

基于小波滤波和 PCA 组合的多路径改正方法^{* 1}

张昊楠¹⁾ 匡翠林¹⁾ 卢辰龙¹⁾ 周元华²⁾

(¹⁾中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083)
(²⁾广东省地质测绘院,广州 510800)

摘 要 针对高频随机噪声特征,提出基于小波与主成分分析(PCA)相结合的 GPS 噪声消除方法。实测数据分析表明,该组合方法较单一滤波方法能更有效地削弱多路径效应及高频随机噪声,提高定位精度。

关键词 主成分分析法;小波;多路径效应;高频随机噪声;GPS 变形监测

中图分类号:P207

文献标识码:A

A MULTIPATH CORRECTION METHOD BASED ON WAVELET FILTERING AND PCA

Zhang Haonan¹⁾, Kuang Cuilin¹⁾, Lu Chenlong¹⁾ and Zhou Yuanhua²⁾

(¹⁾ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083
(²⁾ Institute of Surveying and Mapping for Geology of Guangdong Province, Guangzhou 510800)

Abstract According to the noise characteristics, an integrated noise correction method based on wavelet filtering and the Principal Component Analysis (PCA) is proposed. The experiment data shows that the combined method is superior to a single filtering method, the former can effectively weaken the multipath effect and high frequency random noise.

Key words: PCA (Principal Component Analysis); wavelet filtering; multipath effect; high-frequency random noise; GPS deformation monitoring

1 引言

在 GPS 变形监测中,由于一般基线较短,可以通过差分技术将电离层延迟、对流层延迟、卫星轨道误差、接收机和卫星钟差等相关性误差进行消除或减弱,但多路径效应在基线两端不具有相关性,无法通过差分消除^[1]。目前,削弱多路径效应影响研究主要可以分为硬件改进和数据后处理两大类。硬件改进主要是通过接收机信号处理时改进接收机跟踪环路结构及算法等^[2];数据后处理方法主要是针对

原始观测数据,利用各种滤波方法^[3-8]进行去噪。

本文将利用主成分分析法(PCA, Principal Component Analysis)和小波滤波相结合的 GPS 噪声处理方法,对一个测站多天的 GPS 定位结果进行滤波处理,实测数据分析结果表明,该方法能有效地削弱多路径效应及高频随机噪声,提高定位精度,较单一的滤波方法更有效。

2 PCA 与小波滤波方法

PCA 是一种统计分析方法。设一特征为 n 维

* 收稿日期:2012-12-14

基金项目:国家自然科学基金(41004012);广东省财政产业技术研究项目(9)

作者简介:张昊楠,1988 年生,男,硕士研究生,主要从事 GNSS 数据处理及变形监测研究。E-mail: zhanghaonan@csu.edu.cn

的 m 个样本集,可建立一个 $m \times n$ 的数据矩阵 X 。在利用 PCA 方法对同一测站多天的 GPS 坐标残差时间序列进行分析时,若天数为 n ,每天观测历元个数为 m ,则可构成数据矩阵 X 。 X 的协方差矩阵为:

$$B = \frac{1}{m-1} X^T X$$

(1)

X 用正交向量基 V 表示为:

$$X = A V$$

$m \times n \qquad m \times mn \times n$

(2)

即

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ki} v_{kj}$$

(3)

其中

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ik} v_{kj}$$

(4)

a_{ij} 即 X 的第 i 行的第 j 个主成分, v_{jk} 表示第 k 个特征向量的第 j 个分量。

若误差矩阵中各天的误差以多路径为主要成分时,则一个或几个主模式分量之和即可代表多路径误差对各天坐标序列的影响。多路径效应误差十分复杂,具有较宽的频带,但主要表现为低频,且各天之间重复性较高,表现为共性误差,可以得到较好地消除;但是由于接收机噪声等高频随机噪声互不相关,使用 PCA 方法并不能有效的消除这部分误差。

小波变换是一种信号的时间-尺度分析方法^[4]。利用小波具有多尺度时空分辨率的特点,将信号进行频率的多尺度分解,通过对分解的各层选择合适的阈值,并对高频噪声部分进行收缩处理,将修正后的高频系数与低频近似信号部分进行重构,即可消除高频随机噪声,得到质量较好的有用信号。采用组合方法时,先利用小波滤波对各天残差坐标时间序列进行预处理,可以有效地削弱高频随机噪声,并且保留主要的多路径信号,再对小波滤波后的多天数据进行 PCA,消除多路径效应影响,进一步提高定位精度。

3 实验分析

为了验证小波及 PCA 结合方法对去除多天重复性多路径误差的有效性,在香港理工大学某教学楼楼顶放置两台 GPS 接收机进行试验,观测环境有多处产生多路径信号的强反射面。基准站使用 Topcon 双频接收机,天线类型为 Topcon CR3 扼流圈天线,流动站使用 Septentrio 接收机和普通测地型天线,基线长度约 4 m,天线位置固定,数据采样率为 1 Hz,从 2006 年年积日 215 日开始每天连续 24 小时观测至年积日 221 日。

数据处理基于 GPSSM 软件^[9]逐历元解算出流动站的位置,再与已知坐标求差得到坐标残差序列。

由于基线长度非常短,经过差分处理后,其主要误差来源为基线两端的多路径效应和接收机的高频随机噪声。经分析,多路径效应主要取决于卫星、测站及周围反射面间的几何构型。当接收机天线位置及周围环境保持不变时,由于 GPS 卫星运行轨道的恒星日的重复性,多路径效应具有周期性变化的特点^[10]。最新的研究发现,GPS 卫星的地面轨迹并非具有严格意义上的恒星日周期^[11,12],其几何重复周期略低于标准恒星日周期。基于此,本文根据相邻两天互相关函数求最大相关系数估计得到的重复周期为 23 h 55 m 55 s,与文献[11]的恒星周期一致。将各天坐标残差序列按照平移时间进行平移,平移后各天 N 方向坐标残差序列如图 1 所示(为方便将各天数据放在一张子图内,将各天坐标残差序列依次加常数 40 mm),E、U 方向与 N 方向类似,限于篇幅,本文只分析 N 方向数据。平移后相邻两天的坐标残差序列相关系数见表 1,第一天 DOY215 与后面各天的坐标残差序列相关系数如表 2。

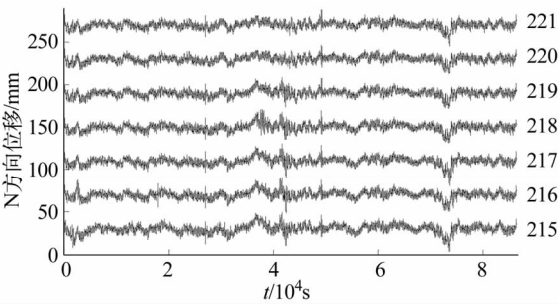


图 1 N 方向的原始坐标残差序列
Fig. 1 Raw coordinate residual series of N direction

表 1 相邻两天原始坐标残差序列间的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients of raw coordinate residual series in consecutive two days

	215 ~ 216	216 ~ 217	217 ~ 218	218 ~ 219	219 ~ 220	220 ~ 221
N	0.83	0.90	0.89	0.89	0.87	0.89
E	0.71	0.83	0.88	0.89	0.86	0.88
U	0.87	0.92	0.93	0.94	0.88	0.94

表 2 第一天 DOY215 与后面各天坐标残差序列相关系数表

Tab. 2 Correlation coefficients of coordinate residual series between the first day of DOY215 and the day after

	215 ~ 216	215 ~ 217	215 ~ 218	215 ~ 219	215 ~ 220	215 ~ 221
N	0.83	0.83	0.80	0.76	0.71	0.71
E	0.71	0.80	0.76	0.73	0.68	0.66
U	0.87	0.87	0.84	0.81	0.72	0.71

由图 1 可以看出,由于受到多路径效应及高频随机噪声的影响,N 方向坐标残差时间序列存在一定的波动,偏差最大值约 20 mm,这是高精度动态变形监测所不允许的。7 天的坐标残差序列整体形态相似,各天的曲线变化存在较为明显的一致性,说明其具有一定的相关性。如表 1、表 2 所示,相邻两天各方向相关系数都在 0.7 以上,且 DOY215 日的残差序列与之后 6 天的残差序列相关系数也都在 0.6 以上,但随着时间的推移,相关性逐渐降低。

首先使用光滑性和消噪效果较好的 db8 小波对各天残差序列进行 6 层软阈值去噪处理,去噪之后的残差坐标时间序列如图 2 所示,通过与原始数据对比可发现,经小波处理后的坐标残差序列高频噪声得到了很好的削弱,但是由于多路径效应主要体现为低频噪声,波动较大,总体精度改善不大。为了说明小波处理前后残差序列的信号功率谱的变化,图 3 给出了 DOY216 天 N 方向上采用 welch 平均周期图法得到的功率谱密度估计。由图 3 可以看出,利用小波对坐标残差序列进行去噪处理后,高频噪声的功率谱密度明显减小,而信号频率小于 0.03 Hz 的低频信号的功率谱密度基本保持不变,说明小波处理后有效地削弱了高频随机噪声,并且保留了低频周期约为几十秒到几十分钟的多路径信号。

对各天经小波去噪后的坐标残差时间序列构成

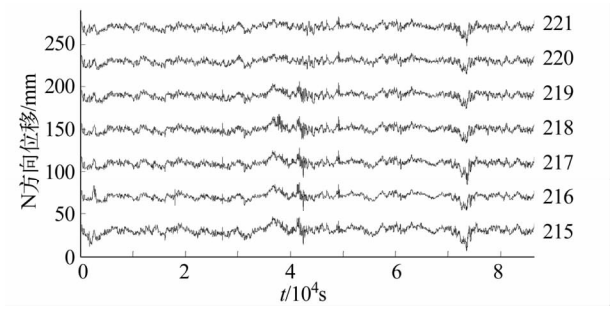


图 2 db8 小波去噪后的坐标残差序列
Fig. 2 Denoised coordinate residual series based on db8 wavelet filtering

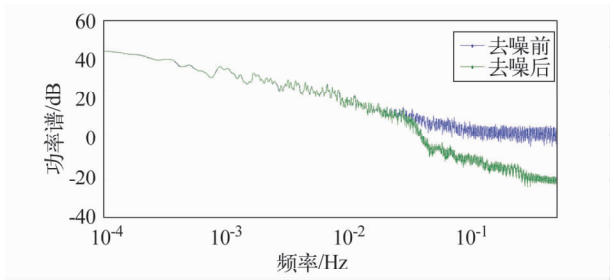


图 3 小波去噪前后的功率谱密度
Fig. 3 Power spectrum density before and after denoising of wavelet filtering

的数据矩阵进行主成分滤波分析,计算出前三个主成分对各个坐标分量的贡献率分别为 89.02%; 5.48% 和 2.57%,三个主成分在各天对应的响应系数如图 4 所示。由于第一主成分对坐标分量的贡献率远大于其他主成分,且其空间响应系数较为一致,均为 -0.4 左右,因此将 PCA 方法得到的第一主成分作为多路径效应部分,进行提取和消除。采用 PCA 方法消除多路径效应后的坐标残差序列如图 5 所示。对比图 5 和图 1 可以看出,经过 PCA 提取和消除第一主成分之后的各天残差坐标序列,波动明显减小,低频多路径效应误差得到了明显的削弱,整个坐标序列趋近于一条直线,且高频噪声也得到了较好的削弱。

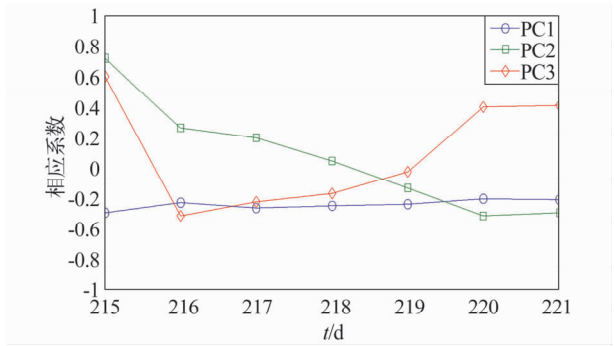


图 4 坐标残差序列的主成分响应系数
Fig. 4 Principal component coefficients of coordinate residual series

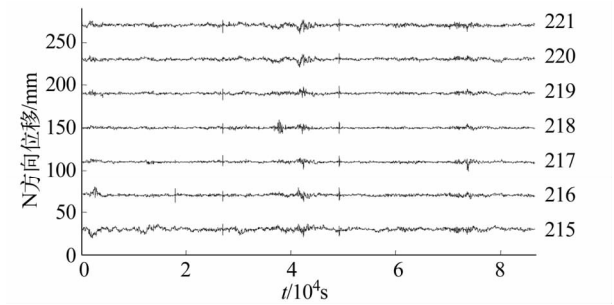


图 5 PCA 处理后的坐标残差序列
Fig. 5 Coordinate residual series after PCA

为了验证组合方法较单一滤波方法的有效性,分别使用小波滤波法和 PCA 方法对各天残差坐标序列进行多路径效应的提取和消除。使用小波滤波法时,首先使用 db8 小波对 DOY215 天的残差序列进行强制消噪处理,提取多路径模型,再将之后各天经软阈值消噪处理的残差序列减去该多路径模型,具体步骤可参考文献[13]。表 3 为分别采用小波滤波、PCA 方法以及 PCA 与小波组合方法进行多路径消除之后的均方根误差统计结果表。其中 B_{ef} 表示去噪之前的均方根统计结果, $M1$ 表示采用小波方法提取多路径成分并消除之后的均方根统计, $M2$ 表

示为 PCA 处理之后的均方根统计结果,M3 为 PCA 及小波组合方法处理之后的均方根统计结果,在此仅给出 DOY216 ~ 221 的统计结果以便于同小波方法进行对比。为了更直观地给出各种方法对定位精

度的提高程度,给出了各种方法对残差坐标序列均方根提高的百分比,图 6 为连续 6 天的 GPS 坐标残差序列在分别应用小波方法,PCA 以及 PCA 与小波组合方法后的精度比较。

表 3 均方根误差统计结果表(单位:mm)
Tab.3 Statistics of RMS errors(unit:mm)

DOY	N 方向				E 方向				U 方向			
	Bef	M1	M2	M3	Bef	M1	M2	M3	Bef	M1	M2	M3
216	4.12	1.99	1.51	1.08	4.79	2.97	2.36	1.92	14.89	5.74	5.05	4.24
217	4.13	1.87	1.34	0.90	4.42	2.41	1.50	1.06	13.84	5.67	3.99	3.52
218	4.00	1.99	1.33	1.03	4.14	2.61	1.44	0.80	13.38	6.14	3.32	2.77
219	3.90	2.26	1.42	0.98	4.13	2.70	1.54	0.88	12.87	6.84	3.61	3.11
220	3.62	2.55	1.63	1.26	3.98	3.04	1.86	1.30	11.77	8.60	4.73	4.34
221	3.69	2.51	1.67	1.28	4.06	3.18	1.99	1.37	12.22	8.71	5.22	4.77

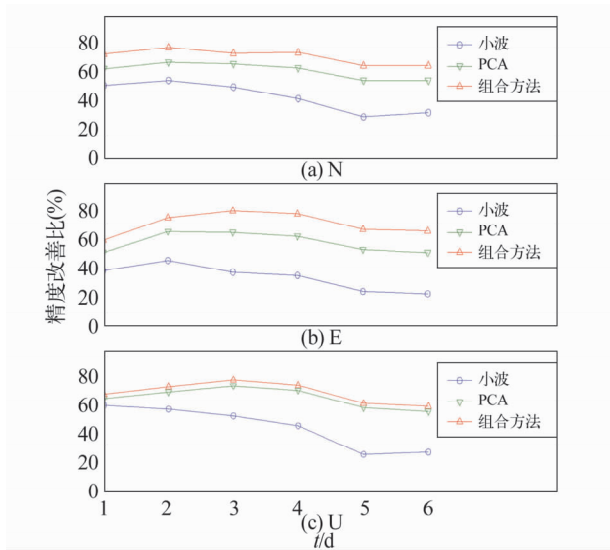


图 6 应用不同方法后 GPS 定位精度的提高与间隔天数的关系曲线
Fig.6 Relation curve between the improvement of GPS positioning accuracy and time interval

从表 3 及图 6 可以看出,采用三种方法均能有效削弱多路径效应对定位结果的影响,提高 GPS 定位的精度;对原始坐标残差序列仅运用小波方法后的改善效果最差,且精度的改善程度随着提取的多路径模型间隔天数的增加而逐渐减小,例如在 DOY221 日,采用小波方法对 E 方向坐标精度的提高仅为 21.7%,这是因为随着间隔天数的增加,多路径信号的相关性减小,提取的多路径模型修正效果大大降低,这说明小波滤波方法仅适用于时间间隔较短的多路径效应消除;应用 PCA 滤波可使定位精度较小波方法提高 10 ~ 40%,且其精度改善受间隔天数的影响很小,在 DOY221 日,经过 PCA 滤波处理的 E 方向坐标定位的精度提高 50 ~ 99%;PCA 和小波组合方法的改善效果最佳,其定位精度较 PCA 滤波方法进一步提高约 10%。

4 结束语

采用 PCA 和小波滤波的组合方法消除多天坐标时间序列中的多路径效应和高频随机噪声。通过对多天 GPS 多路径重复性实验的实际观测数据进行处理及与分别单独使用小波变换和 PCA 方法进行对比分析的结果表明,利用 PCA 和小波变换组合的方法能提取并削弱多天多路径效应的影响,克服了由于多路径效应随着时间间隔增加导致坐标序列之间相关性减小而引起的精度降低问题,且改善了 PCA 方法易受各天坐标序列高频随机噪声影响的问题,有效地提高了定位精度。PCA 方法在本文中体现的是提取共模误差,时间短则受到异常信息影响较大,时间过长则受相关性降低的影响,所以应平衡这两个因素,在实际应用中根据数据的特点选取不同的时间跨度。

参 考 文 献

1 戴吾蛟,丁晓利,朱建军. GPS 动态变形测量中的多路径效应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008, (1): 65 ~ 70. (Dai Wujiao, Ding Xiaoli and Zhu Jianjun. Study on multipath effect in structure health monitoring using GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, (1): 65 ~ 70)

2 戴吾蛟,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. (Dai Wujiao, et al. EMD filter method and its application in GPS multipath[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(4): 321 ~ 327)

3 范晓燕,周乾. GPS 测量中多路径效应研究综述[J]. 工程地球物理学报,2010,(6): 382 ~ 386. (Fan Xiaoyan and Zhou Qian. Review of multipath effects in GPS measurement [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, (6): 382 ~ 386)

4 黄德武,熊永良. 基于小波分析的 GPS 多路径效应研究

[J]. 工程勘察,2007 (4): 63 – 65. (Huang Dewu and Xiong Yongliang. Study on multipath effect based on wavelet analysis [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2007, (4): 63 – 65)

5 Han S and Rizos C. Multipath effects on GPS in mine environments [R]. 10th Int Congress of the Int Society for Mine Surveying , Fremantle , Australia 1997, 2 – 6.

6 钟萍,等. Vondrak 滤波法用于结构振动与 GPS 多路径信号的分离[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006, 37 (6) : 1 189 – 1 195. (Zhong Ping, et al. Separation of structural vibrations and GPS multipath signals using Vondrak filter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(6): 1 189 – 1 195)

7 Dong D , et al. Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, (111): B03405.

8 敖敏思,等. PCA 和 KLE 在高采样率 GPS 定位中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2011, (6): 145 – 150. (Ao Minsi, et al. Application of PCA and KLE to high-rate positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, (6): 145 – 150)

9 戴吾蛟,等. GPS 建筑物振动变形监测中的单历元算法

研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007, 32(3): 234 – 237. (Dai Wujiao, et al. Single epoch ambiguity resolution in structure monitoring using GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 234 – 237)

10 钟萍,袁林果,丁晓利. GPS 多路径重复性试验研究[J]. 测绘科学,2010, 35(2): 43 – 45. (Zhong Ping, Yuan Linguo and Ding Xiaoli. Experimental analysis of GPS multipath day-to-day repeatability[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(2): 43 – 45)

11 Choi K, et al. Modified sidereal filtering: implications for high-rate GPS positioning[J]. Geophys Res Lett. , 2004, (31): L24610.

12 Larson K M, et al. Improving the precision of high-rate GPS[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, (111): B05442.

13 戴吾蛟,伍锡锈,罗飞雪. 一种利用增广参数 Kalman 滤波的 GPS 多路径效应处理方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2012, 37(4): 423 – 427. (Dai Wujiao, Wu Xixiu and Luo Feixue. GPS multipath effect processing method based on augmented parameters Kalman filtering [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(4): 423 – 427)

(上接第 119 页)

4 结语

1)GM(1,1)残差模型具有较高的精度,合理选取预测步长可达到大坝形变预测的要求。实例中,由于大坝变形受环境影响极大,形变量在汛期变化特别大,采用等维递补预测具有极大优势;

2)在灰色预测模型建模机理上,要求建模数据本身有较高的精度和可靠性,尽可能多的包含系统所需信息,减少或消除数据误差,使信噪比达到最小;

3)灰色系统模型理论推导严谨,计算简便,在变形监测的动态数据处理中有较大的实用价值。大坝形变与水位、气温的关系可用灰色系统理论作进一步研究,灰色系统理论在大坝形变预测中的应用也有待进一步完善。

参 考 文 献

1 贾济宏,张春泉. 灰色模型在三维变形监测中的应用 [R]. 2007' 全国测绘科技信息交流会,成都,2007. (Jia Jihong and Zhang Chunquan. Application of grey model in the 3 D deformation monitoring [R]. The conference of surveying and mapping science and technology information,

Chengdu,2007)

2 陈永奇,吴子安,吴中如. 变形监测分析与预报[M]. 北京:测绘出版社,1998. (Chen Yongqi,Wu Zi'an and Wu Zhongru. Deformation monitoring analysis and forecast [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press,1998)

3 姚冬青. 灰色系统理论及在高层建筑沉降变形预测中的应用[D]. 河南理工大学,2008. (Yao Dongqing. The theory of grey system and its application in deformation prediction of high-rise building subsidence [D]. Henan Polytechnic University,2008)

4 程晨健. 基于灰色模型和 GIS 技术的地壳形变预测及运动研究[D]. 西北大学,2012. (Cheng Chenjian. Crustal deformation prediction and motion based on grey model and GIS [D]. Northwest University,2012)

5 向玮. 软土路基最终沉降量的灰色预测研究[D]. 武汉理工大学,2006. (Xiang Wei. Grey prediction research of final settlement of soft soil subgrade [D]. Wuhan University of Technology,2006)

6 蓝悦明,王新洲. 灰色预测用于大坝水平变形预测的研究 [J]. 武汉测绘科技大学学报,1996,21(4): 350 – 354. (Lan Yueming and Wang Xinzhou. Research of grey forecast on dam level displacement [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1996, 21(4): 350 – 354)