

利用小波分解重构提取 高频 GPS 数据静态永久性变形

郭爱智^{1,2} 王 勇¹ 苏晓庆^{1,2} 李建勇³

(1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)

(2 中国科学院大学,北京市石景山区玉泉路甲 19 号,100049)

(3 地壳运动监测工程研究中心,北京市海淀区复兴路 63 号,100036)

摘 要:研究了利用小波分解重构提取高频 GPS 数据静态永久性变形的办法。通过对 El Mayor-Cucapah 地震和东日本大地震两次地震高频 GPS 数据的处理和分析表明,PPP 模式处理的高频 GPS 数据能够获取和强震仪相近的短周期强运动位移信息,并且保留了静态永久性变形信息;利用小波分解重构可以高精度地估计高频 GPS 动态位移中的静态永久性变形,有效区分主震和余震造成的静态永久性变形以及震后蠕滑位移。

关键词:小波分解重构;高频 GPS 数据;精密单点定位(PPP);静态永久性变形

中图法分类号:P228.41

利用 GPS 获取地震永久性位移/变形,可为确定震源参数、反演静态位错模型提供重要的约束条件^[1-4]。以往利用 GPS 确定地震引起的永久性位移/变形,多利用地震前后的 GPS 静态解算结果来估计^[5-8]。但是在强震/巨震发生时,这种方法得到的永久性变形是主震、余震及震后断层蠕滑位移之和,无法将三者单独区分开。

Larson 分析了 2003 年日本 Tokachi-Oki 地震(Ms8.0)前后 30 s 采样的 GPS 观测资料,利用卡尔曼滤波方法估计了主震和震后静态永久性变形(static offset)效应。为了避免动态位移对卡尔曼滤波的影响,在估计中去掉了地震前 5 min 的动态位移^[9]。

由于高频 GPS 观测资料能够获取宽频带的信号,同时能更有效地消除多路径影响^[10-11],充分利用高频 GPS 包含的全部信息进行科学研究十分必要。本文结合 El Mayor-Cucapah 地震和东日本大地震高频 GPS 观测资料,着重研究利用 PPP 模式处理高频 GPS 动态位移,并通过小波分解重构获取静态永久性形变的方法。

1 高频 GPS 数据处理

本文在数据处理中,采用了 JPL 研发的 GIPSY 软件 6.0 版本动态 PPP 模式,在宽巷相位偏差(wide-lane phase bias)信息的辅助下,单站解算整周模糊度^[8]。数据处理过程中固定 JPL 提供的 15 min 精密轨道和 30 s 精密钟差产品以及宽巷相位偏差文件,同时估计对流层延迟(随机游走 5×10^{-8} km/sqrt(s)),接收机位置参数(白噪声特性)和接收机钟差。上述方法处理得出的动态位移仍然受多路径效应的影响,本文中多路径误差处理采用了 Larson 提出的 ARTA 方法^[11]。

2 静态永久性变形提取的小波分析方法

通过 PPP 处理获取的高频 GPS 动态位移序列既包含高频波形又包含低频地表永久性变形,属于非平稳信号。小波方法因其具有良好的时频局部化特性和处理突变信号的能力,因此被选定为提取高频 GPS 时间序列长期趋势的方法。同

收稿日期:2013-06-06。

项目来源:地震行业科研专项基金资助项目(201108004);国家自然科学基金资助项目(41021003,40974044,41074501,40974013);中国科学院动力大地测量学重点实验室基金资助项目(0906361042)。

时,相对 SPA(smoothness priors approach)和 EMD,小波方法在时间序列较长时(大于 1 000 历元),运算耗时不会有显著增长^[13]。小波分解重构方法估计高频 GPS 永久性变形的步骤为:

1) 时频分析。对动态位移进行连续小波变换,根据小波能量谱确定高频信号的频率范围和持续时间。

2) 高频 GPS 信号分解与重构。对动态位移进行分解,并根据 1) 的结果选择合适的分解重构层数。若第 n 层分解的低频部分 A_n 的频率上限(最高频率)低于高频 GPS 信号的下限(最低频率),则将 A_n 进行单枝重构。

3) 静态永久性变形。选取单枝重构信号静态永久性变形已经形成的时段,忽略短时间蠕滑影响,利用最小二乘进行直线拟合,即可得到静态永久性变形。

3 地震实例及分析讨论

3.1 2010-04-04 El Mayor-Cucapah 地震

El Mayor-Cucapah 地震(Mw 7.2)发生在 2010-04-04 的美国和墨西哥边境 Baja 地区。美国地学研究组织 UNAVCO 收集了大量的 5 Hz 高频 GPS 数据。同时,该区域保留了 200 Hz 的加速度记录,震后美国地质调查局(USGS)的国家强震运动工程(National Strong-Motion Project, NSMP)提供了加速度记录两次积分并修正的动态位移结果。在研究中,我们选择两个高频 GPS 站 P496 和 P744,采样均为 5 Hz,它们的附近布设有强震仪 5058 和 5028,可以认为高频 GPS 和

强震仪是并址观测(如封三彩图 1 所示,图中红圆点为 5 Hz 高频 GPS 观测站,黑三角为强震仪,红五角星为震中位置。图右上角为测站分布放大图)。

强震仪的原始观测记录是加速度,为恢复位移信息,需对加速度值进行两次积分。积分过程中容易产生零漂,在基线纠正过程中容易掺杂人为因素^[10-11],并且易受地面倾斜等因素影响,引起结果明显的偏差^[12]。NSMP 提供的强震仪位移信息都经过了高通滤波,失去了静态永久性变形信息(如封三彩图 2 绿线所示)。

我们利用 §1 中所述策略处理了高频 GPS 观测数据,得到了两个台站的动态位移序列(如封三彩图 2 红线所示)。由彩图 2 可知,动态位移序列不仅保留了地面强运动的动态过程信息,而且记录了地震造成的静态永久性变形。通过对比此后高频 GPS 和强震仪的结果可知,两者记录到的短周期动态位移信息高度吻合,从而说明由高频 GPS 记录得到的短周期信号具有较高的精确性和可靠性。然后利用 §2 中方法进行频谱分析(封三彩图 3 所示)、小波分解重构,最终得到静态永久性变形信息(封三彩图 2 黑线所示)。

震后,Santillan 利用 GIPSY 软件 5.0 版本估计了由震后 15 min 的数据计算的同震位移,计算时使用了 JPL 的实时轨道和钟差产品,采用 PPP 静态定位模式。Herring 也给出了利用 GAMIT/GLOBK 软件计算的由震前两天和震后两天的数据计算的同震位移,计算时采用差分静态定位模式和 IGS 的最终产品。为了验证估计结果的精度,我们把三者进行了对比分析(见表 1)。

表 1 不同方法所得静态永久性变形及中误差或标准偏差/cm

Tab. 1 Static Offset Obtained by Different Methods and the Corresponding Mean Square Errors(cm)

测站	小波分解重构 5Hz 高频 GPS 动态位移				Herring				Santillan			
	东西		南北		东西		南北		东西		南北	
	估值	中误差	估值	中误差	估值	中误差	估值	中误差	估值	中误差	估值	中误差
P496	2.55	0.18	-16.59	0.16	2.358	0.16	-18.092	0.17	1.48	0.29	-16.63	0.23
P744	1.27	0.12	-6.03	0.20	0.966	0.14	-8.088	0.15	0.59	0.22	-6.34	0.12

由表 1 可知,本文结果和 Santillan 的结果相比,两者南北分量符合较好,两者之间的差值在 P496 小于 1 mm,P744 为 3 mm,东西分量相差较大。Santillan 东西分量结果相对其他两种利用最终精密星历和钟差产品所估值的结果均明显偏小,很有可能是受实时星历或钟差系统误差的影响。而本文结果与 Herring 的结果相比,两者东西分量符合较好,P496 站两者差值为 2 mm,P744 站两者差值为 3 mm,南北方向相差较大。

在地震发生后,断层两侧的近震 GPS 站在南北分量都产生较大的静态永久性变形,震后一段时间南北方向很可能存在震后蠕滑,使得 MIT 结果和其他两种利用震后短时间内的观测数据计算的结果具有较大偏差,差值体现了南北分量震后蠕滑的积累量。由此推断,P496 和 P744 南北分量在震后两天内的蠕滑量分别在 1.4 cm 和 2.0 cm。综上可知,高频 GPS 不仅能够获得高精度的动态位移,而且结合小波分解重构可以获取高精度的

静态永久性变形。

3.2 2011-03-11 东日本大地震

2011-03-11,日本本州岛以东太平洋海域发生 Mw9.0 级地震,文献[7]给出了中国陆态网络和日本及周边台站的位移信息,文献[8]也进行了类似工作。除后者的 MIZU 站外,两文献同震位移估计均利用地震前后静态解算结果求差获得。

主震发生后约 30 min,本州岛南部发生了一次 Mw7.9 级强余震,此后约 10 min,Mw9.0 震中东部外海又发生了一次 Mw7.6 级强余震(如封三彩图 4 所示,图中红色五角星为主震和强余震位置,黄色的圆点为高频 GPS 观测站)。Mw9.0 级主震导致 USUD、JA01、MIZU 3 个观测站的東西位移分量分别为 17.4 cm、15.5 cm 和 205.5 cm(如封三彩图 5、彩图 6(a)所示)。在 Mw9.0 主震发生后 30 min 内,USUD 和 JA01 没有发生明显的蠕滑过程。Mw7.9 级强余震发生

后,分别引起 USUD 和 JA01 有 2.6 cm 和 6.5 cm 的东西向永久性变形。USUD 和 JA01 都在本州岛的南部,分别距离 Mw7.9 级余震震中 247 km 和 152 km。由此可以推测,在 Mw7.9 强余震发生后,本州岛南部、两个观测站及强余震近震区域均存在明显的东西向永久性变形。文献[7-8]中提及的 TSKB、MTKA、KSMV、KGNI 等站也均在该区域,东西分量必定存在明显的静态永久性变形。

在此期间,本州岛北部的 MIZU 东向发生快速蠕滑(如封三彩图 6(b)所示),累计量在震后 1 800 s 内接近 5 cm,此后 MIZU 表现出短暂的西向蠕滑,直至此后的 Mw7.6 强余震发生(2 400 s 左右)。但是由于 Mw7.6 强余震距离陆地较远,3 个测站没有观测到明显的静态永久性变形。小波分解重构结果和两篇参考文献结果对比见表 2。

表 2 不同方法估计所得静态永久性变形/cm
Tab. 2 Static Offset Estimated by Different Methods(cm)

测站名称	文献[7] 东西/南北	文献[8] 东西/南北	小波分解重构高频 GPS 动态位移	
			Mw9.0 主震后 东西/南北	Mw7.9 余震后 东西/南北
USUD	21.9/4.8	22.7/5.3	17.4/4.5	20.0/4.5
MIZU	-	204.9/-125.0	205.5/-114.0	209.5/-114.0
JA01	-	-	15.5/6.25	22.0/6.25

由表 2 可知,USUD 在 Mw7.9 强余震发生前东西分量估计值明显小于两参考文献的估值,当 Mw7.9 强余震发生后,东西分量接近于两引文的估计值,但仍偏小。这种差异主要是两篇参考文献使用了震后较长的观测数据,因而结果包含了一定的蠕滑积累量。同样,本文得出的 USUD 南北分量略小于两篇参考文献的估计值。两篇参考文献认为其计算结果均为 Mw9.0 主震的影响(或者包括震后一定时间的滑移量),是不严谨的。其东西分量除包含主震造成的静态永久性变形外,本州岛南部的一些观测站还包含了 Mw7.9 强余震引起的静态永久性变形以及部分的震后滑移量。由于文献[7-8]所用的震后观测数据的长度和时段不同,两者之间在 USUD 的东西分量也存在 8 mm 的差异。在 MIZU 站,文献[8]和本文均利用了震后较短时段内的数据,在东西分量差别不大,但南北分量相差达到 11 cm。通过与现已公布的结果对比可知,本文的结果与其他学者和方法处理得出的结果符合得很好,较为可信。

参 考 文 献

- [1] Anzidei M. Coseismic Deformation of the Destructive April 6, 2009 L' Aquila Earthquake (Central Italy) from GPS Data[J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L17307
- [2] Lin A, Ren Z, Jia D, et al. Co-seismic Thrusting Rupture and Slip Distribution Produced by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, China[J]. *Tectonophysics*, 2009, 471(3-4): 203-215
- [3] Ching K E, Rau R J, Zeng Y. Coseismic Source Model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung Earthquake, Taiwan, Determined from GPS Measurements[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112: B06422
- [4] Diao F Q, Xiong X, Ni S D, et al. Slip Model for the 2011 Mw 9.0 Sendai (Japan) Earthquake and Its Mw 7.9 Aftershock Derived from GPS Data[J]. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(27): 2 941-2 947
- [5] Wdowski S, Bock Y, Zhang J, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial Filtering of Daily Positions for Estimating Coseismic and Postseismic Displacements Induced by the 1992 Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Re-*

- search, 1997,102(8): 18 057-18 070
- [6] Banerjee P, Pollitz F, Nagarajan B, et al. Coseismic Slip Distributions of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman and 28 March 2005 Nias Earthquakes from GPS Static Offsets[J]. Bull Seismol Soc Am, 2007,97(1A): S86-S102
- [7] Wang M, Li Q, Wang F, et al. Far-field Coseismic Displacements Associated with the 2011 Tohoku-Oki Earthquake in Japan Observed by Global Positioning System[J]. Chin Sci Bull, 2011, 56(23): 2 419-2 424
- [8] 杨少敏, 聂兆生, 贾志革, 等. GPS 解算的日本 Mw9.0 级地震的远场同震地表位移[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011,36(11): 1 336-1 339
- [9] Larson K M, Miyazaki S. Resolving Static Offsets from High-rate GPS Data: the 2003 Tokachi-Oki Earthquake[J]. Earth Planets Space, 2008,60:801-808
- [10] Agnew D C, Larson K M. Finding the Repeat Times of the GPS Constellation[J]. GPS Solutions, 2007,11(1): 71-76
- [11] Larson K M. Improving the Precision of High-rate GPS[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B05422
- [12] Bertiger W, Shailen D, Haines D B, et al. Single Receiver Phase Ambiguity Resolution with GPS Data[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(5): 327-337
- [13] Li L, Li K, Liu C. Comparison of Detrending Methods in Spectral Analysis of Heart Rate Variability[J]. Research Journal of Applied Sciences, 2011,3(9): 1 014-1 021
- [14] Wang R, Schurr B, Milkereit C, et al. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records[J]. Bull Seismol Soc Am, 2011,101(5): 2 029-2 044
- [15] Wu Y M, Wu C F. Approximate Recovery of Coseismic Deformation from Taiwan Strong-motion Records[J]. J Seismology, 2002,11(2): 159-170
- [16] Graizer V. Strong Motion Recordings and Residual Displacements: What are We Actually Recording in Strong Motion Seismology[J]. Seismol Res Lett, 2010,81(4): 635-639

第一作者简介:郭爱智,博士生,主要从事高频 GPS 数据处理、定位定速及其地学应用研究。

E-mail:guoazhi@asch.whigg.ac.cn

Resolving Static Offset from High-rate GPS Data by Wavelet Decomposition-Reconstruction Algorithm

GUO Aizhi^{1,2} WANG Yong¹ SU Xiaoqing^{1,2} LI Jianyong³

(1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China)

(3 National Earthquake Infrastructure Service, 63 Fuxing Road, Beijing 100036, China)

Abstract: This paper focuses on the research of resolving static offset from high-rate GPS data by wavelet decomposition-reconstruction algorithm. After processing and analyzing the high-rate GPS data of El Mayor-Cucapah earthquake and Tohoku-Oki earthquake in precise point positioning (PPP) mode, we find that the short-period waveforms captured by high-rate GPS data processed in PPP mode are comparable with the twice-integrated strong-motion records and the former one also could retain the static offset signal. Static offset resolved by decomposition-reconstruction algorithm from the high-rate GPS data is helpful to separate the static offset induced by main shock, strong aftershock and the post-seismic deformation.

Key words: wavelet decomposition-reconstruction algorithm; high-rate GPS data; precise point positioning (PPP); static offset

About the first author: GUO Aizhi, Ph. D candidate, majors in high-rate GPS data processing, positioning and velocity determination and their applications in geo-science.

E-mail: guoazhi@asch.whigg.ac.cn

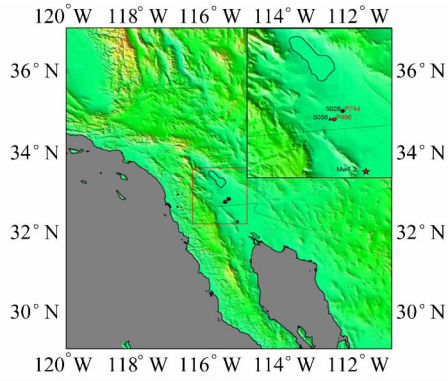


图 1 El Mayor-Cucapah 地震震中及观测站分布图

Fig. 1 Locations of El Mayor-Cucapah Earthquake Epicenter Location and Observation Station

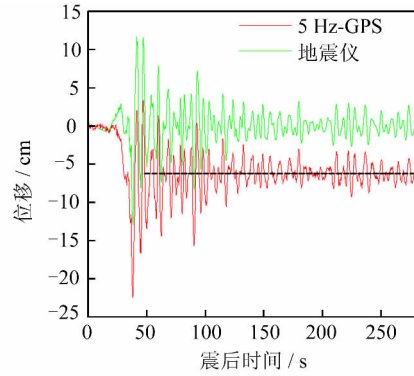


图 2 P744 观测站 5 Hz-GPS(红)和 5028 强震仪两次积分的南北分量波形(绿)

Fig. 2 5 Hz North-South Displacement of P744 High-rate GPS Station and the Twice-integrated Displacement of 5028 Strong Motion Instrument

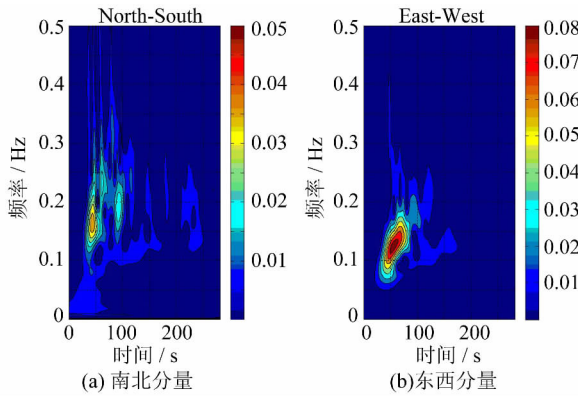


图 3 P744 高频 GPS 的频谱图

Fig. 3 Frequency Spectrum of High-rate GPS Station P744

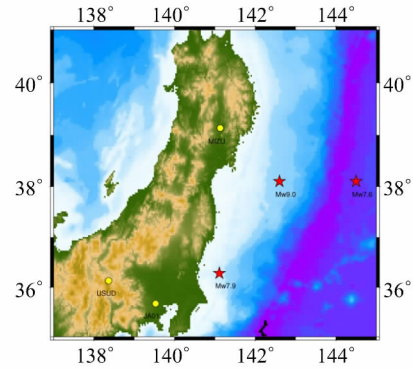


图 4 东日本大地震主震、强余震和高频 GPS 观测站分布图

Fig. 4 Locations of Tohoku-Oki Earthquake Main Shock, Strong Aftershocks and High-rate GPS Stations

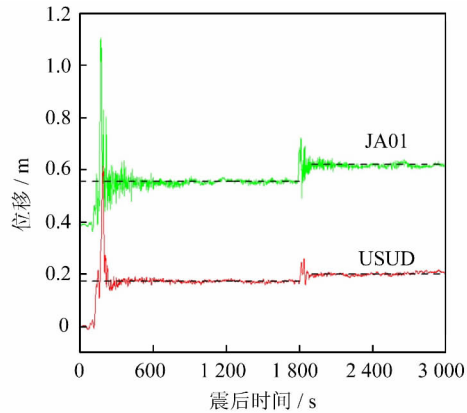


图 5 A01(绿)和 USUD(红)东西分量动态位移以及 Mw9.0 主震及 Mw7.9 强余震后静态永久性变形(黑)

Fig. 5 East-West Dynamic Displacements of JA01, USUD and the Static Offset After the Mw 9.0 Main Shock and the Mw 7.9 Strong Aftershock

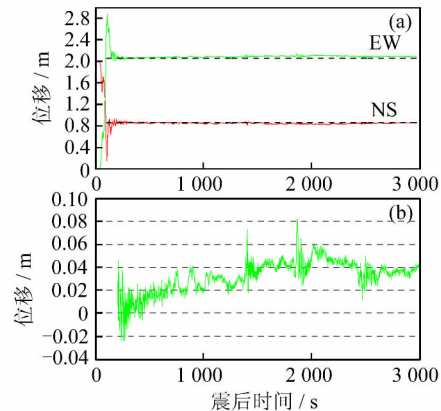


图 6 MIZU 东西分量(绿)和南北(红)分量动态位移、静态永久性变形(黑),以及 MIZU 东西分量动态位移减去利用本文方法估计的静态永久性变形之差(震后 190 s 开始)

Fig. 6 Dynamic Displacements of MIZU Station and the East-West Dynamic Displacements of MIZU After Subtracted the Static Offset