

doi:10.3799/dqkx.2012.117

小波包分解提取高采样率 GPS 地震波信号

敖敏思^{1,2}, 胡友健^{2*}, 赵斌^{3,4}, 叶险峰², 丁开华²

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

2. 中国地质大学信息工程学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071

4. 武汉大学卫星导航技术研究中心, 湖北武汉 430079

摘要: 随着高采样率 GPS 接收机的出现、高精度的定轨以及数据处理技术的发展, 利用 GPS 观测高频率、瞬态的地震波信号成为可能。但如何消除混叠在地震波信号中的多路径、随机噪声等误差, 有效地提取地震波信号, 仍然是制约高采样率 GPS 及其地球物理应用的重要因素。提出一种基于小波包分解的方法, 对动态位移序列中的多路径误差进行消除, 同时去除高频率随机噪声, 提取地震波信号。通过结合 SCIGN 的 19 个 GPS 测站的 1Hz 采样 GPS 观测数据, 对 2010 年墨西哥 M7.2 地震的地震波引起的地表动态位移进行解算, 采用小波包分解有效地提取地震波信号并对其进行谱分析。结果表明, 该方法提取的地震波信号能较好地反映出地震波的传播及其特性, 具有无需多天重复观测、处理精度高等特点。

关键词: 全球定位系统; 高采样率; 地震波; 小波包分解。

中图分类号: P228.42

文章编号: 1000-2383(2012)05-1101-08

收稿日期: 2011-11-18

Extraction of High-Rate GPS Seismic Wave Signals with Wavelet Packets Decomposition

AO Min-si^{1,2}, HU You-jian^{2*}, ZHAO Bin^{3,4}, YE Xian-feng², DING Kai-hua²

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

2. Faculty of Information and Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

4. Research center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: With the development of high-rate GPS receivers, precise orbit and processing technology of GPS data, it is possible to observe the high frequency, transient dynamic displacement by GPS. However, it remains a problem as how to mitigate the error such as multipath errors, and random noise aliasing in geophysical signals so as to extract seismic signals, which in turn limits the high-rate GPS and its geophysical applications. In this paper, an approach based on wavelet packets decomposition (WPD) is presented to extract seismic signals through mitigating the multipath error and random noise of dynamic displacement series from high-rate GPS. With the 1 Hz observation data from 19 stations in Southern California Integrated GPS Network (SCIGN) during the Mexico M7.2 earthquake in 2010, the ground displacement is calculated. Meanwhile, the approach based on WPD is introduced for seismic signal extraction and spectrum analysis. As is shown in results, the approach is accurate and effective in seismic signal extraction to reflect the characteristics of seismic wave propagations and it enjoys an advantage that it does not necessarily involve multiple-day observation.

Key words: global positioning system; high sampling rate; seismic wave; wavelet packets decomposition.

传统的 GPS 监测地壳形变中, 一般采用 30 s 采样的双频接收机进行观测, 等间隔抽取数据, 解算测站每日平均坐标, 进而分析几天至几年时间尺度的

地壳形变特征与地震孕育、发生之间的关系(方颖等, 2009)。随着高采样率 GPS 接收机的出现、高精度的定轨以及数据处理技术的发展, 使得利用 GPS

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40974002); 国家重大科技基础设施建设项目(发改高技[2007]1911); 中南大学博士后科学基金。

作者简介: 敖敏思(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为 GNSS 技术及其地学应用、变形监测。

* 通信作者: 胡友健, E-mail: hjy_06@163.com

对高频率、瞬态的动态位移进行观测成为可能. 相对于传统的针对地表运动加速度和地震波速度的地震监测仪, 利用高采样率 GPS 观测地震动态位移不存在漂移、仪器限幅以及仪器定向安装准确性的问题.

Larson *et al.* (2003) 对 2002 年 11 月 3 日的 Denali 7.9 级地震首次利用 1 Hz 采样率 GPS 进行了观测. 位于 Skagway 的 WHIT 站观测到了最大的位移分量, 信号的峰—峰值几乎达到 50 cm. 随后, Kouba *et al.* (2003) 及 Bock *et al.* (2004) 利用其他测站的 1 Hz GPS 数据对其进行了进一步的研究. Gombert *et al.* (2004) 引入了 Denali 地震的 GPS 观测结果反演地震的成因. Bilich *et al.* (2008) 则对该次地震的加拿大西部的 GPS 观测结果与传统地震仪器观测结果进行了对比, 对 GPS 观测结果的噪声和有效性进行了分析. 另一次引入高采样率 GPS 观测的是 2003 年 12 月 22 日发生的 San Simeon 6.5 级地震. Hardebeck *et al.* (2005) 利用美国 SCIGN (南加州综合 GPS 网) 的部分测站的 1 Hz 采样数据进行了解算和分析. Ji *et al.* (2004) 则首次利用 1 Hz GPS 观测数据解算结果进行了此次震源破裂过程的反演. 利用高采样率 GPS 观测到的地震动态位移序列的最大位移值来自 2003 年 9 月 25 日发生在日本的 Tokchi-oki 8.1 级地震, 距离震中最近的测站水平方向最大位移超过 1 m, 距离震中 170 km 的 0133 测站东西方向分量接近 80 cm (Larson, 2009). Miyazaki *et al.* (2004) 利用日本 GEONET 的 37 个测站对此次地震震源破裂过程进行了建模, 证明了单独利用高采样率 GPS 数据进行大地震震源破裂过程模拟的可行性. 方荣新等 (2009) 利用国内某 GPS 台站的 1 Hz 观测数据采用单点定位数据进行解算, 对汶川地震的同震位移形变进行了分析, 由于观测台站数目的限制, 不能较好地反映出地震波传播特征. 与此同时, 高采样率 GPS 数据处理技术也取得了较大的进步. 最早由 Genrich and Bock (1992) 提出的“恒星日滤波 (Sidereal filtering)”, 在 Choi *et al.* (2004) 的改进下, 作为一种提取和去除多路径误差的经验模型被引入到高采样率数据处理过程中, 其核心思想是利用多路径误差, 因 GPS 卫星的空间几何分布的周期性也表现为一定的周期 (约 T23 : 56 : 04), 从而可以利用多天的重复观测对多路径误差进行提取和消除. 基于现代数字信号处理的方法也逐渐引入来消除多路径误差, 如数字滤波器、小波分析理论 (黄丁发等, 2001; Xia *et al.*, 2001)、经验模式分解方法 (戴吾蛟等, 2006)、自适应

滤波算法 (Chang *et al.*, 2008) 和 Vondrak 滤波器 (钟萍等, 2006) 等, 其与恒星日滤波相比较, 具有无需多天观测等优势.

在利用高采样率 GPS 进行地震波信号观测过程中, 如何消除多路径误差、随机误差的影响, 有效地提取混叠有各种误差的地震波信号, 是精确分析地震波信号特征的前提. 传统的多路径误差消除方法如恒星日滤波, 存在需要多天重复观测、无法消除高频率随机噪声的限制. 2010-04-04 T22 : 40 : 42 发生的墨西哥 M7.2 地震, 震中位于靠近美国边境的 Baja California 地区, 震中距离地表大约 10 km. 本文利用 SCIGN 位于美国南加利福尼亚地区的 19 个 GPS 测站的 1 Hz 采样数据, 对此次地震的地震波引起的动态位移进行解算. 在数据处理过程中, 利用小波包分解的方法对高采样率 GPS 观测的动态位移序列中的多路径误差进行消除, 同时去除高频率的随机噪声, 提取地震波信号, 进而对地震波信号进行分析.

1 小波包分解原理与方法

小波包分解 (Wavelet Packet Decomposition, WPD) 是小波分解的推广 (黄丁发等, 2001; Xia *et al.*, 2001). 在利用小波分析对地震波信号进行分解时, 动态位移序列被分解为逼近部分和细节部分. 逼近部分再分解为下一层的逼近和细节, 重复进行直到所设定的分解层. 但是在小波包分解过程中, 上一层的细节部分也进行相同的分解. 小波包分解具有任意多尺度特点, 为地震波信号的时频分析提供了极大的选择性, 更能反映地震波信号的本质和特征.

在对地震波信号进行小波分析过程中, 给定正交尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\Psi(t)$, 其二尺度关系表示为:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \phi(2t - k), \quad (1)$$

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \phi(2t - k), \quad (2)$$

其中, h_{0k} 和 h_{1k} 分别为多分辨率分析中的分解滤波器系数. 如果对二尺度方程进一步推广, 定义递推关系如下:

$$\omega_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{0k} \omega_n(2t - k), \quad (3)$$

$$\omega_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{1k} \omega_n(2t - k), \quad (4)$$

式中, 当 $n=0$ 时, $\omega_0(t) = \phi(t)$, $\omega_1(t) = \Psi(t)$. 以上

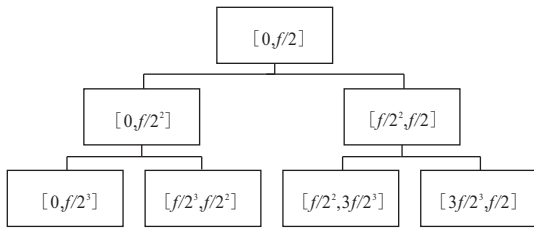


图 1 三层小波包分解子频带示意

Fig. 1 Frequency bands of wavelet packets decomposition of three levels

定义的函数集合 $\{\omega_n(t)\}_{n \in Z}$ 即为由 $\omega_0(t) = \phi(t)$ 所确定的小波包. 小波包是包括尺度函数 $\omega_0(t)$ 和小波母函数 $\omega_1(t)$ 在内的一个具有一定联系的函数的集合. ω_{2n} 和 ω_{2n+1} 也存在类似于 $\phi(t)$ 和 $\Psi(t)$ 之间的正交关系. 小波包分解和重建的系数递推公式如式 (5) 和式 (6) 所示:

$$\begin{cases} d_k^{j+1, 2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j, n}, \\ d_k^{j+1, 2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j, n}, \end{cases} \quad (5)$$

$$d_l^{j, n} = \sum_k [h_{0(l-2k)} d_k^{j+1, 2n} + h_{1(l-2k)} d_k^{j+1, 2n+1}] = \sum_k [g_{0(l-2k)} d_k^{j+1, 2n} + \sum_k [g_{1(l-2k)} d_k^{j+1, 2n+1}]], \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 中, $d_l^{j, n}$ 为第 j 层第 n 个子空间的小波包系数, g_0 和 g_1 即为与 h_{0k} 和 h_{1k} 分别对应的重构滤波器系数. 在利用小波包分解提取地震波信号时, 若 GPS 接收机采样率为 f , 根据采样定理可知动态定位时间序列最高频率成分为 $f/2$. 在利用小波包 j 层分解动态定位结果时, 宽度为 $f/2$ 的频带将均匀地分解为 2^j 个子频带信号, 当 $j=3$ 时, 频带划分如图 1 所示.

对于 1 Hz GPS 接收机采样率, 动态定位时间序列最高频率成分为 0.5 Hz, 当对其进行 5 层小波包分解时, 信号将被均匀分解为 32 个子频带: $(0, 0.0156], (0.0156, 0.0312], \dots, (0.4836, 0.5]$, 选取最低频率段 (即频率区间 $(0, 0.0156]$) 和高频率段 (即频率区间 $(0.2, 0.5]$ Hz) 分别作为反映多路径效应为主的误差和随机误差提取并消除, 提取地震波信号.

2 数据采集、处理方法及其精度分析

2.1 数据采集

SCIGN 由 250 个测站组成, 目前定期提供的数据产品包括原始 GPS 观测数据、测站坐标及其时间

序列、测站漂移速度以及地壳形变模型等. 全部测站采用支持高采样率甚至超高采样率 (20~50 Hz) 的双频接收机观测. 其中, 提供 1 Hz 采样率数据有 130 余测站. 考虑到观测数据质量、震中距离以及地震波传播的方向等因素, 本文选取其中 19 个测站进行解算 (以 LOWS 站作为参考站), 提取地震波的 GPS 观测信号. 各测站及地震震中位置的分布如图 2 所示, 各测站的震中距见表 1.

2.2 数据处理方法及精度分析

由于测站之间的点间距较长 (最大间距为 500 km), 采用 GAMIT/GLOBK 中基于载波相位差分观测的定位模块 TRACK 进行数据解算, 以削弱电离层、对流层误差的影响. 解算过程中, 引入 IGS 提供的事后精密星历以及高精度初始坐标, 以西北部的 LOWS 测站作为参考站. 由于 LOWS 站距离震中较远, 地震波到达时间相对较晚, 将其作为参考站能较好地体现地震波传播至各站点的时间差, 同时该站点的观测环境较好, 受多路径效应等影响也较小. 由于 GPS 在高程方向定位噪声较大, 定位误差在水平方向的 2 倍以上, 本文仅考虑水平方向上的分量.

表 1 中的参考坐标误差分布是利用地震前一天 (2010-04-03T22:00:00~22:59:59) 1 h 的 1 Hz 观测数据解算并利用小波包分解进行后处理所得. 误差的衡量采用四分位距离 (Interquartile Range, IQR) 来描述, 即所有样本按大小排列后位于 75% 和 25% 位置数值的差值. 与标准差等其他指标相

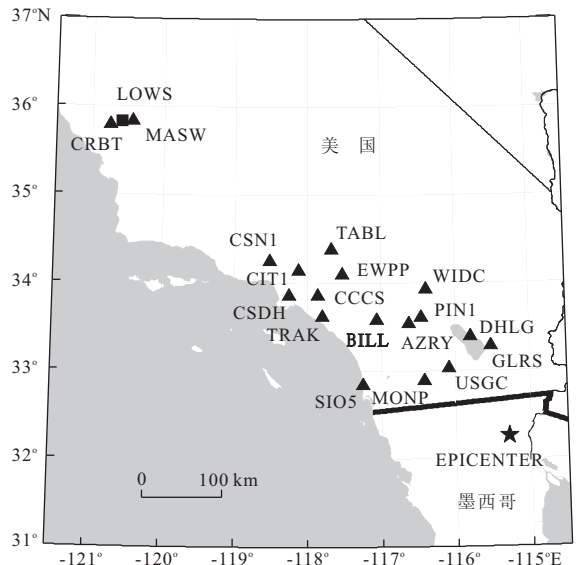


图 2 19 个 GPS 观测站及震中位置的分布
Fig. 2 Distribution of 19 stations and epicenter

表 1 19 个测站的震中距及其由 1 Hz 采样观测值解算的 E、N 方向坐标的参考误差

Table 1 Epicentral distance, north and east coordinates reference error based on 1 Hz observation of 19 stations

站名	震中距(km)	处理前误差(mm)		处理后误差(mm)		站名	震中距(km)	处理前误差(mm)		处理后误差(mm)	
		N	E	N	E			N	E	N	E
BILL	215	10.8	8.3	5.0	3.3	PIN1	183	7.4	7.9	4.5	3.1
CCCS	301	11.5	7.5	4.7	3.2	SIO5	195	12.0	7.2	4.4	2.9
CIT1	334	26.3	7.3	5.3	3.6	TABL	320	17.1	20.1	4.8	3.5
CRBT	638	18.3	10.2	5.2	3.3	TRAK	278	18.9	18.9	4.3	2.9
CSDH	328	23.3	6.0	4.8	3.1	USGC	110	11.9	12.1	5.5	3.5
DHLG	130	13.4	7.4	4.0	2.7	WIDC	208	25.8	11.2	4.7	3.2
EWPP	290	11.7	6.5	5.3	3.5	AZRY	184	51.4	171.0	10.3	8.8
GLRS	110	18.7	8.8	4.9	3.3	CSN1	371	580.1	305.7	10.8	7.8
MASW	615	10.1	7.0	4.9	3.1	LOWS	627	—	—	—	—
MONP	109	18.1	9.3	4.3	2.9	—	—	—	—	—	—

比,在描述动态定位时间序列离散程度上,IQR 更稳健,受个别离散度较大的异常点影响较小.在正态分布的情况下,IQR 为标准差的 1.35 倍.由未经小波包分解处理的动态定位误差情况来看,各个测站普遍受到多路径效应的影响而波动较大,仅有厘米级精度(N、E 方向平均误差分别为 49.3 mm 和 35.3 mm),部分测站由于卫星失锁出现连续异常值仅为分米级精度(测站 AZRY 和 CSN1).经过小波包分解提取和消除以多路径效应为主的误差之后,18 个测站在 N 方向的平均精度达到 5.4 mm,E 方向平均精度达到 3.8 mm,精度得到显著提高.而 N、E 方向的精度不相同,则主要是由于卫星在空中的几何分布因素所造成.

3 小波包分解提取地震波信号

以此次墨西哥 7.2 级地震为例,本文选取 2010-04-03T22:00:00~22:59:59(共计 1 h)数据进行动态定位解算,解算过程如上所述.同时,选取 T22:40:00~22:49:59(共计 600 s)的时段,选择 Daubechies1 小波进行小波包分解对 18 个测站初步定位结果提取、消除多路径误差并进行功率谱分析.以距离震中约 188 km 的 PIN1 为例,其利用差分观测量所获得的动态位移序列初步结果如图 3 所示('0'时刻即为地震发生的时刻).

图 3 分别为测站 PIN1 在 N、E 方向上的初步动态位移序列结果分量.测站 PIN1 在震后约 70 s 左右,受地震波的影响而开始发生振荡.同时,因受到以多路径效应为主的因素的影响,初步动态位移结果 N 分量则表现出缓慢的向西方向的运动趋势;E 分量呈现出频率较低的缓慢波动的趋势.显然,多路

径误差降低了动态定位的精度.为更好地了解初步动态位移结果及多路径误差的特性,对其进行功率谱分析.测站 PIN1 在 N、E 方向分量的功率谱曲线如图 4 所示.

图 4 中,测站 PIN1 的 N、E 两个方向的初步动态位移的频率分量主要分为 3 个部分:低频带分量(频带约为 0~0.02 Hz 左右);中频带分量(频带约为 0.02~0.2 Hz 左右);高频带分量(0.2~0.5 Hz).其中,低频带分量的功率最大(N、E 方向分别约为 2 400 mm²·s 和 1 100 mm²·s),实际上代表的是以多路径误差为主的缓慢变化的分量;中频率的分量功率较小(N、E 方向峰值分别约为 400 mm²·s 和 200 mm²·s),代表由于地震波而引起的地表波动的部分;高频带分量功率最小(N、E 方向均在 20 mm²·s 以下),为动态位移序列中以高频率随机误差为主的分量. PIN1 的功率谱分析与 Choi *et al.* (2004)在对同样位于南加州的 1 Hz GPS 测站在 2003 年 San Simeon 6.5 级地震前 45 min 的多路径误差分析结果相比,两者在低频部分具有较好的一致性,从另一个方面说明低频带分量主要源于多路径误差的影响.因此,针对地震波引起的采样率为 1 Hz 的动态位移序列的频率特征,利用小波包进行 5 层分解时,能利用分解子频带中的低频部分(即频率区间(0,0.015 6]Hz)有效地提取和消除多路径误差.同时,还能利用子频带中的高频部分(即频率区间(0.2,0.5]Hz)进一步去除动态位移序列中的高频率随机误差,提取由地震波引起的动态位移信号.利用小波包分解对测站 PIN1 的 N、E 方向初步动态位移分量提取的多路径误差如图 5 所示.

由图 5 可知,测站 PIN1 在地震发生的时段内,采用小波包分解方法提取的 N、E 方向多路径误差的峰—峰值分别达到了 17.6 mm 和 9.5 mm.通过

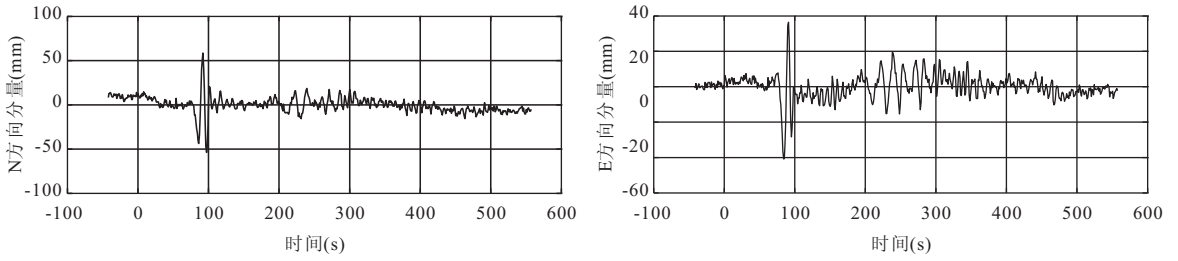


图 3 测站 PIN1 在 N、E 方向初步动态位移序列结果分量

Fig. 3 North and east raw dynamic displacement components of PIN1 station

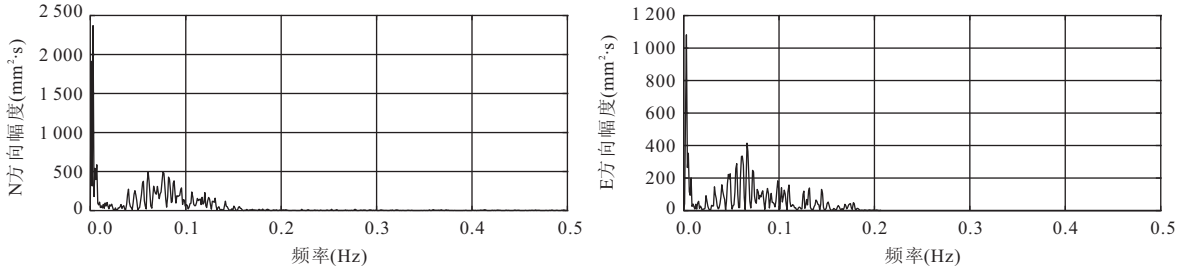


图 4 测站 PIN1 在 N、E 方向初步动态位移序列功率谱图

Fig. 4 Power spectrum of north, east raw dynamic displacement components of PIN1 station

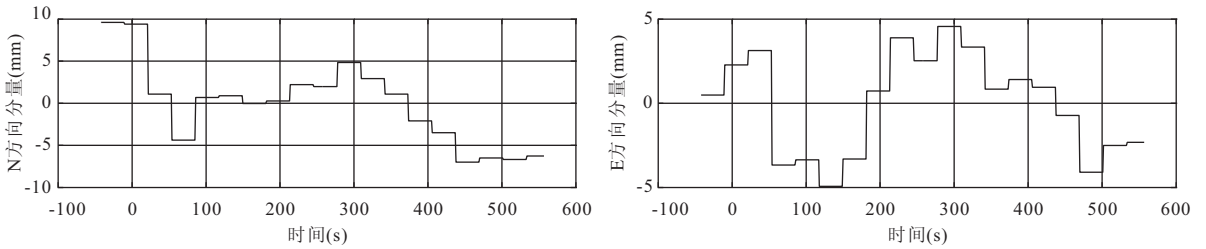


图 5 小波包分解提取的测站 PIN1 的多路径误差

Fig. 5 Multipath error extracted by wavelet packet decomposition in PIN1 station

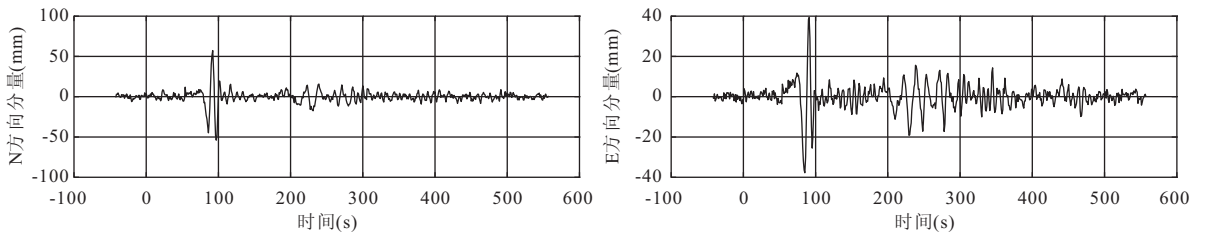


图 6 测站 PIN1 的地震动动态位移序列 N、E 方向分量

Fig. 6 Clean north and east components of seismic dynamic displacement of PIN1 station

对测站 PIN1 的多路径误差进行提取和消除,并进一步消除部分高频率的随机误差,提取的由地震波引起的动态位移序列如图 6 所示。

图 6 中,PIN1 测站中以低频率信号为主的多路径误差已经得到较好的消除。同时,不难观测到地震波到达测站 PIN1 的时间在地震发生后 70~75 s 之间。地震波造成的测站的 N、E 方向上的最大振幅分

别约 100~80 mm。

4 地震波信号及其分析

为进一步研究此次墨西哥 M7.2 地震及其地震波传播的特征,选取 MONP、USGC、AZRY 等 12 个测站进行分组、对比和讨论。MONP、USGC 等 12 个

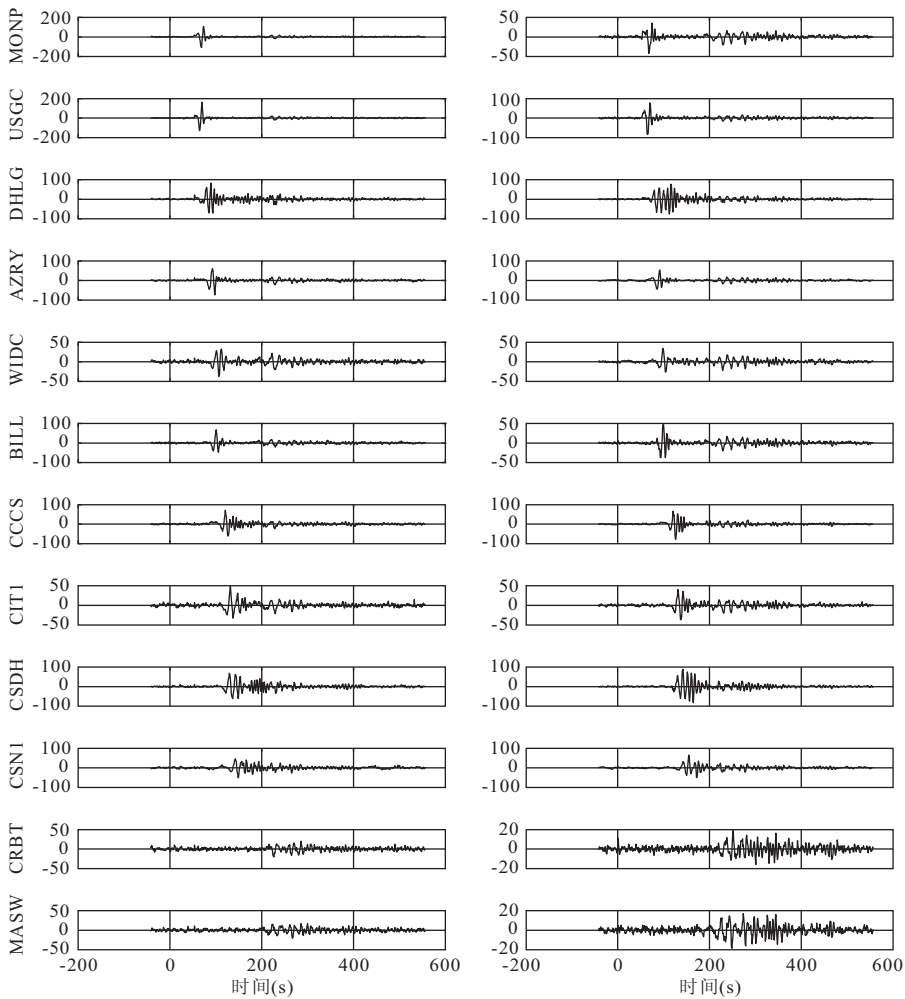


图 7 12 个测站的地震动态位移序列结果

Fig. 7 Seismic wave observation of 12 stations

测站 N、E 方向上动态位移分量如图 7 所示。

图 7 中, 12 个测站的 N、E 方向上的动态位移序列经过小波包分解处理, 已较好地提取和消除以低频率分量为主的多路径等误差以及部分高频随机噪声。12 个测站在图中的顺序基本按照震中距离排列, 能较好地体现出地震波的传播及其特征。依据震中距离 12 个测站可以进一步划分为四组: 近距离组, 包括 MONP、USGC 和 DHLG, 震中距离范围为 100~150 km; 较近距离组, 包括 AZRY、WIDC 和 BILL, 震中距离范围在 150~230 km; 较远距离组, 包括 CCCS、CIT1、CSDH 和 CSN1, 震中距离范围为 300~380 km; 远距离组, 包括 CRBT 和 MASW, 震中距离超过 600 km。

近距离组的 3 个测站中, USGC 和 MONP 距离较近, 地震波到达的时刻以及由地震波引起的测站的振动的波动形态及其幅度均较为相似, 地震波大约在震后 55 s 到达, 造成峰—峰值超过 150 mm 以

上的振动。其中, 测站 USGC 的在 N 方向上的振动幅度甚至超过 300 mm。距离稍远的测站 DHLG 大约也在 55 s 开始呈现出波动状态, 但其首次波峰—谷出现的时刻较 USGC 和 MONP 略晚, 其振动的峰—峰值较其他两站也略低, N、E 方向均在 150 mm 左右。较近距离组的 3 个测站中, AZRY 的震中距离较近, WIDC 和 BILL 的震中距离比较接近略远于 AZRY, 由图中相应曲线也能看出, 地震波到达 3 个测站的时间依次约为震后 80 s 和 85 s。从测站振幅上看, 测站 AZRY 和 WIDC 在 N、E 方向上的峰—峰值约在 130 mm 和 100 mm, 而测站 BILL 则略小, 分别为 100 mm 和 90 mm 左右。在较远距离组的 4 个测站中, CCCS 震中距离最小, CIT1 和 CSDH 稍远, CSN1 为该组震中距最远的测站。地震波到达 CCCS 的时间约为震后 100 s, CIT1 和 CSDH 略晚 5 s 到达, 震中距离最远的测站 CSN1 大约在震后 120 s 才受到地震波的影响产生振动。在振幅方面,

CCCS、CIT1 和 CSDH 三个测站 N 方向的峰—峰值较为接近(120 mm 左右),E 方向峰—峰值则分别为 130 mm、70 mm 和 160 mm 左右。从地质构造上看,测站 CCCS 与 CSDH 均位于洛杉矶盆地内,因此,其幅度比 CIT1 甚至近距离组和较近距离组的测站 E 方向振幅更大的原因可能来自于洛杉矶盆地的放大作用,这种放大作用受到盆地振动自然频率以及土质结构特性等因素的影响。远距离组的 2 个测站受到地震波影响而产生振动的时间最晚,约为震后 210~220 s。从振幅上看,CRBT 和 MASW 在 N、E 方向上的振幅峰—峰值均为 40 mm 左右。

由 12 个测站观测到的地震波到达时刻及震中距离可估算出此次地震波传播速度大约为 3.2 km/s。同时,观测结果能较好地反映出地震波的振幅存在随着震中距离的增大而衰减的趋势。从 12 个测站 N、E 方向分量来看,在大约 200 s 之后均出现持续时间约为 170 s 的小幅度的波动,实际上并非直接由地震波引起,而是其相对应参考站 LOWS 的位移(而 LOWS 站在该时段受到地震波影响发生位移)。总的来说,以上 12 个 1 HzGPS 测站经过单历元动态解算以及小波包分解后处理,能较好地反映出地震波在该地区的传播过程及其特性。

5 结论与展望

本文提出一种基于小波包分解的方法,对高采样率 GPS 观测的地震波动态位移序列中的多路径误差进行消除,同时去除高频率随机噪声,提取地震波信号。通过结合 SCIGN 的 19 个 GPS 测站的 1 Hz 采样 GPS 观测数据,对 2010 年墨西哥 M7.2 地震的地震波引起的地表动态位移进行了解算,采用小波包分解有效地提取地震波信号并对其进行谱分析。结果表明,该方法提取的地震波信号能较好地反映出地震波的传播及其特性。与传统的恒星日滤波等方法相比,利用小波包分解的方法对初步动态定位结果进行多路径效应和高频率随机误差进行处理,具有无需进行多天重复观测、处理精度高的特点。随着我国 GPS 观测网络工程‘中国大陆构造环境监测网络’的建立,将获取大量的高采样率甚至超高采样率 GPS 观测数据,如何拓宽 GPS 技术在地震监测预报中的应用,如何通过改进高采样率数据处理的方法从而提高动态定位精度,如何结合传统的地震观测仪器实现地震波地面运动传播特征、震源破裂等过程的多方法、多手段的监测是进一步研

究的方向。

致谢:感谢 SCIGN 提供的 1 HzGPS 观测数据以及麻省理工学院的 Thomas Herring 和 Robert King 教授在数据处理过程中的帮助。

References

- Bilich, A., Cassidy, J. F., Larson, K. M., et al., 2008. GPS seismology: application to the 2002 $M_w = 7.9$ Denali fault earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, 98(2):593—606. doi:10.1785/0120070096
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Melbourne, T. I., 2004. Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network. *Geophysical Research Letters*, 31(6):L06604. doi:10.1029/2003GL019150
- Chang, C., Juang, J., 2008. An adaptive multipath mitigation filter for GNSS applications. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 214815. doi:10.1155/2008/214815
- Choi, K. H., Bilich, A., Larson, K. M., et al., 2004. Modified sidereal filtering: implications for high-rate GPS positioning. *Geophysical Research Letters*, 31(22):L22608. doi:10.1029/2004GL021621
- Dai, W. J., Ding, X. L., Zhu, J. J., et al., 2006. EMD filter method and its application in GPS multipath. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 35(4):321—327 (in Chinese with English abstract).
- Fang, R. X., Shi, C., Gu, S. F., 2009. Precise point positioning with high-rate GPS data applied to seismic displacements analysis. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 34(11):1340—1358(in Chinese with English abstract).
- Fang, Y., Jiang, Z. S., Zhang, J., et al., 2009. High-resolution characteristics of recent crustal movement in Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3):399—404(in Chinese with English abstract).
- Gomberg, J., Bodin, P., Larson, K., et al., 2004. Earthquake nucleation by transient deformations caused by the $M = 7.9$ Denali, Alaska, earthquake. *Nature*, 427(6975):621—624. doi:10.1038/nature02335
- Genrich, J. F., Bock, Y., 1992. Rapid resolution of crustal motion at short ranges with the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97(B3):3261—3269. doi:10.1029/91JB02997
- Hardebeck, J. L., Boatwright, J., Dreger, D., et al., 2005. Preliminary report on the 22 December 2003, $M_6.5$ San Simeon, California earthquake. *Seismological Research Letters*, 75(2):155—172.

- Huang, D. F., Ding, X. L., Chen, Y. Q., et al., 2001. Wavelet filters based separation of GPS multi-path effects and engineering structure vibrations. *Acta Geodatica et Cartographica Sinica*, 30(1): 36—41 (in Chinese with English abstract).
- Ji, C., Larson, K. M., Tan, Y., et al., 2004. Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1 Hz GPS, strong motion, and teleseismic data. *Geophysical Research Letters*, 31(17): L17608. doi: 10.1029/2004GL020448
- Kouba, J., 2003. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS. *Studia Geophysical Geodaetica*, 47(4): 741—755. doi: 10.1023/A:1026390618355
- Larson, K. M., Bodin, P., Gomberg, J., et al., 2003. Using 1 Hz GPS to measure deformations caused by the Denali fault earthquake. *Science*, 300(5624): 1421—1424. doi: 10.1126/sciences.1084531
- Larson, K. M., 2009. GPS seismology. *Journal of Geodesy*, 83(3—4): 227—233. doi: 10.1007/s00190—008—0233—x
- Miyazaki, S., Larson, K. M., Choi, K. H., et al., 2004. Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki (Hokkaido) earthquake using 1 Hz GPS data. *Geophysical Research Letters*, 31(21): L21603.
- Xia, L. Y., Liu, J. N., 2001. Approach for multipath reduction using wavelet algorithm. *ION GPS2001*: 2134—2143.
- Zhong, P., Ding, X. L., Zheng, D. W., et al., 2006. Separation of structure vibrations and GPS multipath signals using Vondrak filter. *J. Cent. South. Univ. (Science and Technology)*, 36(6): 1189—1195 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军, 等, 2006. 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. *测绘学报*, 35(4): 321—327.
- 方荣新, 施闯, 辜声峰, 等, 2009. 基于 PPP 动态定位技术的同震地表形变分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 34(11): 1340—1358.
- 方颖, 江在森, 张晶, 等, 2009. 青藏高原现今高分辨率地壳运动特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 399—404.
- 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等, 2001. GPS 多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分方法. *测绘学报*, 30(1): 36—41.
- 钟萍, 丁晓利, 郑大伟, 等, 2006. Vondrak 滤波法用于结构振动与 GPS 多路径信号的分离. *中南大学学报(自然科学版)*, 36(6): 1189—1195.