

文章编号:1671-8860(2009)11-1340-04

文献标志码:A

# 基于 PPP 动态定位技术的同震地表形变分析

方荣新<sup>1,2</sup> 施 闯<sup>1,2</sup> 辜声峰<sup>1,2</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**利用 PPP 动态定位技术对地震时期的 GPS 观测数据进行处理,获得了各测站瞬时的地震地表形变信息。为了削弱 PPP 定位结果中残留的具有时空相关性的系统误差,采用空间叠加法和恒星日滤波法对 PPP 定位结果进行了后处理。为了验证两种方法在地震形变监测处理中的有效性,分别对美国圣西蒙地震和汶川地震的 GPS 观测数据进行了分析,实验结果表明,两种方法均能有效地削弱 PPP 动态定位中残留的系统误差,从而能更准确地提取地震形变信息。

**关键词:**精密单点定位;空间叠加;恒星日滤波;地震形变;PANDA

**中图法分类号:**P228.42; P227

GPS 定位精度的提高以及高采样率 GPS 接收机的出现使得 GPS 成为监测瞬时地壳运动的有效手段之一,对以记录速度和加速度的地震仪起到了重要的补充作用<sup>[1-3]</sup>。目前,国外几大主要的高精度 GPS 数据处理软件都具有动态定位的功能模块,如 GAMIT 软件的 TRACK 模块采用差分的方式求解动态定位,而 Bernese 和 GIPSY 软件采用非差 PPP 模块进行动态定位。在国内,武汉大学自主研发的 PANDA 软件拥有高精度的定轨和定位功能,其动态定位也采用非差 PPP 模式<sup>[4-6]</sup>。PPP 定位相对于差分定位,无需基准站,并且定位结果直接反映出点位变化,是监测瞬时地壳运动的一种有效方法,然而,PPP 目前的不足是定位精度还不能完全满足高精度的形变监测。为了进一步提高 PPP 的定位精度,获得更优的定位结果,需要削弱 PPP 定位结果中残留的系统误差。本文采用空间叠加法和恒星日滤波法对 PPP 定位结果进行了后处理,从而更好地提取地震形变信息。

## 1 数据处理方法与策略

### 1.1 空间叠加法

空间叠加法的思想是先对静态基准站进行

PPP 动态定位,提取动态定位的点位偏差来建立误差改正模型,然后将该模型改正到发生地震形变的监测站点。具体流程如下。

1) 选取静态站为基准站,基准站的个数可根据实际情况来确定,没有严格的限制要求。对选取的基准站分别进行 PPP 动态定位,与静态坐标进行比较,获得 PPP 动态定位的点位偏差。然后将动态定位的点位偏差结果进行低通滤波去除高频频的随机噪声。

2) 构建误差改正模型。假设基准站的个数为  $i$ ,采用 PPP 定位后获得的定位偏差分别为  $V_1, V_2, \dots, V_i$ ,因此构建的误差改正模型  $V$  可用如下公式计算:

$$V = \sum_{n=1}^i (w_i \cdot V_i) / \sum_{n=1}^i w_i \quad (1)$$

其中,  $w_i$  为第  $i$  个基准站在建立模型时使用的权值。

3) 将监测站的 PPP 动态定位结果利用获得的误差改正模型进行修正。

### 1.2 恒星日滤波法

GPS 卫星轨道的重复周期理论上为一个恒星日(23 h 56 m 4 s),因此,由卫星轨道以及接收机环境产生的误差(主要是多路径误差),其重复周期也为一个恒星日。恒星日滤波法就是利用误

差的恒星日重复性, 通过滤波叠加的方法来削弱多路径误差的影响。通过对 GPS 卫星轨道运动周期的计算发现, GPS 卫星轨道的运动周期并非正好为一个恒星日, 并且各颗卫星的运动周期不完全相同, 在此基础上, Choi 等<sup>[7]</sup>提出了改进的恒星日滤波法, 即通过计算各颗卫星的准确运动周期, 取其平均值作为恒星日周期。恒星日滤波法的具体流程如下。

1) 先对监测站连续多天的 GPS 观测数据进行 PPP 动态定位, 将前几天的定位点位偏差序列进行低通滤波, 消除高频随机噪声的影响。

2) 对前几天经过低通滤波后的数据根据改进的恒星日周期进行等权叠加, 叠加方法见式(1), 根据获得的叠加结果构建多路径误差改正模型。

3) 利用构建的多路径误差模型改正到下一天, 可获得经过多路径改正后的 PPP 动态定位恒星日滤波结果。

## 2 算例分析

本文采用圣西蒙(San Simeon)地震与汶川地震期间附近区域 GPS 观测站的高频采样数据(采样率为 1 Hz)进行测试验证。各测站的 PPP 动态定位结果均采用 PANDA 软件解算获得。

圣西蒙地震期间的 GPS 观测数据是从 MIT 的 GAMIT 软件 TRACK 模块的示例网站上获得的([http://geoweb.mit.edu/~tah/trach\\_exam-ple/](http://geoweb.mit.edu/~tah/trach_exam-ple/)), 由于从该网站只能下载到地震时期的数据, 而没有连续几天的观测数据, 故本算例采用空间叠加法进行后处理。

汶川地震期间的 GPS 观测数据是采用国内某台站地震前后连续几天的观测数据, 且由于汶川地震震级太大, 很难在监测区域内找到静止的基准站, 因此本算例采用恒星日滤波法进行后处理。

### 2.1 圣西蒙 6.5 级地震 GPS 数据处理与分析

2003 年 12 月 22 日, 美国加州中部圣西蒙地区发生 6.5 级地震(UTC 时间为 19:15), 震源深度约为 7.6 km。本算例共选用地震附近区域 6 个测站的数据用于分析计算, 分别是 lows、masw、pomm、rnch、pin1 及 trak 站。各测站的 GPS 数据观测时长均为 1 h(UTC 时间为 19:00 至 20:00), 其采样率为 1 Hz。

#### 2.1.1 PPP 结果

首先利用 PANDA 软件的 PPP 模块对 6 个观测站进行 PPP 动态定位, 获得各测站的瞬时位置坐标, 同时将瞬时位置坐标与各测站震前的静

态坐标进行比较, 获得各 PPP 动态定位的坐标点位偏差时间序列。图 1(a)为 6 个测站 E 方向的点位偏差时序图。为了更清晰地显示各个测站的 PPP 定位点位偏差, 图 1(b)绘出了离震中较近并受地震影响的 4 个测站的结果。可以看出, 在历元为 1 000 s 附近有地震形变信息, 但是由于 PPP 动态定位误差引起的点位偏差较大, 使得地震引起的振幅在图中表现不太明显。

从图 1(a)发现, 6 个测站的 PPP 定位点位偏差具有很好的重合度, 说明在该区域中, 它们具有很强的空间相关性, 因此提出采用空间叠加法对 PPP 定位结果进行后处理, 消除与测站相关的误差, 进一步提高 PPP 动态定位的精度。

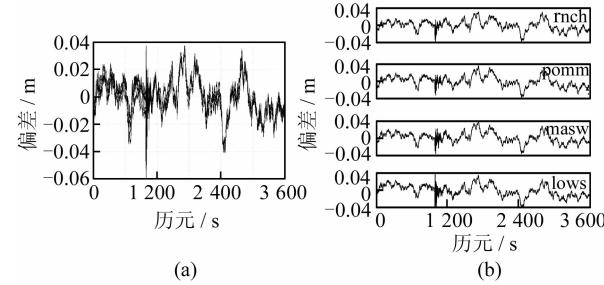


图 1 PPP 定位点位偏差时序图(E 方向)

Fig. 1 Time Series of Displacement with PPP Solution

#### 2.1.2 空间叠加法后处理结果

因为 trak 站和 pin1 站离震中较远, 几乎未受到地震的影响, 因此选用 trak 站和 pin1 站作为基准站。首先将两个测站的 PPP 动态定位的点位偏差结果进行低通滤波, 去除高频的随机噪声, 采用滑动窗口大小为 7 个历元的移动平均滤波进行处理<sup>[8]</sup>, 如图 2(a)和 2(b)所示, 然后利用式(1)构建误差改正模型, 这里采用等权处理。将获得的误差改正模型与其他监测站的定位结果进行叠加, 将图 2(a)的误差模型改正到图 1(b)所示的测站上, 得到改正后的结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 通过空间叠加法处理后, PPP 定位的噪声被有效地削弱, 使得测站地震形变信息更加明显地显示出来。将图 3 中发生地震形变的部分进行放大, 如图 4 所示, 可以清晰地看出地震时期测站的瞬时同震形变。

为了说明 Stacking 方法的改正效果, 将经过 Stacking 法处理的结果与利用 GAMIT 软件的解算结果进行比较分析。首先以 trak 站作为参考站分别组成 trak-lows、trak-masw、trak-pomm、trak-rnch 基线, 用 GAMIT 软件的 TRACK 模块进行动态解算, 获得各测站的点位偏差时间序列。将经过空间叠加后的 PPP 结果与 GAMIT 双差

解算结果进行比较,图5为masw站的比较结果,两者的差值均在5 mm内。

由以上分析可以看出,空间叠加法可以有效

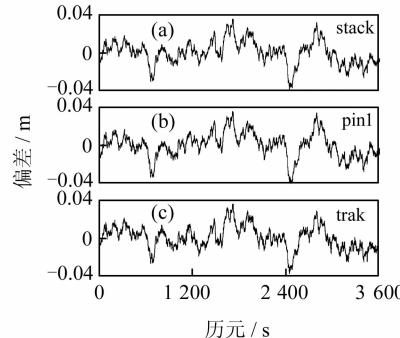


图2 空间叠加改正误差

Fig. 2 Common-mode Error Profile After Spatial Stacking

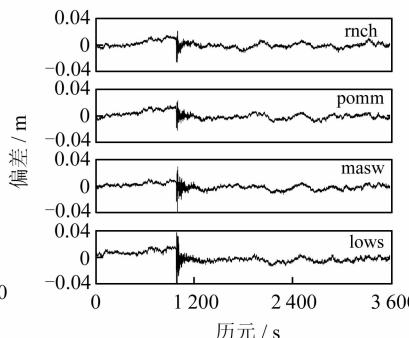


图3 空间叠加后的点位偏差时序图

Fig. 3 Time Series of Displacement After Spatial Stacking

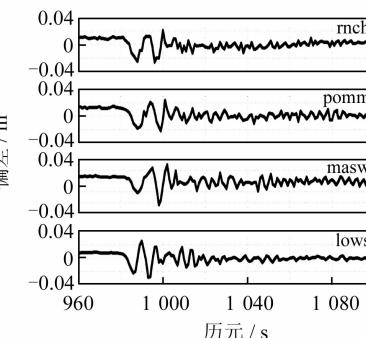


图4 测站同震变形位移

Fig. 4 Plots Showing the Seismic Deformation

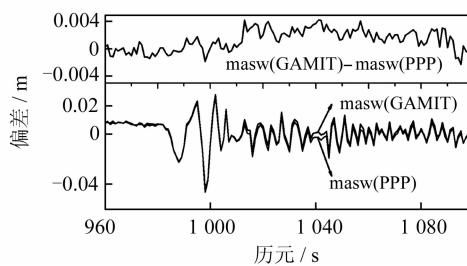


图5 masw站同震形变位移比较

Fig. 5 Comparison of the Seismic Deformation (masw)

## 2.2 汶川8.0级地震GPS数据处理与分析

### 2.2.1 PPP结果

北京时间2008年5月12日14时28分,四川汶川( $31.0^{\circ}\text{N}, 103.4^{\circ}\text{E}$ )发生了8.0级特大地震,震源深度约为14 km。用于分析的数据为国内某GPS台站连续3 d的观测数据,采样率为1 Hz,年积日分别为131 d、132 d、133 d,其中133 d为地震发生日(5月12日)。首先采用PANDA软件进行PPP动态定位,获得单天解的瞬时定位坐标结果,同时将瞬时位置坐标与各测站震前的静态坐标进行比较,获得PPP动态定位的坐标点位偏差时间序列。图6分别为年积日131 d、132 d、133 d E方向的点位偏差时序图,图6(c)中跳变的地方即为地震形变信息。从图6可以看出,PPP动态定位的定位偏差较大,并且连续三天的点位坐标偏差具有很好的多天重复性,经分析主要是由多路径误差引起的。

### 2.2.2 恒星日滤波法后处理结果

通过计算,求得本算例的平均恒星日周期为23 h 55 m 55 s。根据恒星日滤波法的处理流程,对图6中的数据进行处理,首先对131 d、132 d的

地削弱PPP动态定位结果中与测站相关的误差,并且处理后的结果与直接采用双差模式计算的结果一致。

PPP动态定位的点位偏差时间序列进行低通滤波,本算例采用滑动窗口大小为7个历程的移动平均滤波来消除高频的随机噪声<sup>[8]</sup>。然后对经过低通滤波后的数据根据改进的恒星日周期进行等权叠加,叠加结果如图7(a)所示。将获得的叠加结果作为多路径误差改正模型。将获得的模型改正到133 d的PPP动态定位结果中。图7(b)为年积日133 d未进行恒星日滤波的PPP定位结果,其RMS值为3.5 cm;图7(c)为经过恒星日滤波法处理后的结果,其RMS值为1.0 cm,说明进行恒星日滤波后,定位结果得到明显的改善,多路径误差被有效地削弱。

为了清晰地描绘地震时期的同震形变,将图7(c)中发生地震形变的部分(标记处)进行放大显示,如图8所示。图8清晰地反映出地震时期的地表形变信息,为进一步研究地震机制提供了一定的参考,使得GPS处理的数据可以辅助地震仪进行地震形变分析。

## 3 结语

本文提出采用空间叠加法和恒星日滤波法对PPP动态定位的精度进行后处理,能有效地消除与测站相关的误差和多路径误差的影响,因此能进一步提高PPP动态定位的精度,更好地提取其他有用的瞬时形变信息(如地震信号)。值得注意的是,采用空间叠加法的前提是基准站与监测站之间的误差具有一定的空间相关性,因此,通常需要基准站与监测站在同一个区域网内来保证测站之间的误差相关性。而采用恒星日滤波法的前提

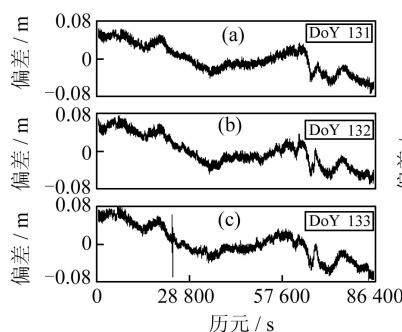


图 6 PPP 定位点位偏差时序图(E 方向)

Fig. 6 Time Series of Displacement with PPP Solution

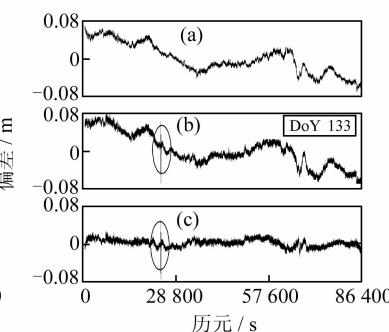


图 7 恒星日滤波法处理结果

Fig. 7 Result of Sidereal Filtering

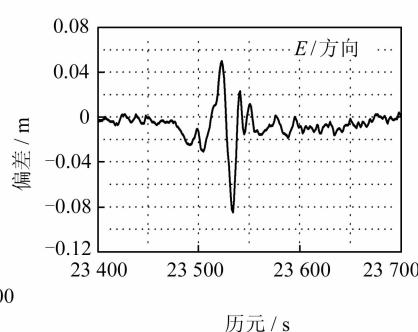


图 8 GPS 台站同震变形位移(E 方向)

Fig. 8 Plots Showing the Seismic Deformation

是需要单站的多天解结果具有很好的恒星日重复性。如果不存在空间相关性和恒星日重复性,采用上述两种方法将不能提高原有 PPP 动态定位的精度,甚至很可能会降低原有定位的精度。

致谢:感谢美国 MIT 授权使用 GAMIT 软件以及 MIT 网站提供的圣西门地震数据。

## 参 考 文 献

- [1] Larson K M, Bilich A, Axelrad P. Improving the Precision of High-rate GPS[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: B05422
- [2] Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. GPS Seismology: Application to the 2002 Mw 7.9 Denali Fault Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(2): 593-606
- [3] Emore G L, Haase J S, Choi K, et al. Recovering Seismic Displacements through Combined Use of 1 Hz GPS and Strong-Motion Accelerometers [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(2): 357-378
- [4] Liu Jingnan, Ge Maorong. PANDA Software and

Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination[J]. Wuhan University Journal of Natural Science, 2003, 8(2B): 603-609

- [5] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 用 PANDA 对 GPS 和 CHAMP 卫星精密定轨[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(2): 312-315
- [6] 耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 312-315
- [7] Choi K, Bilich A, Larson K M, et al. Modified Sidereal Filtering: Implications for High-rate GPS Positioning[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22): 226-233
- [8] Bilich A. Improving the Precision and Accuracy of Geodetic GPS: Applications to Multipath and Seismology [D]. Colorado: University of Colorado, 2006

第一作者简介:方荣新,博士生,研究方向为 GPS 数据处理及实时定位与导航。

E-mail: fangrongxin1006@163.com

## Precise Point Positioning with High-rate GPS Data Applied to Seismic Displacements Analysis

FANG Rongxin<sup>1,2</sup> SHI Chuang<sup>1,2</sup> GU Shengfeng<sup>1,2</sup>

(1) State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

(2) Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

**Abstract:** In order to obtain the displacements of observation points, high-rate GPS data sets are utilized to compute the positions epoch-by-epoch with precise point positioning (PPP) techni-