

基于 GPS 的日本 9.0 级地震地表形变监测研究^{*}

刘严萍¹, 王 勇², 胡小刚³, 郝晓光³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 河北省地震工程研究中心, 河北 唐山 063009;
3. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077)

摘 要: 利用 GAMIT/GLOBK 软件, 处理 IGS 跟踪站观测数据, 得到 2011 年 3 月 11 日的日本 9.0 级地震期间的地表变形序列。首先采用 GAMIT/GLOBK 软件得到 GPS 测站震前和震后的单天解坐标; 然后采用 TRACK 模块得到 GPS 测站的震时三维坐标时间序列动态变化。通过对 GPS 测站坐标序列进行分析和比较, 揭示了 GPS 测站的震时地表三维形变过程和震后地表永久性形变。

关键词: GPS; 地震; 同震位移; GAMIT/GLOBK; TRACK; 日本 9.0 级地震

中图分类号: X43; P315.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)04-0095-04

0 引言

利用 GPS 监测地震孕育及发生的过程是近年来的研究方向之一^[1-4]。2011 年 3 月 11 日日本东海岸附近海域(38.1°N, 142.6°E)发生 9.0 级地震, 此次地震引起永久性同震位移。近年来, 随着 GPS 处理精度提高, 利用 GPS 可以进行地表位移监测和地震分析, GPS 为地震学研究提供了一种新的途径。

本文拟利用 GAMIT/GLOBK 软件及 TRACK 模块处理日本境内 IGS GPS 数据, 得到震前震后各 GPS 测站的单天解坐标序列和震时动态坐标序列, 并对之分析研究 GPS 测站的震时地表三维形变过程和震后地表永久性形变。

1 基于 GPS 单天解的日本 9.0 级地震地表形变

为研究日本 9.0 级地震前后 GPS 测站的变化, 本节选择利用 GAMIT/GLOBK 软件 GPS 测站数据得到震前和震后的单天解坐标序列。数据时间为 2011 年第 001~090 日, 卫星星历为 IGS 精密星历, 解算模式为松弛解。GPS 数据有: 日本境内及

周边 IGS 站 LHAZ、SHAO、URUM、WUHN、KUNM、XIAN、AIRA、GUAO、KSMV、MIZU、MTKA、TSK2、TSKB、USUD、TNML、TWTF、KIT3, 针对 2011 年第 001~090 日相应时间段内记录的数据一并进行处理, 获得单天基线解。利用 GLOBK 对单日松弛解平差, 得到 ITRF2005 下的单日解, 即 GLOBK 的 NEU 坐标值。解算结果水平方向精度为 2~3 mm, 垂向精度为 5 mm 左右。

图 1 所示为 2011 年第 001~090 日的 GPS 测站单天解坐标序列, 其中黑色曲线代表东方向位移, 蓝色曲线代表北方向位移, 红色曲线为垂向位移。TSK2 与 TSKB 测站位置接近, 两者坐标变化一致, 因而图 1 只显示 TSK2 的变化。

由单天解坐标序列可见, 离震中较近的 IGS 测站均显示了日本大地震的变化, 同时含有周期性形变(表 1)。

以 TSK2 的东方向和 USUD 的高程方向为例, 3 月 5 日至 3 月 9 日的 TSK2 变化波动较大: 0.005 7 m, -0.023 m, 0.003 8 m, 0.004 95 m 和 0.021 43 m; USUD 在 3 月 5 日至 3 月 9 日的变化波动较大: -0.014 08 m, -0.004 34 m, -0.038 77 m, -0.011 9 m 和 -0.062 5 m。两测站在 3 月 9 日发生约 2 cm 和 5 cm 的变化, 此变化为日本东海岸在 3 月 9 日发生的 7.2 级地震(<http://www.iris.edu>);

^{*} 收稿日期: 2013-02-26 修回日期: 2013-04-21

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B061); 河北省教育厅项目(ZH2012060); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2013-5-5-E); 国家科技支撑计划课题(2011BAK07B01-04)

作者简介: 刘严萍(1979-), 女, 河南汝南人, 博士生, 讲师, 主要从事 GPS 应用研究。E-mail: liuxiaw@126.com

通讯作者: 王勇(1978-), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 主要从事 GPS 气象学、InSAR 大气校正研究。

E-mail: wangyongjz@126.com

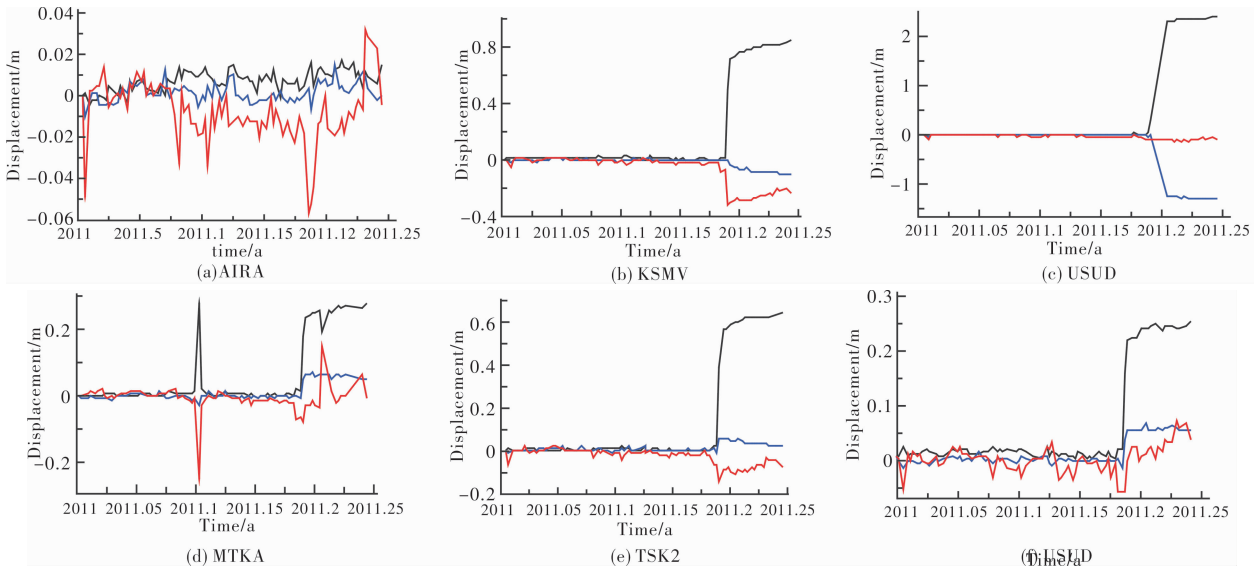


图1 GPS 测站单天解坐标序列

表 1 2011 年 3 月 3 日至 3 月 16 日的 IGS 测站坐标变化

时间	KSMV			MIZU			AIRA		
	N/m	E/m	U/m	N/m	E/m	U/m	N/m	E/m	U/m
3. 03	0. 00223	0. 0063	-0. 03642	-0. 00895	0. 00679	-0. 01877	-0. 00249	0. 00616	-0. 01171
3. 04	-0. 00188	0. 00527	-0. 02993	-0. 0058	0. 00588	-0. 03424	-0. 00084	0. 00621	-0. 01688
3. 05	-0. 0036	0. 00214	-0. 02639	-0. 00758	0. 0086	-0. 02629	-0. 00272	0. 00554	-0. 02201
3. 06	-0. 00005	0. 00318	-0. 01781	-0. 00478	0. 04978	-0. 00517	-0. 00059	0. 00817	-0. 01623
3. 07	-0. 00416	0. 00368	-0. 02292	-0. 00674	0. 00532	-0. 01842	-0. 00229	0. 0027	-0. 00979
3. 08	-0. 00208	0. 00129	-0. 02591	-0. 0071	0. 00496	-0. 02089	0. 00089	0. 0052	-0. 01793
3. 09	0. 00313	0. 01813	-0. 08352	-0. 0033	0. 03279	-0. 07173	0. 00386	0. 01259	-0. 05621
3. 10	-0. 01054	0. 01826	-0. 074	-0. 01867	0. 03686	-0. 08421	-0. 00636	0. 01628	-0. 05211
3. 11	-0. 00433	0. 50204	-0. 31531	0. 00302	0. 29143	-0. 08903	0. 00051	0. 00518	-0. 04424
3. 12	-0. 04352	0. 72227	-0. 30362	-	-	-	0. 00779	0. 01235	-0. 01364
3. 13	-0. 05502	0. 74008	-0. 29193	-	-	-	0. 00578	0. 01353	-0. 01198
3. 14	-0. 05093	0. 75556	-0. 26885	-	-	-	0. 00821	0. 01049	0. 00057
3. 15	-0. 07163	0. 76392	-0. 29125	-	-	-	0. 00521	0. 01032	-0. 01497
3. 16	-0. 06959	0. 77386	-0. 28975	-1. 24046	2. 29425	-0. 10073	0. 00619	0. 00926	-0. 01799
	USUD			TSK2			MTKA		
	N/m	E/m	U/m	N/m	E/m	U/m	N/m	E/m	U/m
3. 03	-0. 00722	0. 00914	-0. 02131	0. 0024	0. 00389	-0. 02422	-0. 00554	-0. 00112	-0. 01802
3. 04	-0. 00579	0. 00497	-0. 02685	0. 00247	0. 00195	-0. 01721	-0. 00456	-0. 00001	-0. 02138
3. 05	-0. 00532	0. 00162	-0. 01408	0. 00195	0. 00262	-0. 01759	-0. 00495	0. 00105	-0. 01866
3. 06	-0. 00396	0. 00892	-0. 00434	0. 00683	0. 00566	-0. 0037	-0. 0016	0. 0077	-0. 01425
3. 07	-0. 00674	-0. 00022	-0. 03877	0. 00214	0. 00145	-0. 01988	-0. 00696	0. 00167	-0. 02614
3. 08	-0. 00865	-0. 00375	-0. 0119	0. 00353	0. 0012	-0. 01958	-0. 00507	0. 00096	-0. 02267
3. 09	-0. 00476	0. 01345	-0. 0625	0. 00706	0. 01804	-0. 06895	-0. 00030	0. 01814	-0. 07358
3. 10	-0. 01864	0. 01235	-0. 06491	-0. 00551	0. 01728	-0. 06357	-0. 01277	0. 01582	-0. 06747
3. 11	0. 03262	0. 15467	-0. 06525	0. 05757	0. 38679	-0. 14504	0. 04575	0. 17958	-0. 08252
3. 12	0. 05027	0. 21194	-0. 00777	0. 05694	0. 56608	-0. 08639	0. 06227	0. 23329	-0. 03261
3. 13	0. 04858	0. 21653	0. 02033	0. 05123	0. 57125	-0. 0903	0. 06045	0. 24232	-0. 02764
3. 14	0. 04971	0. 21685	0. 01864	0. 05316	0. 5789	-0. 07485	0. 06777	0. 24653	-0. 01597
3. 15	0. 04713	0. 22624	-0. 00624	0. 04389	0. 59045	-0. 09479	0. 05866	0. 25235	-0. 0331
3. 16	0. 04921	0. 23326	0. 00038	0. 04353	0. 59827	-0. 10537	0. 06053	0. 25892	-0. 03918

而TSKB测站在3月5日至7日发生向西1.8 cm和向东2 cm的变化,USUD测站在3月5日至7日发生上升1 cm和下沉3.4 cm的变化,该时间段内日本境内无地震发生,此变化可能为地震前兆。

2 地震当日(UTC 0:00-24:00)日本IGS测站的动态位移

TRACK模块处理长距离动态GPS数据可以监测动态地壳形变和进行短临地震预报。该模块解算GPS观测数据可以得到震后位移特征,且有效探测主震发生时间。

TRACK是麻省理工学院开发的长距离动态GPS数据处理软件,其作为GAMIT/GLOBK软件包中的一个模块发布。整周模糊度的快速分解是长距离动态GPS数据处理的关键,对此,TRACK利用MW-WL观测量进行宽巷模糊度分解,而后反求L1和L2模糊度。TRACK中采用IGS数据中心提供的精密钟差和星历来消除卫星钟差和轨道误差;采用电离层模型消除电离层延迟的影响^[5-6]。

我们用TRACK对该次地震时的GPS数据进行了处理和分析,为便于比较,采用了7个测站的数据,采样率为30 s,观测时间为24 h,起始历元为00 h:00 m:00 s。TRACK处理时SHAO代表基准站,AIRA、MTKA、TSK2、KSMV、MIZU、USUD等测站作为流动站。利用GAMIT软件中的TRACK模块来处理长距离动态GPS数据,结合2011年3月11日的日本IGS GPS观测数据,获得GPS动态位移序列。以MIZU、USUD、TSK2为例,绘制GPS动态位移序列(图2)。

日本MIZU(震中距173 km)、TSK2(震中距316 km)、USUD(震中距436 km)三个IGS测站,因距震中较近,均较完整地记录了当天地表位移过程,该过程包括了UTC 5:46发生的9.0级主震和UTC 6:25发生的7.3级余震引起的短时间震后位移^[2]。

MIZU测站于3月11日日GPS时间5:59:30数据中断,该测站向东南方向运动,向东和向南最大位移量分别达到2.25 m和1.22 m;USUD测站向东和向北位移分别为0.14 m和0.05 m;

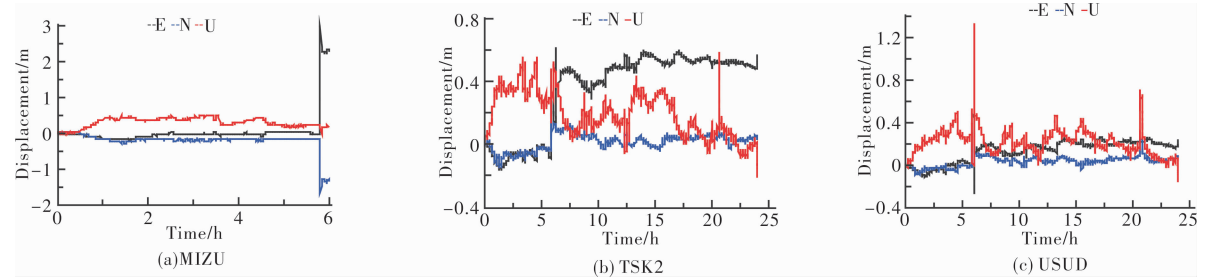


图2 GPS测站动态位移

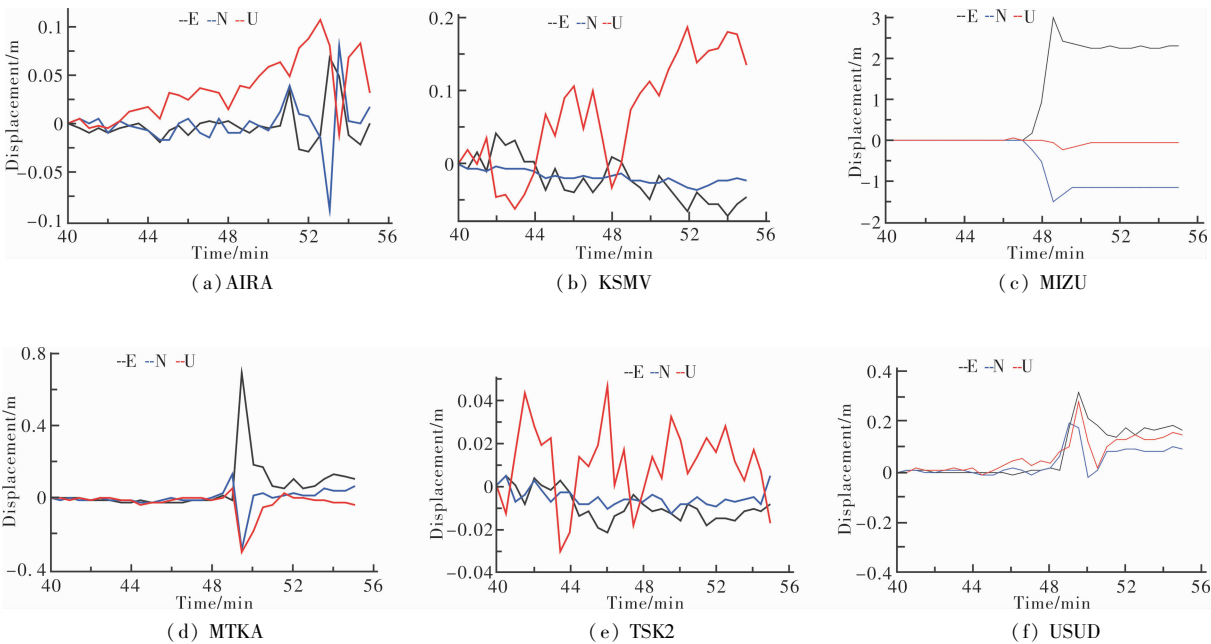


图3 GPS监测主震同震位移

TSKB、TSK2 测站的向东位移分别为 0.41 m、0.37 m，向北位移均为 0.06 m；MTKA 测站向东移动 0.16 m，向北移动 0.06 m；KSMV 测站向东移动 0.48 m；AIRA 测站在此次地震过程期间没有发生大的移动。

根据一些研究机构提供的震源机制解和地震波形反演均表明此次地震是一次低倾角逆冲型地震，该地震造成一定范围内地壳垂向运动。其中距震中较近的 KSMV、TSK2、TSKB 测站的震时垂向位移量分别为 -0.24 m、-0.08 m 和 -0.08 m。

3 GPS 监测主震同震位移

基于 TRACK 模块处理 IGS GPS 数据可以直接获得测站地表的真实位移，捕获强震时复杂的地表运动时序。图 3 所示为地震发生前后 (UTC5: 40 - 5: 56) GPS 监测的大地震同震位移。

从图 3 中可以看出：地震发生后，距离震中最近的 MIZU 站最先感知，随后地震波传至其他各站。各站各分量在地震到时均有不同程度震动，其震动大小主要取决于震中距及地震带的破裂方向。

图 3 中坐标原点为震前各测站的初始位置，地震波（尤其是横向剪切波）到达时测站开始朝东南方向发生剧烈抖动，其中 MIZU 站东向最大位移 3 m、南向最大位移 1.7 m 左右；随着地震波的衰减，测站位置回弹至终点位。相对于 MIZU 站，USUD 站位移量级较小，图 3 说明强震已造成这些测站永久性位移，其中 MIZU 站向南偏移 1.14 m，向东偏移 2.26 m，垂向下沉约 0.06 m；USUD 站向北偏移 0.09 m，向东偏移 0.17 m，垂向沉降 0.14 m 左右。其他测站也呈向东漂移和沉降趋势，

在一定程度上反映强震造成日本所在的板块整体朝东运动，并略有沉降。

4 结论

本文以日本 2011 年 3 月 11 日大地震为例，通过 GAMIT/GLOBK 软件和 TRACK 模块获得了 IGS GPS 测站的单天解坐标序列和地震发生当日的动态位移，对各测站的动态位移进行了分析。MIZU 测站向东南方向运动，向东、向南最大位移量分别达到 2.26 m、1.22 m；USUD 测站向东、向北位移分别为 0.14 m、0.05 m；TSK2 测站的向东位移为 0.37 m，向北位移为 0.06 m；MTKA 测站向东移动 0.16 m，向北移动 0.06 m；KSMV 测站向东移动 0.48 m；AIRA 测站在此次地震过程期间基本没有大的移动。

参考文献：

- [1] 范士杰, 刘焱雄, 王振杰. 日本 3. 11 特大地震的 GPS 震时和震后响应 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37 (2): 191 - 194.
- [2] 邵志刚, 武艳强, 江在森, 等. 基于 GPS 观测分析日本 9. 0 级地震同震位错与近场形变特征 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (9): 2243 - 2249.
- [3] 张风霜, 占伟, 孙东颖. 2011 年日本 9.0 级地震前后 GPS 基线时间序列分析 [J]. 地震研究, 2012, 35 (2): 191 - 200.
- [4] 张小红, 郭斐, 郭博峰, 等. 利用高频 GPS 进行地表同震位移监测及震相识别 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (6): 1912 - 1918.
- [5] 吴继忠, 吴文坛. 利用高频 GPS 进行地震动态变形分析及地震定位 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32 (2): 20 - 23.
- [6] 占伟, 刘志广, 苏建锋, 等. GNSS 流动观测水平速度精度评估 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31 (5): 84 - 87.

Monitoring Coseismic Displacement of Japan Mw9.0 with GPS

Liu Yanping¹, Wang Yong², Hu Xiaogang³ and Hao Xiaoguang³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hebei Researching Center of Earthquake Engineering, Tangshan 063009, China; 3. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: By using GAMIT/GLOBK software, the coseismic surface movement information is extracted from IGS stations data located in Japan. Firstly, using GAMIT/GLOBK, this paper obtained the pre-seismic and post-seismic three dimensional coordinate in 24 hours solution of GPS sites. Then, the coseismic three dimensional coordinate time series is achieved using Track model. Based on the GPS coordinate time series, it reveals the coseismic surface movement process and post-seismic permanent deformation of GPS sites.

Key words: GPS; earthquake; coseismic displacement; GAMIT/GLOBK; TRACK; Japan Mw9.0 Earthquake