

Vondrak 滤波法用于结构振动与 GPS 多路径信号的分离

钟 萍¹, 丁晓利¹, 郑大伟², 陈 武¹

(1. 香港理工大学 土地测量与地理咨询学系, 九龙 红磡;
2. 中国科学院 上海天文台天文地球动力学研究中心, 上海, 200030)

摘要: 根据 Vondrak 滤波法在信号的截断频带上具有较高信号分辨率的特点, 将 Vondrak 带通滤波法应用于全球定位系统(GPS)结构变形监测中以分离结构振动和多路径效应的影响。对 GPS 实际观测资料进行分析, 结果表明: 采用该方法不仅能从坐标序列中成功提取结构振动信息, 也能正确分离载波相位双差观测值的残差序列中的结构振动和多路径效应影响, 因而在提高 GPS 定位精度上具有较大的应用潜力。

关键词: Vondrak 滤波法; 全球定位系统; 多路径效应; 结构变形监测; 结构振动

中图分类号: P228; TH311 文献标识码: A 文章编号: 1672 7207(2006)06 1189 07

Separation of structural vibrations and GPS multipath signals using Vondrak filter

ZHONG Ping¹, DING Xiao li¹, ZHENG Da wei², CHEN Wu¹

(1. Department of Land Surveying and Geo Informatics,
Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China;
2. Center for Astrogeodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Vondrak bandpass filter, which has good signal resolution over its signal truncation frequency band and is effective in separating structural vibrations from global positioning system (GPS) multipath effects, was applied to GPS structural deformation monitoring. Real GPS observations were used to test the performance of the proposed filter. The results show that the method has the potential to improve the quality of GPS results, which can successfully extract the desired vibration signals from the point coordinate series and separate the structural vibrations and multipath signals from the double difference carrier phase observation residuals series.

Key words: Vondrak filter; global positioning system; multipath effects; structural deformation monitoring; structural vibrations

全球定位系统(global positioning system, 简称GPS)技术具有精度高、速度快等优点。近几年, 国内外许多研究者已将GPS技术应用于各种工程结构(如大桥、大坝、高塔和高大建筑等)的变形监测中, 研究表明: 典型的结构振动振幅为10~200 mm, 频率为0.1~10 Hz^[1]。当GPS用于变形

监测时, 基线通常布设较短(如小于5 km), 因此, GPS误差源中的卫星和接收机钟差通过双差被完全消除; 而与距离相关的误差(如电离层、对流层的折射与延迟, 卫星轨道误差)通过双差方法处理后, 其影响也可忽略。但多路径误差不能通过差分法消除, 因而成为许多高精度GPS应用的主要误

收稿日期: 2006 02 14

基金项目: 香港特别行政区研究资助局项目(Poly U 5148 /04E); 香港理工大学建筑与地政学院项目(897M)

作者简介: 钟 萍(1980-), 女, 博士研究生, 从事GPS理论与应用研究

通讯作者: 钟 萍, 女, 博士研究生; E-mail: p.zhong@polyu.edu.hk

差来源³。多路径效应对载波相位观测值的影响可达GPS信号波长的1/4³(如对于L1载波相位观测值,其影响约为5cm)。因此,在结构变形监测中,要有效地测定结构体的微小振动,必须正确分离多路径效应误差和结构振动信息。

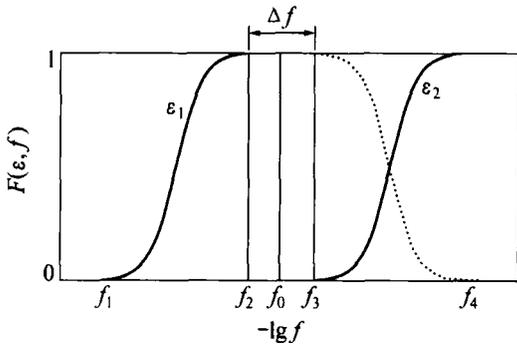
近年来,许多滤波技术已应用于结构体的变形监测中,如小波滤波⁴、有限长单位脉冲响应(FIR)滤波⁵和卡尔曼滤波⁶等。这些滤波器的滤波性能差异较大,且当高频信号与随机噪声难以识别时,采用大多数的滤波方法会损失资料中的高频信号。在此,本文作者基于Vondrak滤波法用于滤波时在信号的截断频带上具有较好的信号分辨率的特性,将Vondrak带通滤波法应用于GPS结构变形监测中,以分离多路径误差和结构振动信息。

1 数学方法

数字滤波器的性能由该滤波器的频率响应函数决定。Vondrak滤波器频率响应函数的解析表达式为⁷:

$$F(\epsilon, f) = [1 + \epsilon^{-1}(2\pi f)^6]^{-1} \quad (1)$$

式中: F 为频率响应函数; ϵ 为平滑因子; f 为信号频率。选用不同的平滑因子 ϵ , 由式(1)可得频率响应函数曲线(见图1)。



$\epsilon_1: 1 \times 10^{-8}; \epsilon_2: 1 \times 10^{-6}; \epsilon_3: 1 \times 10^{-4};$
 $\epsilon_4: 1 \times 10^{-2}; \epsilon_5: 1 \times 10^0; \epsilon_6: 1 \times 10^2$

图1 Vondrak滤波器的频率响应函数曲线

Fig 1 Frequency response function curves of Vondrak filter

从图1可以看出,对于不同的平滑因子, Vondrak滤波器频率响应函数曲线的形状几乎完全相同。这些曲线反映了Vondrak滤波器的滤波特性:对于不同平滑因子 ϵ 的频率响应曲线, $F=1$ 所对应

的周期($-\lg f$)信号在滤波过程中不受影响;而 $F=0$ 所对应的周期信号在滤波过程中被全部滤掉; $0 < F < 1$ 所对应的周期信号被不同程度地部分滤掉,这部分即为滤波器的截断频带。

根据Vondrak滤波法单边滤波器的频率响应曲线性质,通过给定需保留频段的中心频率 f_0 和带通频段的宽度 Δf 即可实现Vondrak带通数字滤波⁸。图2所示为Vondrak带通滤波器的示意图。

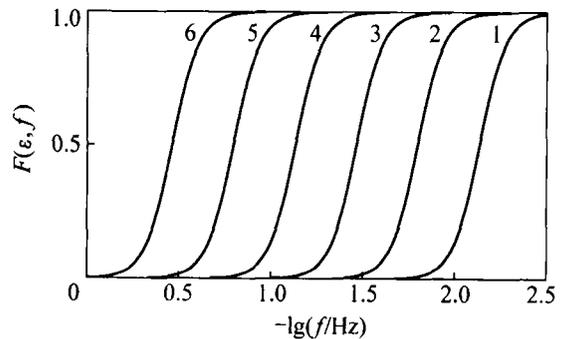


图2 Vondrak带通滤波器示意图

Fig 2 Schematic diagram of Vondrak bandpass filter

将式(1)变为 ϵ 和 F 的函数,则频率 f 的对数可表示为:

$$\lg f = \lg(1 - F)/6 + \lg \epsilon / 6 - \lg 2\pi - \lg F / 6 \quad (2)$$

假定图2中各频率响应函数的边界值分别为 $F(\epsilon_1, f_1) = 0.01, F(\epsilon_1, f_2) = 0.99, F(\epsilon_2, f_3) = 0.01$ 和 $F(\epsilon_2, f_4) = 0.99$, 其中, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为要保留频段内两边界值所对应的平滑因子。由式(2)计算可得:

$$\begin{cases} \lg f_1 = -0.47 + \lg \epsilon_1 / 6, \\ \lg f_2 = -1.13 + \lg \epsilon_1 / 6, \\ \lg f_3 = -0.47 + \lg \epsilon_2 / 6, \\ \lg f_4 = -1.13 + \lg \epsilon_2 / 6. \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),频段的中心频率 f_0 和带通频段的宽度 Δf 可表示为:

$$\lg f_0 = \lg(f_2 f_3) / 2 = \lg(f_1 f_4) / 2 = -0.80 + \lg(\epsilon_1 \epsilon_2) / 12; \quad (4)$$

$$\Delta f = \lg(f_2 / f_3) = -0.66 + \lg(\epsilon_1 / \epsilon_2) / 6. \quad (5)$$

则 ϵ_1 和 ϵ_2 可由如下公式计算得到:

$$\lg \epsilon_1 = 6.78 + 6 \lg f_0 + 3 \Delta f; \quad (6)$$

$$\lg \epsilon_2 = 2.82 + 6 \lg f_0 - 3 \Delta f. \quad (7)$$

用式(6)和(7)中确定的2个平滑因子分别对观测资料进行2次平滑计算求得平滑值,2个平滑值

之差即为观测资料经 Vondrak 带通数字滤波后的平滑结果。

从图 2 可以看出, 差值 $F(\epsilon_1) - F(\epsilon_2)$ 中不仅包括由 f_0 和 Δf 所确定的周期信号, 而且包括由于截断频带的影响保留下来的部分残余信号(频率介于 f_1 和 f_2 之间的信号)。可以认为滤波后保留下来的信号由图 2 中的左分支和右边的虚曲线所包围的部分组成。同时, 从图 2 还可看出, Δf 的绝对值越小, 带通滤波器越窄, 滤波后保留的信号量越少; 反之, Δf 的绝对值越大, 带通滤波器越宽, 滤波后保留的信号量越多。

当 Δf 为正, $-\lg f_3 - (-\lg f_2) > 0$ 即 $\lg f_3 < \lg f_2$ 时, 可形成一带通较窄的滤波器, 但此时频率为 f_0 的信号振幅将由于截断频带的影响受到抑制; 特别地, 当 $\Delta f = 0$ 时, 则 $f_0 = f_2 = f_3$, 此时虽然差值 $F(\epsilon_1, f_0) - F(\epsilon_2, f_0)$ 达最大值 0.98, 但滤波后中心频率为 f_0 的信号振幅仍有 2% 的衰减; 当 Δf 为负, 即 $\lg f_3 > \lg f_2$ 时, 频率为 f_0 的信号经滤波后将完全保留, 但与其频率相近的其他信号也将同时被保留。

由于 GPS 接收机的硬件处理技术主要对中、长时间延迟的多路径信号有效, 因此, 由近处物体反射(如小于 $30 \text{ m}^{[9]}$)引起的短时间延迟的多路径信号便成为 GPS 变形监测的主要误差源^[10]。图 3 所示为在实验中得到的多路径误差序列经快速傅里叶变换(FFT)后的频率分布图。

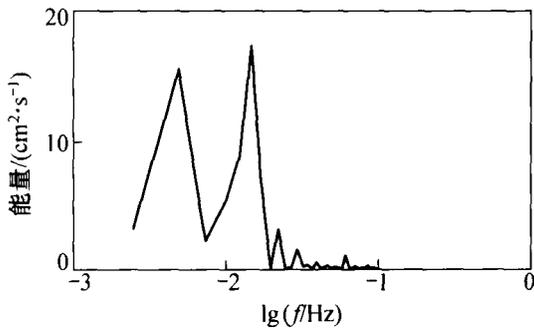


图 3 由 FFT 得到的多路径误差序列的频谱图

Fig. 3 FFT spectrum of multipath error series

从图 3 可以看出, 主要的多路径误差周期为 40 ~ 500 s。一般来讲, 经接收机硬件削弱后残余的多路径误差周期约为几十秒到几十分。考虑到前面所提及的典型的结构振动周期为 0.1 ~ 10 s, 为了在滤波过程中最大限度地保留振动信号的振幅, 选择带通频段的宽度 $\Delta f < 0$; 同时, 为了有效地分离结构振动和多路径误差的影响, 选择 $\Delta f = -0.2$, 由式

(2) 计算可知, 此时滤波后频率为 $f_0/4$ 的信号的振幅仅为滤波前的 9% 左右。

2 实验结果与分析

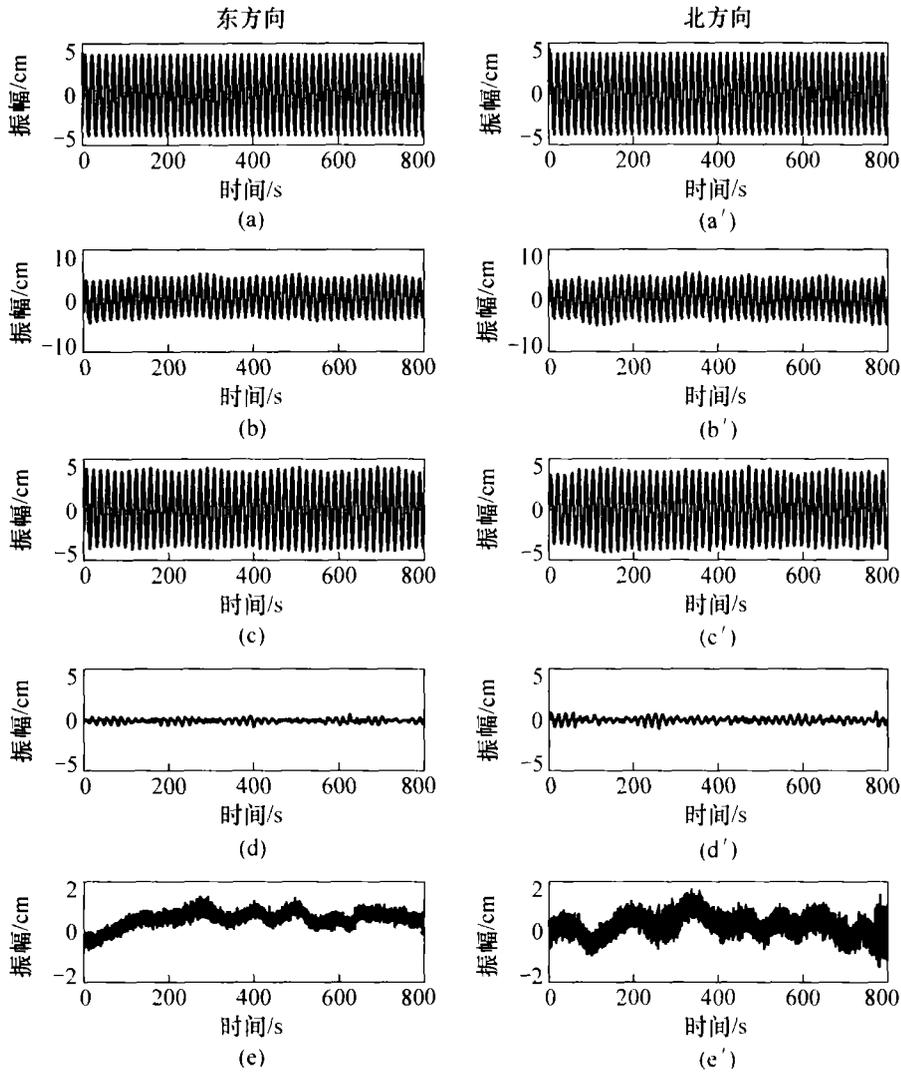
从 2004 年 3 月 10 日开始, 用徕卡 SR530 型双频 GPS 接收机和 AT502 型天线在 1 条长约为 86 m 的基线上以 10 Hz 的数据采样率进行 3 d 的观测。采集 GPS 数据时, 第 1 天静止观测, 第 2 天和第 3 天的观测中 GPS 天线置于 1 个由计算机控制可模拟各种振动类型的振动台上, 模拟振动以给定的频率和振幅在平面内做圆周运动。观测中, 第 2 天模拟振动信号的频率和振幅分别为 0.06 Hz 和 40 mm (这里 0.06 Hz 虽不在典型的结构振动频率范围内, 但顾及有外力作用时, 振幅增大, 其振动频率将稍微减小的情况); 第 3 天振动信号的频率为 0.1 Hz, 振幅从 40 mm 变为 20 mm, 再从 20 mm 变为 10 mm。

将 Vondrak 带通滤波法应用到 GPS 观测实验中。首先根据快速傅里叶变换(FFT)方法确定频段的中心频率 f_0 , 选择带通频段的宽度 $\Delta f = -0.2$, 然后用式(6)和(7)求得的两平滑因子 ϵ_1 和 ϵ_2 分别对资料序列进行 2 次平滑计算并求差, 最后得到带通数字滤波结果。实验中求得第 2 天的两平滑因子分别为 1.13×10^{-6} 和 7.83×10^{-6} ; 第 3 天的平滑因子分别为 23.63×10^{-4} 和 1.64×10^{-4} 。

为了验证该方法在分离结构振动时的有效性, 首先在坐标域中进行分析以便与已知振动值进行比较。由于在第 3 天的观测中, 振幅的变化需振动台每 15 min 归零一次使观测资料不连续, 为了更好地表现 Vondrak 滤波器的性能, 仅选用其中一段(第 3 天模拟振动的振幅为 20 mm)约 15 min 的连续坐标数据进行分析。GPS 数据处理采用动态轨迹估算法, 算出观测点的动态轨迹。图 4 和图 5 所示分别为经通用横轴墨卡托(UTM)投影后的东和北方向上第 2 天和第 3 天的坐标序列经 Vondrak 带通滤波法估计后的实验结果。这里, 其坐标均值已从坐标序列中扣除。

由 FFT 方法确定的中心频率 f_0 , 滤波值与真实信号间差值序列的标准偏差(STD)及其相对于模拟信号振幅影响的比例列于表 1。

从表 1 可以看出, 由 FFT 法得到的中心频率与真实信号的振动频率相同; 所有的滤波值与真实信号间差值序列的标准偏差都非常小(最大值小于



(a), (a') 已知振动信号序列; (b), (b') 混有噪声的振动信号序列; (c), (c') 带通滤波序列, 即分离出的结构振动信息; (d), (d') 滤波值与真实信号间的差值序列; (e), (e') 滤波值与混有噪声的振动信号间的差值序列

图 4 第 2 天东和北方向的滤波实验结果

Fig. 4 Filtering results of east and north directions (2nd day)

表 1 东和北方向的中心频率 f_0 , 差值序列的标准偏差及其占模拟信号振幅的百分比

Table 1 Central frequency f_0 , standard deviation of difference series and their percentages relative to amplitudes of simulated signals for east and north directions

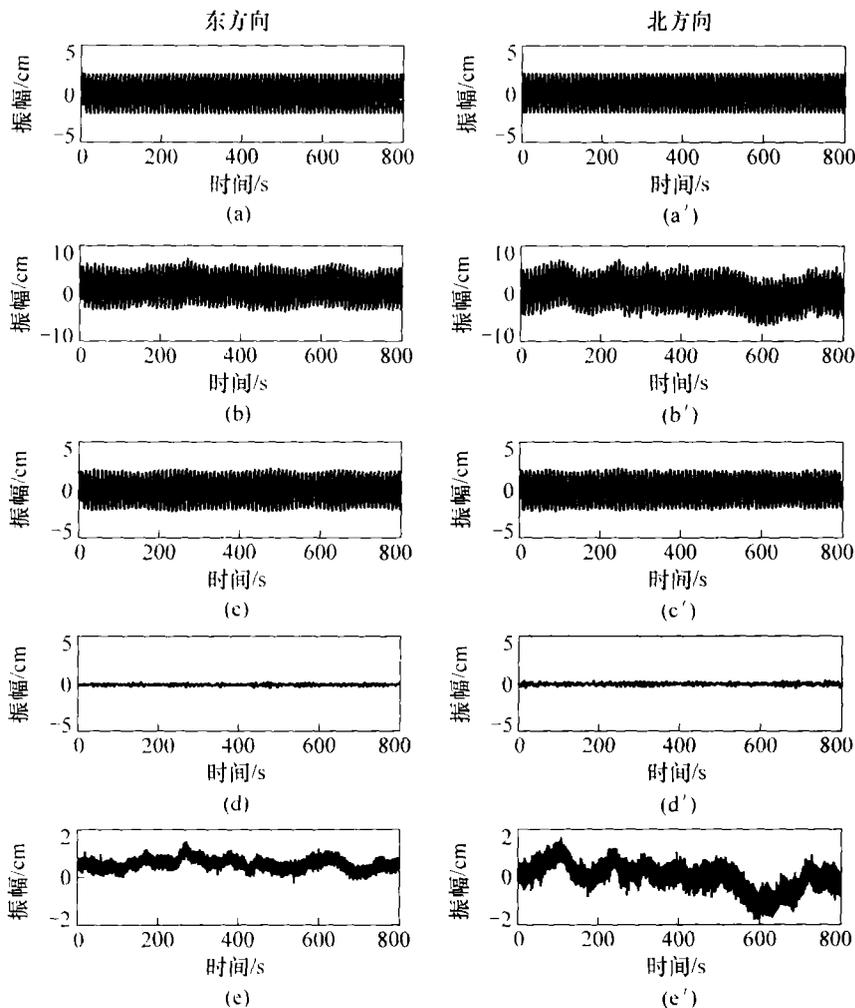
时间	东			北		
	f_0 / Hz	标准偏差 /cm	振幅比例 /%	f_0 / Hz	标准偏差 /cm	振幅比例 /%
第 2 天	0.06	± 0.193	4.8	0.06	± 0.280	7.0
第 3 天	0.10	± 0.107	5.4	0.10	± 0.144	7.2

响仅为 5% ~ 7%。这表明采用 Vondrak 带通滤波法能成功地从坐标序列中分离结构振动和其他误差项的影响。

此外, 将 Vondrak 带通滤波法应用于载波相位双差观测值的残差序列中。首先, 将结构振动信息从双差观测值的残差序列中分离出来, 但由于该残差序列中的真实模拟振动值难以获得, 因此, 将对滤波后的残差序列进行分析。

图 6 所示为卫星对 PRNs28 ~ 7 连续 3 d 的载波相位双差观测值静态处理残差序列。从第 3 天的残差序列可以看出, 连续记录的观测资料序列在振幅变换前后出现异常的跳变。这是机械振动的特性所致, 振动台需经一段时间归零后才能改变振幅和频率, 本文在数据处理过程中忽略了这些异常

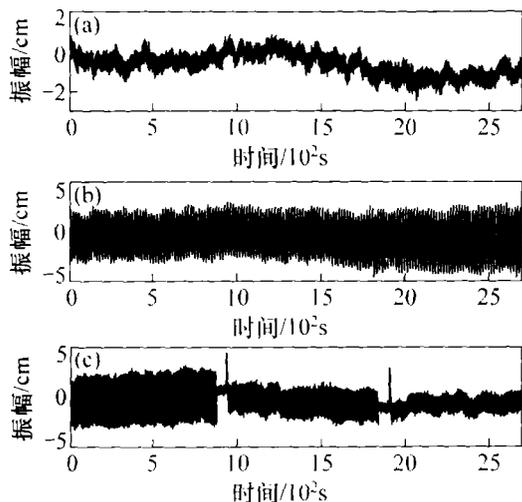
$\pm 0.3 \text{ cm}$), 且它们相对于模拟振动信号的振幅影



(a), (a') 已知振动信号序列; (b), (b') 混有噪声的振动信号序列; (c), (c') 带通滤波序列, 即分离出的结构振动信息; (d), (d') 滤波值与真实信号间的差值序列; (e), (e') 滤波值与混有噪声的振动信号间的差值序列

图 5 第 3 天东和北方向的滤波实验结果

Fig. 5 Filtering results of east and north directions (3rd day)



(a) 第 1 天; (b) 第 2 天; (c) 第 3 天

图 6 载波相位双差观测值残差序列

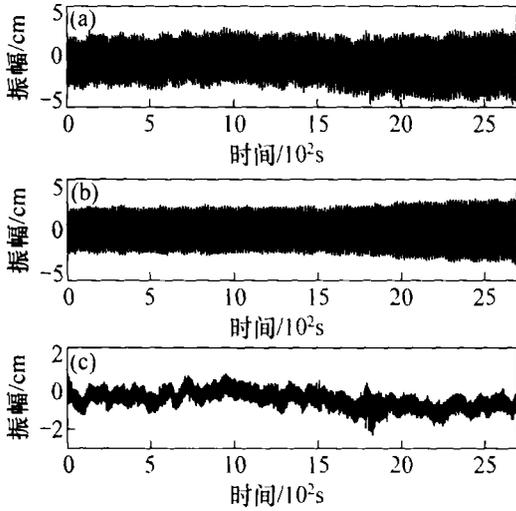
Fig. 6 Carrier phase double difference residuals series

值的影响。

图 7 和图 8 所示分别为第 2 天和第 3 天双差观测值残差序列的 Vondrak 带通滤波结果。

由于实验中基线非常短, 因此, 载波相位双差观测值的残差序列主要由不能通过差分法消除的多路径效应影响、振动信息及观测噪声组成。如图 7 和图 8 所示, 若双差观测序列中的结构振动信息经滤波后保留在滤波曲线中, 则滤波后的残差序列主要由多路径误差和观测噪声构成。由于多路径效应的发生主要取决于接收机天线的周围环境及卫星与测站间的几何构型, 因此, 当接收机天线位置及周围环境保持不变时, 多路径效应的影响具有周期性变化的特点^[2, 3, 11]。这一点可从分析滤波后的残差序列得到进一步证实。

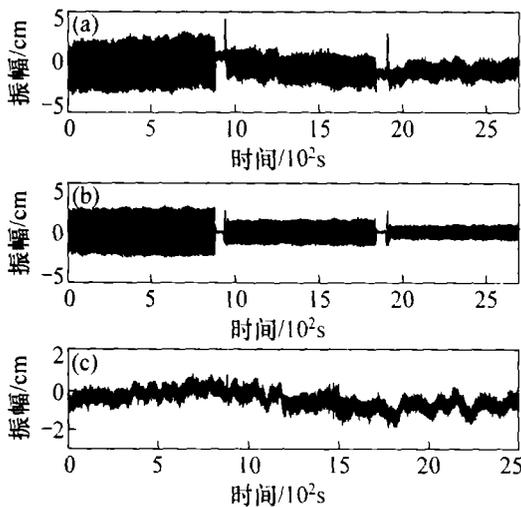
图 9 所示为运用 Vondrak 滤波法与交叉验证法相结合的 CVVF (cross validation Vondrak filter) 法^[12]从带通滤波后的残差序列中分离出的连续 3 d 的双差观测残差序列的多路径误差。该卫星对相邻 3 d 的最大相关系数分别为 0.873 和 0.772, 在统计检验上它们都已大大超过由蒙特卡罗方法^[13]得到的 ± 0.25 的临界值(99% 的显著水平)。用 CVVF 法得到的最佳平滑因子及滤波后噪声序列的标准偏差见表 2。



(a) 双差载波相位观测值残差序列; (b) 带通滤波序列; (c) 原观测序列与滤波值间的差值序列

图 7 第 2 天双差观测残差序列的带通滤波结果

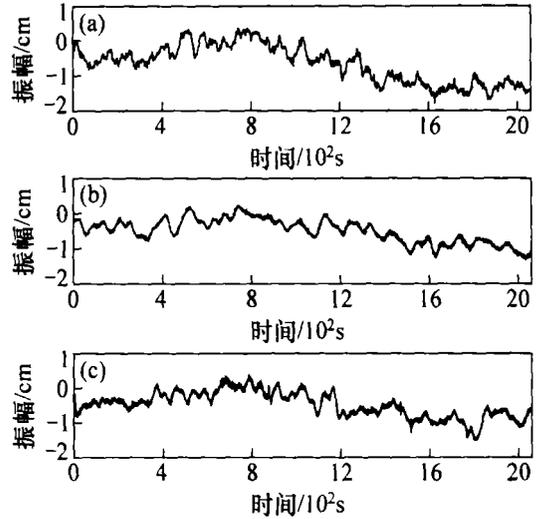
Fig. 7 Band pass filtering result of carrier phase double difference residuals (2nd day)



(a) 双差载波相位观测值残差序列; (b) 带通滤波序列; (c) 原观测序列与滤波值间的差值序列

图 8 第 3 天双差观测残差序列的带通滤波结果

Fig. 8 Band pass filtering result of carrier phase double difference residuals (3rd day)



(a) 第 1 天; (b) 第 2 天; (c) 第 3 天

图 9 双差观测残差序列经 CVVF 法滤波后的平滑曲线

Fig. 9 Filtered curves of double difference residuals series with CVVF method

表 2 用 CVVF 法得到的最佳平滑因子和噪声序列的标准偏差

Table 2 Optimal smoothing factors and standard deviation of noise series by using CVVF method

时间	平滑因子	标准偏差/cm
第 1 天	1.0×10^{-5}	± 0.181
第 2 天	1.0×10^{-5}	± 0.183
第 3 天	1.0×10^{-3}	± 0.166

从表 2 可以看出: 双差残差序列经滤波后具有基本相同的噪声序列标准偏差(最大差异 $< \pm 0.02$ cm), 这与文献[12]中的试验结果一致。这表明采用 CVVF 方法能最大限度地减小测量的随机误差, 成功分离资料序列中的多路径误差和观测噪声, 同时也验证了 Vondrak 带通滤波法能从双差观测值中提取正确的结构振动信息, 因而在提高 GPS 定位精度上具有较大的应用潜力。

3 结 论

a. 将 Vondrak 带通滤波法应用于 GPS 结构变形监测中以分离结构振动与多路径误差的影响。采用该方法不仅能成功地从坐标序列中提取结构振动信息, 而且也能从载波相位双差观测值的残差序列中分离结构振动和其他误差项(主要为多路径误差)的影响。

b. 通过对带通频段的中心频率和带宽的选择可实现 Vondrak 数字滤波, 其操作简便且运算速度快, 因此, 在各种工程结构的监测和预报以及自动控制等方面具有广阔的应用前景。

致谢 感谢中国科学院上海天文台的周永宏教授和重庆大学测绘工程系的彭军还教授的诚恳建议; 感谢香港理工大学奖学金的资助。

参考文献:

- [1] Loves J W, Teskey W F, Lachapelle G, et al. Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology [J]. Journal of Surveying Engineering, 1995, 121(1): 35 40.
- [2] Leick A. GPS satellite surveying [M]. 3rd ed. Hoboken; John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [3] Georgiadou Y, Kleusberg A. On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning [J]. Manuscripta Geodetica, 1988, 13(3): 172 179.
- [4] 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, 30(1): 36 41.
HUANG Ding fa, DING Xiao li, CHEN Yong qi, et al. Wavelet filters based separation of GPS multipath effects and engineering structural vibrations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(1): 36 41.
- [5] Kinawi H, Reda T M M, El sheimy N. Structural health monitoring using the semantic wireless web; A novel application for wireless networking [C] //Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington; IEEE Computer Society, 2000: 770 780.
- [6] Nee C D, Sahin M. Real time deformation monitoring with GPS & Kalman filter[J]. Earth Planets Space, 2000, 52(10): 837 840.
- [7] 叶叔华, 黄 . 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.
YE Shu hua, HUANG Chen. Astrogeodynamics [M]. Jinan; Shandong Science and Technology Press, 2000.
- [8] Vondrak J. Problem of smoothing observational data II [J]. Bull Astron Inst Czech, 1977, 28: 84 89.
- [9] Ray J K, Cannon M E, Fenton P. GPS code and carrier multipath mitigation using a multiantenna system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(1): 183 195.
- [10] Weill L R. Multipath mitigation; How good can it get with new signals? [J]. GPS World, 2003, 14(6): 106 113.
- [11] Hoffman Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. GPS theory and practice [M]. 4th ed. Vienna; Springer Verlag, 1997.
- [12] 钟萍, 丁晓利, 郑大伟. CVVF 法用于 GPS 多路径效应的研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 161 167.
ZHONG Ping, DING Xiao li, ZHENG Da wei. Study of GPS multipath effects with method of CVVF [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2): 161 167.
- [13] 周永宏, 郑大伟. 相关估计显著水平的 Monte Carlo 模拟检验[J]. 测绘学报, 1999, 28(4): 313 318.
ZHOU Yong hong, ZHENG Da wei. Monte Carlo simulation tests of correlation significant levels [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(4): 313 318.