

文章编号: 1001-1595(2007)01-0031-06

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

# GPS 结构振动监测数据滤波方法及其性能实验研究

钟 萍<sup>1</sup>, 丁晓利<sup>1</sup>, 郑大伟<sup>2</sup>, 陈 武<sup>1</sup>, 徐幼麟<sup>3</sup>

(1. 香港理工大学 土地测量与地理咨询学系, 香港 九龙; 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; 3. 香港理工大学 土木与结构工程学系, 香港 九龙)

## Filter-based GPS Structural Vibration Monitoring Methods and Comparison of Their Performances

ZHONG Ping<sup>1</sup>, DING Xiao-li<sup>1</sup>, ZHENG Da-wei<sup>2</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>, XU You-lin<sup>3</sup>

(1. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Center for Astrodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** The purpose of GPS structural vibration monitoring is to obtain information on the frequency and amplitude of vibrations based on GPS observations that are often affected by various errors. Filters are frequently used to improve GPS accuracy and to retrieve vibration signals from GPS observational series. This paper studies the performances of four commonly used filters, i. e., Vondrak, wavelet, adaptive FIR and Kalman filters, for such applications. Controlled experiments are carried out and the results show that the capability of GPS in tracking structural dynamics and complex signals can be improved with any of the filters. The performances of Vondrak and wavelet filters are almost the same and superior to the adaptive FIR and Kalman filters. Recommendations are given for the selection of filters and filter parameters for different situations based on an analysis of the advantages and disadvantages of each of the filters.

**Key words:** Vondrak filter; wavelet filter; adaptive FIR filter; Kalman filter; GPS; structural vibration monitoring

**摘 要:** 使用 GPS 监测结构振动的目的在于提取振动信号特征, 但 GPS 观测量受多种误差源的影响, 因此, 选用合理的数据处理方法有效地分离各误差项, 对于提高 GPS 的监测精度具有重要意义。将 Vondrak 滤波、小波滤波、自适应 FIR 滤波和卡尔曼滤波等四种方法应用于资料序列中振动信号的分离, 通过对模拟振动实验观测资料的分析表明: 运用滤波法可提高 GPS 测量微小动态变形和变频振动信号的检测能力; 4 种滤波法均能有效地提高 GPS 监测结构振动的精度, 其中, Vondrak 滤波和小波滤波的性能相当, 且优于自适应 FIR 和卡尔曼滤波。同时, 在对各滤波法参数选择的优缺点进行分析的基础上, 提出不同情况下选择滤波器的建议。

**关键词:** Vondrak 滤波; 小波滤波; 自适应 FIR 滤波; 卡尔曼滤波; GPS; 结构振动监测

## 1 引 言

大型结构工程(如高层建筑、桥梁和高塔等)结构振动的频率和振幅是评价其健康状况的重要指标, 它们由两方面因素组成: 结构体本身的振动和外部荷载(风力、地震和日照等)引起的振动和变形。为了测定结构振动的特性, 人们通常使用加速度计、激光干涉仪和测距仪等设备<sup>[1]</sup>。但由

于加速度计对低频振动不敏感, 激光干涉仪和测距仪不适用于视线受阻或气候恶劣等条件<sup>[2]</sup>, 以及人们对连续、实时、自动化监测要求的不断提高, 使得常规测量技术的应用越来越受局限。

全球定位系统技术作为 20 世纪的一项高新技术, 具有精度高、速度快、全天候、自动化、无需站间通视等优点, 它的应用给测量技术带来了一场深刻的革命。随着 GPS 技术的不断提高, 特别

收稿日期: 2006-03-28; 修回日期: 2006-08-22

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

作者简介: 钟 萍(1980), 女, 四川成都人, 博士生, 主要从事 GPS 理论与应用研究。Email: p.zhong@polyu.edu.hk

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

是采样率达 20 Hz 或更高, GPS 接收机的出现, 其作为一种新的结构振动监测传感器正越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。但是, 由于 GPS 受多种误差源的影响, 其测量精度受限于大气影响、多路径效应和 GPS 数据处理方法等。因此, 在结构振动监测中, 采用合理的数据处理方法有效地分离各种误差影响, 对于提高 GPS 测量精度具有重要意义。

在结构振动特性的研究中, GPS 基线通常较短(如小于 5 km), 因此, 动态监测的数据结果通常由多路径效应、随机噪声和动态振动等构成。近年来, 已有多种滤波技术应用于振动信号的分离, 如: 在信号的截断频带上具有较好信号分辨率的 Vondrak 滤波<sup>[3,4]</sup>, 在时域和频域具有良好局部化特性的小波滤波<sup>[5]</sup>, 能随噪声变化自动进行参数调节的自适应有限长单位脉冲响应(Adaptive FIR)滤波<sup>[6]</sup>, 以及利用观测向量预测和修正新状态向量的卡尔曼滤波<sup>[7]</sup>等。虽然这些滤波方法均能在一定程度上提高测量精度, 但人们对于哪种方法更适用于 GPS 结构振动数据处理这一问题尚缺乏理解。本文将对上述 4 种滤波法进行对比分析, 探讨各种方法的优点和不足。

## 2 提取振动信号的滤波方法

对于结构体的变形监测, 观测序列中 useful 信号和噪声的时频特性通常不一致, 因此, 可运用滤波法分离信号和噪声。例如, 随机噪声在时域上的分布是全局性的, 即它在整个观测时段内处处存在, 且在频域中主要表现为高频特性; 而在结构振动监测中的动态振动信息, 即为有用信号, 它在频域上是局部性的。国内外学者的研究结果表明: 典型的结构振动的振幅为 10 mm~200 mm, 频率为 0.1 Hz~10 Hz<sup>[1]</sup>, 因此, 相对于随机噪声而言, 振动信号通常表现为低频特性。

同时, 分析多路径误差的时频特征, 以说明用滤波法实现高精度振动信息提取的可能性。多路径效应存在于整个观测时段, 当反射或折射信号与直接信号同时到达接收机后产生干涉, 影响码和相位的测量, 从而导致 GPS 定位精度的降低, 它对载波相位观测值的影响可达 GPS 信号波长的  $1/4$ <sup>[8]</sup>(如, 对 L1 载波影响约为 5 cm)。由于扼流圈天线和 GPS 接收机跟踪技术仅对削减中、长时间延迟的多路径信号有效, 由近处物体(如, 小于 30 m<sup>[9]</sup>)引起的短时间延迟的多路径信号成为 GPS 变形监测的主要误差来源<sup>[10]</sup>, 因此, 人们常

采用后处理方法进一步削减残余的多路径误差。一般来讲, 经接收机硬件削弱后的多路径误差周期约为几十秒到几十分钟。图 1 为在我们的实验中所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, 其中, 资料序列的取样间隔为 1 s, 样本数为 86 400。

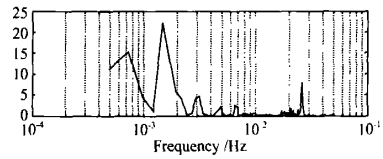


图 1 多路径误差序列 FFT 频谱图

Fig. 1 FFT spectrum of multipath error series

从图 1 中不难看出, 多路径的周期主要介于 60 s~24 min 之间。因此, 相对于随机噪声而言, 多路径主要表现为低频特性; 相对于振动信号而言, 两者有可能处于相同的频段中。

由此可见, 在基于滤波法的结构振动监测中, 各滤波器的时频分析性能对于高精度振动信号的提取将起决定性的作用。限于篇幅, 不再赘述各滤波法的基本原理和振动信号提取的步骤。

## 3 GPS 观测实验

为了获取振动频率和振幅的理论值, 以检验 GPS 用于结构振动监测的精度, 制作了一个振动模拟平台。它由可振动的平台、步进马达、滚珠螺杆、电子控制系统、16 通道的数据采集系统、电源接线盒、支架、用于振动控制和数据采集的计算机等组成。为确保 GPS 与平台同步, 将另一台 GPS 接收机(Ashtech GG24)与计算机相连, 使计算机时钟与原子钟的时间同步; 为整平台, 调节支架的 4 个脚螺旋使平台上的圆气泡居中; 步进马达受计算机的控制并与滚珠螺杆相连, 在计算机中输入振动参数后, 由螺杆带动振动台即可模拟各种振动。该振动台能在水平面的两个垂直方向上模拟各种正弦波、圆形波、随机噪声等任意一种由输入波的时间关系曲线所定义的波形, 其振幅模拟精度优于 0.1 mm。

GPS 观测实验在靠近香港科学园和香港中文大学的白石角进行, 这里视野开阔。从 2004 年 1 月 30 日开始, 用 Leica 9500 型双频 GPS 接收机和 Leica AT202/302 天线在一条约为 11 m 的基线上进行了两天的观测, 数据采样率为 10 Hz, 观

测截止高度角为  $15^\circ$ 。在第一天的观测中,一 GPS 天线置于振动模拟台上作为流动站,另一个固定于三角架上作参考站,在平台振动前,先静止观测 1 小时以精确确定平台相对于参考站的相对位置;第二天静止观测。

本文将对各滤波法滤波前后的观测点坐标序列进行分析,以比较它们在提高结构振动监测精度上的有效性。其计算过程如下:首先,相位双差振动序列的获取,它可通过逐个历元的双差观测值与双差计算值求差得到;其次,振动信号的提取,原始的双差振动序列由振动信息、多路径误差和观测噪声等组成,而滤波后的序列仅包含振动信息;最后,根据单历元算法<sup>[11]</sup>分别对滤波前后的双差振动序列进行计算,求得它们在平台坐标系中的振动坐标序列,并与记录的模拟振动理论

值相比较。本文中的平台坐标系用  $X, Y$  和  $H$  表示,其中  $X$  和  $Y$  分别对应于横轴墨卡托(UTM)投影的东和北方向; $H$  为大地高。分析中,坐标均值将从坐标序列中扣除。

本文将对 Vondrak 滤波、小波滤波、自适应 FIR 滤波和卡尔曼滤波(以下均采用该顺序)在如下 3 种振动实验中的性能进行分析。

### 3.1 振动实验一

模拟振动为圆周振动,其频率和振幅分别为  $0.075\text{ Hz}$  和  $2\text{ mm}$ 。实验中可用卫星数为 6 颗,共观测了 2 400 个历元。图 2 以卫星对 PRNs 11~8(最高的 PRN 11 作参考卫星)为例,给出了滤波前和经上述四种方法滤波后的相位双差振动序列及其差值序列(以下简称“残差”)。

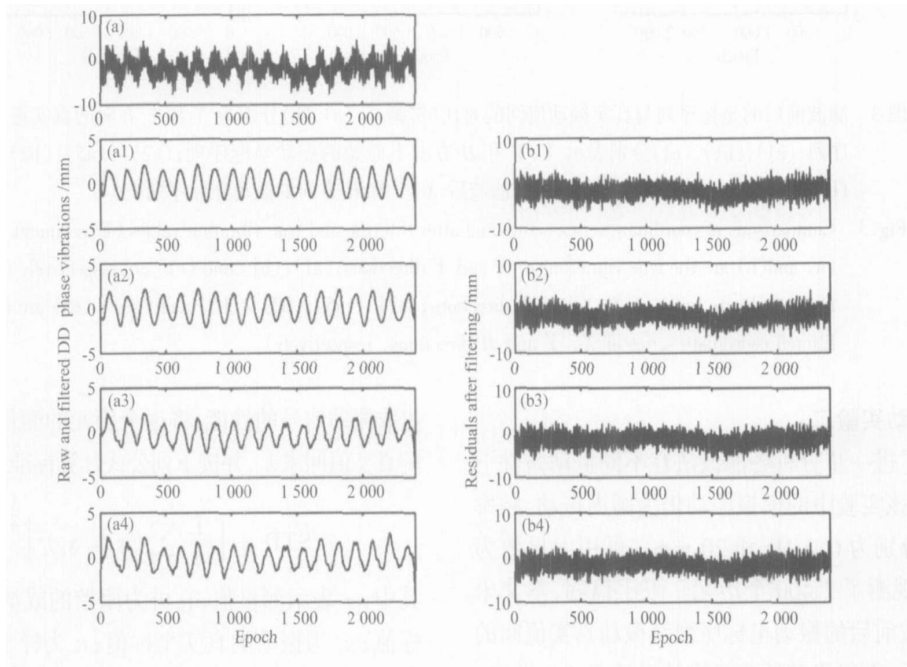


图 2 相位双差振动序列的滤波实验结果(实验一:(a)原始的双差振动序列;(a1)~(a4)分别为 Vondrak、小波、自适应 FIR 和卡尔曼滤波后双差振动序列;(b1)~(b4)为其残差序列)

Fig. 2 Results of filtered double-difference (DD) phase vibration series (Experiment 1: (a) DD vibration series before filtering; (a1)~(a4) are the Vondrak, wavelet, adaptive FIR and Kalman filtered DD vibration series, respectively; (b1)~(b4) are their residuals)

从图 2 中不难看出,4 种滤波法均能将振动信号从多路径误差和噪声中分离;经 Vondrak 和小波滤波后的资料序列较后两者平滑。

图 3 为滤波前后的振动坐标序列在  $X, Y$  和  $H$  方向上与模拟振动真实值间的对比关系。

从图 3 中可以看出:与前两者的滤波结果相

比,经自适应 FIR 和卡尔曼滤波后的资料序列中不仅包含振动信息,而且还显示着其他较大周期的振动信号。这可能是由于后两者滤波过程中的残余多路径和相邻两天中不具重复性的残余对流层等影响所致。同时,该实验结果也表明:滤波后 GPS 测量微小动态变形时的振幅精度可达  $2\text{ mm}$ 。

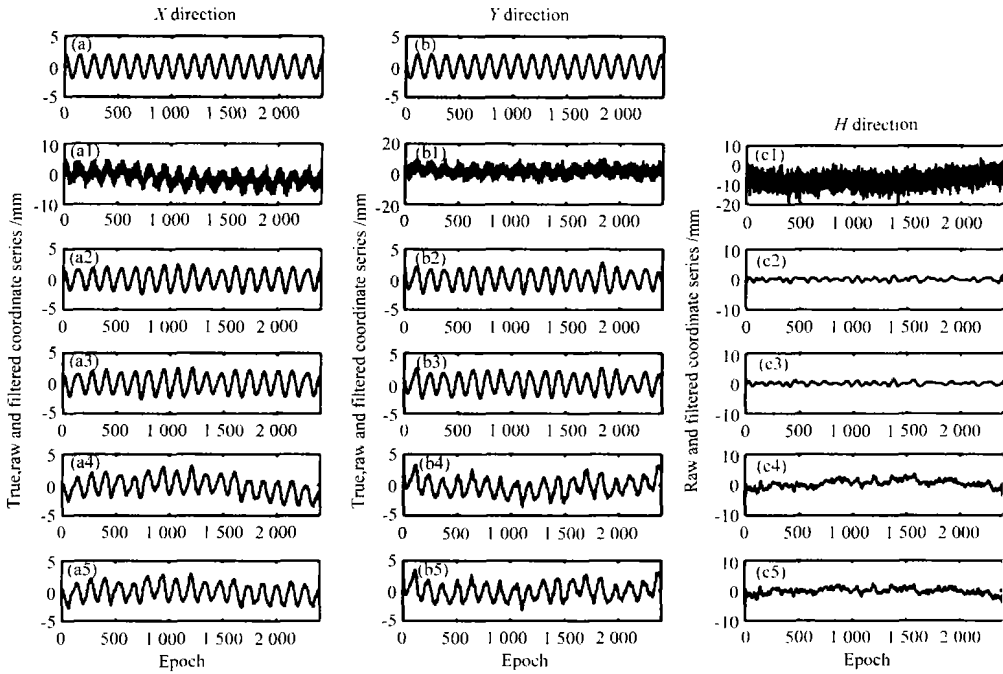


图 3 滤波前后的坐标序列与真实振动值间的对比(实验一:(a),(b)分别为 X 和 Y 方向的真实振动序列;(a1),(b1),(c1)分别表示 X, Y 和 H 方向上原始的振动坐标序列;(a2)~(a5),(b2)~(b5)和(c2)~(c5)分别为经 4 种方法滤波后 X, Y 和 H 方向的振动坐标序列)

Fig. 3 Comparisons of coordinate series before and after filtering and true vibration values (Experiment 1: (a) and (b) are the true vibrations of X and Y directions; (a1), (b1) and (c1) are respectively the raw coordinate series of X, Y and H directions; (a2)~(a5), (b2)~(b5) and (c2)~(c5) are the filtered coordinate series of X, Y and H directions, respectively)

### 3.2 振动实验二

为了进一步分析各滤波法在不同振动条件下的性能,该实验中的模拟振动仍为圆周振动,频率和振幅分别为 0.5 Hz 和 20 mm。可用卫星数为 5 个,共观测了 2 400 个历元。限于篇幅,本文未给出滤波前后的振动坐标序列及振动真实值间的对比关系,而仅将其精度对比结果给于 4.1 节中。

### 3.3 振动实验三

由于真实的结构振动往往由多频率和多振幅的信号组成,因此,该实验中模拟变频振动的频率在 0.025~0.5 Hz 间变化,振幅为 0~18 mm。实验中可用卫星数为 6 颗,观测了 2 400 个历元。限于篇幅,滤波前后的振动坐标序列及振动真实值间的对比关系图未给出。该实验结果表明,滤波法可提高 GPS 测量变频振动信号的检测能力。

## 4 对比分析

### 4.1 精度比较

为了定量地分析各滤波法从 GPS 观测资料中

提取振动信号的性能,将逐个历元的测量值与振动的真实值间求差,并按下列公式计算标准差(STD):

$$STD = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - x_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中,  $x$  表示测量值,它可为原始的或滤波后的坐标值;  $x_t$  为振动的真实坐标值;  $n$  为样本总数。

表 1 中给出了按 3 倍标准差(99.7%的置信度)计算的滤波前后可探测的最小振动。另外,将各滤波法滤波前后的 STD 值进行比较,得到滤波后的精度贡献,其结果列于表 2 中。

表 1 4 种滤波法可探测的最小振动量(99.7%的置信度)  
Tab. 1 Minimum detectable vibrations of four filtering methods at 99.7% confidence level / mm

	实验一			实验二			实验三		
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
滤波前	6.3	8.6	9.9	8.5	7.2	13.3	5.1	10.3	18.7
Vondrak 滤波	0.9	1.1	1.5	5.8	4.2	4.3	2.4	2.2	4.8
小波滤波	0.9	1.0	1.5	6.1	5.4	3.0	2.6	2.4	5.4
自适应 FIR 滤波	2.7	2.6	3.7	7.3	5.4	9.1	4.4	5.4	7.6
卡尔曼滤波	1.9	2.3	3.1	7.7	5.0	10.3	4.8	5.2	7.4

从表 1 中可以看出: 滤波前单方向可探测的最小振动为 5.1~ 18.7 mm; 经 Vondrak 滤波后最小可探测振动为 0.9~ 5.8 mm; 小波滤波后为 0.9~ 6.1 mm; 自适应 FIR 滤波后为 2.6~ 9.1 mm; 卡尔曼滤波后为 1.9~ 10.3 mm。

表 2 4 种滤波法的精度贡献比较

Tab. 2 Comparisons of accuracy contribution of four filters after filtering / (%)

	实验一			实验二			实验三		
	X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
Vondrak 滤波	86	87	85	32	41	68	54	79	74
小波滤波	85	88	85	28	25	77	49	77	71
自适应 FIR 滤波	58	70	63	14	25	31	14	47	59
卡尔曼滤波	70	74	68	10	30	23	6	49	61

从表 2 中可以看出: 经 Vondrak 和小波滤波后的精度贡献均比后两者大, 特别是对于最接近真实结构振动情况的实验三, 后两者在 X, Y 和 H 方向上的平均精度贡献仅为前两者均值的约 19%, 62% 和 83%。

表 1 和表 2 的实验结果表明, 4 种滤波法均能有效地提高 GPS 监测结构振动的精度, 尤其是 Vondrak 滤波和小波滤波, 经两者滤波后单方向可探测的最小振动量和精度贡献均相当, 且优于自适应 FIR 和卡尔曼滤波。

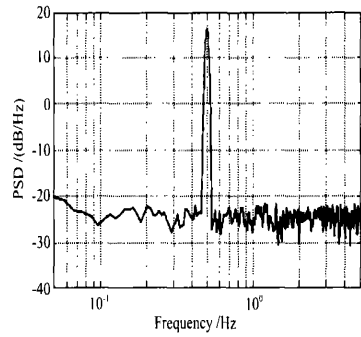
4.2 方法比较

滤波不仅可作为一种平滑手段, 消除或削弱资料序列中的随机噪声, 也可用来分离测量资料中不同频率的信号, 以研究资料序列中不同频率信号的变化规律。由于各滤波法的基本原理(即频率响应特征)或算法不同, 因此它们用于振动信号提取时的过程和所需滤波参数也不同, 这将直接影响滤波结果的收敛速度和变形特征的提取。下面我们将对各滤波法在参数选择和计算速度等方面的优缺点进行分析。

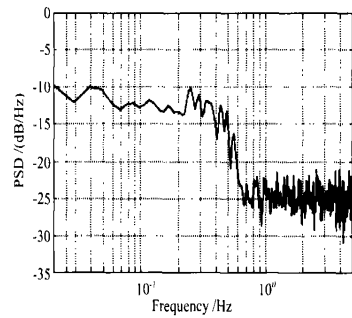
4.2.1 Vondrak 滤波

图 4 为实验二和三中的相位双差振动序列经 Welch 方法得到的功率谱密度。从图 4 中可以看出: 资料序列经功率谱密度估计后的频率成分, 与实验二中模拟振动的主频率 0.5 Hz 和实验三中的频率范围 0.025~ 0.5 Hz 基本相同, 由此即可确定  $f_0$  和实验三中的  $\Delta f$  值。同时, 对于实验一和二, 我们选择  $\Delta f = 0.1$  以便有效地分离结构振动和其他误差项的影响, 此时滤波后频率为  $f_0/4$  的

信号振幅仅为滤波前的约 5%。在实际应用中, 可根据具体情况选择  $\Delta f$  的值。



(a)



(b)

图 4 实验二 (a) 和实验三 (b) 相位双差振动序列的功率谱密度估计

Fig. 4 Power spectrum density (PSD) of phase DD vibration series for Experiments 2 (a) and 3 (b)

由此可见, 用 Vondrak 带通滤波实现振动信号的提取不仅操作简单, 而且没有参数的重复选择和迭代过程, 因此运算速度快。

4.2.2 小波滤波

合适的小波基的选择是小波变换实现振动信号提取的前提。因为不同的小波基在滤波性能上也不同, 如 Haar 小波具有的高时间分辨率, 能对信号的瞬态特征进行很好的识别; 而正交和双正交小波具有二阶消失矩, 对信号的逼近精度高, 但正交小波对称性的缺乏则可能造成较多的信号失真<sup>[12]</sup>。一般来讲, 通常选择综合性能较好的双正交小波, 如本文选用的具有频域紧支集和良好分频特性的离散 Meyer 小波。

其次, 振动信号所在层的确定是实现振动信号提取的重要参数。图 5 为实验三中相位双差振动序列的小波分解示意图。图中  $s$  为原始的相位

双差振动序列;  $a_8$  为第八层的低频系数;  $d_8 \sim d_1$  分别为八尺度小波分解的高频部分。

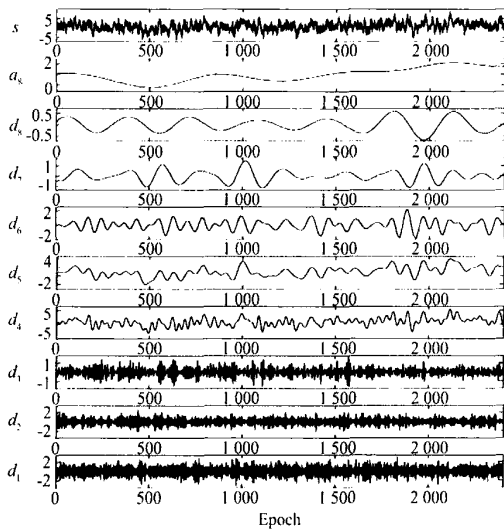


图5 相位双差振动序列的小波分解(实验三)

Fig. 5 Wavelet decomposition of DD phase vibration series (Experiment 3)

从图5中可以看出,噪声水平随分解尺度的增加迅速减小,但振动信号所在层的确定还需借助频率的先验信息或频谱分析法来实现。例如,根据图4中实验三振动信号的频率分布及各层的中心频率,即可确定  $d_4 \sim d_8$  为振动信号所在的层。而对于实验一和二,分别提取  $d_6 \sim d_7$  和  $d_4$  所在层的信息为振动信号。

总的说来,用小波提取振动信号的关键在于正确设定振动信号所在的频段,以确定小波分解的层。

#### 4.2.3 自适应 FIR 滤波和卡尔曼滤波

对于自适应 FIR 滤波,选用自回归(AR)模型的递归最小二乘(RLS)算法作为自适应算法,虽然它具有快速收敛的特性,但每次迭代需要的运算量较大。

运用卡尔曼滤波时,需恰当地确定系统的初值,以保证变形分析结果的正确性。一般而言,滤波前系统的初始状态难以精确确定,一旦初值的选取达不到一定的要求,则可能使滤波结果中含有较大误差,从而导致变形分析结果的失真。

两种滤波法均具有时变和自调整性,使滤波器输出中的噪声效应在某种准则下达到最小。但两者在提取振动信息时均需要相邻天同时刻的静态 GPS 观测资料,以分离动态资料序列中的多路径误差。

## 5 结论与建议

本文在对结构振动监测中的振动信号、多路径误差和观测噪声的时频特性进行分析的基础上,将 Vondrak 滤波、小波滤波、自适应 FIR 和卡尔曼滤波等 4 种方法应用到 GPS 相位观测处理中,以分离出振动坐标序列。通过对模拟振动实验观测资料的处理和分析,可以得到如下结论:

1. 滤波法的运用可提高 GPS 测量微小动态变形和变频振动信号的检测能力,其测量振幅的精度可达 2 mm。

2. 4 种滤波法均能提高 GPS 监测结构振动的精度,且在本文的应用实例中, Vondrak 滤波和小波滤波优于自适应 FIR 和卡尔曼滤波。经前两种方法滤波后可探测的最小振动量相当,约为 0.9~6.0 mm;其精度贡献也基本相同,两者在 X、Y 和 H 方向上的平均精度贡献约为 56%、66% 和 77%。

3. 与自适应 FIR 和卡尔曼滤波相比, Vondrak 滤波和小波滤波不仅不需要确定系统初值,在滤波过程中也不需要静态的 GPS 观测资料,即能快速准确地从观测资料序列中分离出振动信息。但是,当观测序列中各误差项与振动信号的频率相近或位于同一频带时,将会影响 Vondrak 滤波参数的选择及小波变换时振动信号所在层的确定,从而导致提取的变形信号失真。在这种情况下,对于多数滤波器来说,须采取更加复杂的措施,本文在此不作进一步讨论。

滤波有助于提高结构振动监测的精度,在于资料序列中的随机噪声和多路径误差等在滤波过程中受到抑制,而让某个频率或频段的振动信号通过。由于各滤波法在滤波性能上的差异,在结构振动监测中我们可根据实际情况选择适合的滤波器:当对资料序列中某一频率的振动信号进行分析时,可避免小波变换时小波基的选择和振动信号所在层的确定,而使用 Vondrak 滤波法。此时,将待分析振动信号的频率作频段的中心频率  $f_0$ ,带通频段的宽通常选择  $\Delta f = 0.1$  即可。当待分析的振动信号位于某一频段时,既可使用小波滤波,也可通过选择频段两端的截止频率而快速实现 Vondrak 滤波。

致谢:本文第一作者感谢香港理工大学奖学金的资助。

(下转第 42 页)

以在 60 s 内初始化,说明该方法具有较高的效率和可靠性。

致谢:四川省地震局减灾救助研究所,以及四川省十五重大工程项目——“GPS 卫星观测网络”项目组为本文的工作提供了数据和实验平台,在此表示衷心感谢。

### 参考文献:

- [1] CHEN X M, HAN S W, RIZOS C, GOH P C. Improving Real-time Positioning Efficiency Using the Singapore Integrated Multiple Reference Station Network (SIMRSN) [A]. Proc 13th Int Tech Meeting Satellite Division US Inst Navigation [C]. Salt Lake City: [s. n.], 2000.
- [2] HU G R, KHOO H S. Development and Assessment of GPS VRS for RTK Positioning [J]. J Geod, 2003, 77: 292-302.
- [3] HAN S, RIZOS C. An Instantaneous Ambiguity Resolution Technique for Medium-range GPS Kinematic Positioning [A]. Proc 10th Int Tech Meeting of the Satellite Division of the U. S. Inst of Navigation GPS ION '97 [C]. Kansas City: [s. n.], 1997. 1 789-1 800.
- [4] GAO Y, LiZ. Cycle Slip Detection and Ambiguity Resolution Algorithms for Dual-frequency GPS Data Processing [J]. Ma-

rine Geodesy, 1999, 22: 169-181.

- [5] HOFMANN W B, LICHTENEGGER H, COLLINS J. GPS Theory and Practice [M]. Wien: Springer-Verlag, 1997.
- [6] HUANG D F, DING X L, CHEN Y Q. Ambiguity Online Resolution by Combined Dual-frequency Phase and Code Observable [J]. Survey Review, 2001, (10).
- [7] BLEWITT G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baseline up to 2 000 km [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (B8): 10 187-10 203.
- [8] TEUNISSEN P J G. The Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation [J]. J Geod, 1995, 70: 65-82.
- [9] TEUNISSEN P J G. On The GPS Wideline and Its Decorrelating Property [J]. J Geod, 1997, 71: 577-587.
- [10] GE M R, LIU J N. The Estimation Method for Tropospheric Delays in Global Positioning System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996, 25(4): 285-291. (葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 285-291.)
- [11] MOHAMED A H, SCHWARZ K P. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS [J]. J Geod, 1999, 73: 193-203.

(责任编辑:雷秀丽)

(上接第36页)

### 参考文献:

- [1] LOVES J W, TESKEY W F, LACHAPPELLE G, et al. Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology [J]. Journal of Surveying Engineering, 1995, 121 (1): 35-40.
- [2] CHENG P G, SHI W Z, ZHENG W X. Large Structure Health Dynamic Monitoring Using GPS Technology [A]. FIG XXII International Congress [C]. Washington D C: [s. n.], 2002. 19-26.
- [3] ZHENG D W, ZHONG P, DING X L, et al. Filtering GPS Time Series Using A Vondrak Filter and Cross-validation [J]. Journal of Geodesy, 2005, 79: 363-369.
- [4] ZHONG P, DING X L, ZHENG D W, et al. Separation of Structural Vibrations and GPS Multipath Signals Using Vondrak Filter [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2006, 37(6): 1 189-1 195. (钟萍, 丁晓利, 郑大伟, 等. Vondrak 滤波法用于结构振动与 GPS 多路径信号的分离[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2006, 37(6): 1 189-1 195.)
- [5] HUANG S X, LIU J N. A Novel Method for Reducing Noises in GPS Deformation Monitoring System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 104-107. (黄声享, 刘经南. GPS 变形监测系统中消除噪声的一种有效方法[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 104-107.)
- [6] CHAN W S, XU Y L, DING X L, et al. Calibration of GPS

for Dynamic Displacement Measurement of Long Span Cable-supported Bridges in Vertical Direction [A]. Proceedings of the SPIE 2005 [C]. [s. l.]: [s. n.], 2005. 168-179.

- [7] NCE C D, SAHIN M. Real-time Deformation Monitoring with GPS & Kalman Filter [J]. Earth Planets Space, 2000, 52 (10): 837-840.
- [8] LEICK A. GPS Satellite Surveying [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.
- [9] RAY J K, CANNON M E, FENTON P. GPS Code and Carrier Multipath Mitigation Using A Multi-antenna 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] XIONG Y L, DING X L, HUANG D F, et al. Integrated Single Epoch Algorithm Based on Wavelet Transform and Its Application to Structural Vibration Monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(3): 202-207. (熊永良, 丁晓利, 黄丁发, 等. 基于小波变换的单历元算法及其在结构振动监测中的应用研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 202-207.)
- [12] GAO F, QU J L, ZHOU Y P. The Comparison of Different Wavelet Bases on Filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(4): 437-440. (高峰, 曲建岭, 周玉平. 不同小波基下滤波性能之比较[J]. 仪器仪表学报, 23 (4): 437-440.)

(责任编辑:雷秀丽)