滤波方法,而基于高频加权中值的小波包滤波方法因为没有对数据进行平滑处理,去噪效果不如改进的混合滤波方法。综合各项指标,改进方法的信噪比都最大,且具有很好的平滑性,在利于分析的基础上最大程度地去除了无关信息,去噪效果优于传统方法,特别适合处理采样率较高的数据。

表1 不同噪声下各方法去噪数据的信噪比

Tab. 1 Signal-to-noise Ratio of the De-noising Data by Each Method Under the Different Noise

去噪方法	噪声情况								
	2/0.02	2/0.01	2/0.005	5/0.02	5/0.01	5/0.005	10/0.02	10/0.01	10/0.005
加权均值滤波	15.3552	15.7408	16.3319	17.1460	18.1261	19.0958	19.9118	20.7487	22.6835
加权中值滤波	14.7884	15.3202	15.4514	17.9837	18.2532	18.5734	22.8393	23.0550	23.3941
小波包滤波	16.5245	17.1024	18.0594	18.6771	19.4912	20.6188	21.3634	22.3698	24.1476
小波包+高频加权中值滤波	17.1546	17.4243	18.2032	19.0802	19.8657	21.0601	22.0917	22.6200	24.1695
改进的混合滤波方法	17.7572	18.0401	18.6922	19.6965	20.3049	21.4874	22.5626	23.1453	24.7202

表2 各方法去噪数据的平均信噪比

Tab. 2 Average Signal-to-noise Ratio of the De-noising Data by Each Method

去噪方法	加权均值滤波	加权中值滤波	小波包滤波	小波包+高频加权中值滤波	改进的混合滤波方法
平均信噪比	18.3489	18.8510	19.8171	20.1855	20.7118

3 工程应用实例

为了详细验证改进方法在实际工程中的使用价值,处理了一组采样率较高的GPS变形监测数据。该数据在某教学楼的七层楼顶连续观测6 d所得,数据采样间隔为1 s,经过双差解算、多路径重复性周期对齐等预处理,取其x方向的坐标残差数据,这6个时间序列中包括变形位移在内的趋势项、多路径效应在内的周期项以及噪声在内的随机项,其中趋势项与周期项之间的相关程度较高。图5是第一天的观测数据和利用改进的混合滤波方法去噪后的数据,选取db4为小波基函数,分解层数为5,加权中值滤波和加权均值滤波窗口大小为5。

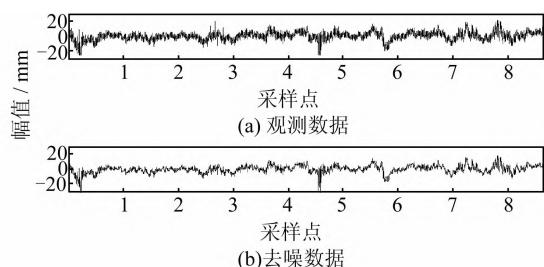


图5 第一天的观测数据和去噪数据

Fig. 5 Observation Data and De-noising Data of the First Day

此外,还采用传统的小波包滤波方法进行了处理,并计算了第一天与后面各天x方向数据的原始相关系数与各种方法得到的新的相关系数 r ,如表3所示。经过对比分析,发现改进的混合滤波方法处理后数据间的相关系数提高最显著,

去噪能力较传统的小波包滤波方法提高了10%，因此证明其最大程度地剔除随机项的同时，突出了趋势项与周期项的信息，去噪效果优于传统方法，可以应用于实际工程。

表3 第一天与后面各天x方向数据的相关系数

Tab. 3 Correlation Coefficients Between the First Data and Others in the Direction of x

处理方法	1~2 d	1~3 d	1~4 d	1~5 d	1~6 d
未处理	0.797 9	0.757 7	0.729 3	0.677 6	0.655 8
传统小波包滤波方法	0.837 9	0.799 8	0.770 4	0.718 2	0.692 7
改进的混合滤波方法	0.842 4	0.804 2	0.775 1	0.721 1	0.696 1

4 结语

针对GPS的数据处理问题，本文提出了一种改进方法，即基于小波包滤波，结合高阶系数加权中值滤波和整体加权均值滤波的混合滤波方法，去噪效果显著。其中小波包滤波集中去除了随机/非随机噪声，高阶加权中值滤波集中剔除了粗差，整体加权均值滤波提高了数据的平滑性。因此，该方法简单快速，在最大程度地保护数据有用信息的前提下，去除了绝大部分的噪声，并突出了其趋势项、周期项等需要监测的信息，尤其适用于高频GPS变形监测领域，可以推广到实际工程当中。

参 考 文 献

- [1] Tiampo K F, Mazzotti S, James T S. Analysis of GPS Measurements in Eastern Canada Using Principal Component Analysis[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(8): 1 483-1 506
- [2] Li Honglian, Zhang Weili, Zhang Jun, et al. A New GPS Dynamic Filter Algorithm Based on Stationary Wavelet Transformation [C]. FCC, New York, 2009
- [3] Wu Jiangfei. The Application of Wavelet Packet Analysis to GPS Data Processing[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2001, 2 (2): 63-65(吴江飞. 小波包分析在GPS数据处理中的应
- [4] Liu Qifen, Guo Wei, Shen Ronghui. Application of Wavelet Packet Analysis for GPS Data De-noising [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(19): 231-233(刘齐芬, 郭蔚, 沈荣辉. 小波包分析在GPS数据去噪中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(19): 231-233)
- [5] Yi T H, Li H N, Gu M. Experimental Assessment of High-rate GPS Receivers for Deformation Monitoring of Bridge[J]. *Measurement*, 2012: 420-431
- [6] Ma Pan, Meng Lingkui, Wen Hongyan. Kalman Filtering Model of Dynamic Deformation Based on Wavelet Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(4): 349-353(马攀, 孟令奎, 文鸿雁. 基于小波分析的Kalman滤波动态变形模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4): 349-353)
- [7] Wang Bo, Zhang Shubi, Wu Jiangwei, et al. Study on De-noising of GPS Single Epoch Deformation Signals Based on Wavelet Transform[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33: 23-24(王波, 张书毕, 武江伟, 等. 基于小波技术的GPS单历元形变信号降噪研究[J]. 测绘科学, 2008, 33: 23-24)
- [8] Jason B, Nyren R. Remote Monitoring of Deformation Using Differential Global Positioning System (D-GPS) [J]. *Geotechnical News*, 2012, 30(2): 28
- [9] Zhang X, Xiong Y. Impulse Noise Removal Using Directional Difference Based Noise Detector and Adaptive Weighted Mean Filter[J]. *Signal Processing Letters, IEEE*, 2009, 16(4): 295-298
- [10] Lu C T, Chou T C. Denoising of Salt-and-pepper Noise Corrupted Image Using Modified Directional Weighted Median Filter[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(10): 1 287-1 295
- [11] Wu Jizhong, Hua Xianghong, Gao Junqiang. Feature Extraction of Structure Natural Vibration and Multipath Separation Based on Wavelet Packet Decomposition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(4): 486-490(吴继忠, 花向红, 高俊强. 基于小波包分解的结构自振特征提取及多路径误差分离[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(4): 486-490)

A Hybrid Filter Method Based on Wavelet Packet and Its Application

ZHANG Zhetao¹ ZHU Jianjun¹ KUANG Cuilin¹ ZHANG Yong¹

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: In recent years, although data provide more information for monitoring objectives with the gradual

increase of the sampling frequency, nevertheless preprocessing creates higher requirements. In order to solve these problems, this paper proposes an improved hybrid filter method based on wavelet packet analysis that combines a high-frequency coefficients weighted median filter and the overall weighted mean filter used to pre-process the data. Through theoretical analysis and practical application, this method is shown to be simple, fast and has a maximum de-noising effect of random noise, non-random noise, gross error and other useless information, while highlighting the trend, periodic and other useful information for monitoring objectives. This improved method has better de-noising effect than traditional methods and is particularly suitable for high-rate deformation monitoring data and a practical method for data processing.

Key words: GPS deformation monitoring; data de-noising; wavelet packet analysis; weighted median filter; weighted mean filter

First author: ZHANG Zhetao, specializes in modern surveying data processing. E-mail: zhetaozhang@yeah.net

Foundation support: The Major State Basic Research Development Program of China(973 Program), No. 2013CB733300; The National High tech R&D Program of China(863 Program), No. 2012AA121301; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274010, 40974007; Central South University Sub-topics Graduate Independently Explore Innovative Projects, No. 2013zzts254.

(上接第 461 页)

The Applicability of Kriging Interpolation Method in GPS Velocity Gridding and Strain Calculating

LIU Xiaoxia^{1,2} JIANG Zaisen² WU Yanqiang²

1 Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

2 Key laboratory of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China

Abstract: In this article, we derive a spherical strain Kriging formula based on the basic theory of Kriging, and applied it to simulated and real GPS data. We analyzed its difference with the least-square collocation method. Crosscheck results indicate that Kriging interpolation is feasible and valid in GPS velocity smoothing and gridding. The Kriging strain results reveal low robustness and obvious edge effects, but the smoothed and gridded results for GPS velocity data during 1999–2004 from Kriging interpolation methods are in agreement with the results calculated by the Least-square collocation method. The strain rate results from the two methods are similar in the whole distribution characteristic, however, the kriging results show low self-consistency. In a word, the Kriging strain method is not as good as the least-square collocation method for robustness and edge effect.

Key words: Kriging method; varigram; Kriging spherical strain formula; GPS velocity field

First author: LIU Xiaoxia, PhD candidate, specializes in tectonic geodesy and the application of GPS observations in earthquake medium and long term forecasts. E-mail: lxxia_0422@163.com

Foundation support: The Basic Research Project of Institute of Earthquake Science of China Earthquake Administration, No. 2011IES010101; the Specific Fund of Seismic Industry, No. 201008007.