

2011年日本 M_w 9.0 级地震的 GPS 响应研究

刘焱雄^{1,2}, 范士杰^{1,2,3}, 乔方利¹, 周兴华¹, 张健¹

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 3. 中国石油大学 (华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555)

摘要: 2011年3月11日日本宫城县以东太平洋海域发生 M_w 9.0 级特大地震, 造成了地表的严重错位并引发海啸。文中利用位于日本及周边国家的 IGS 站和国家海洋局 GPS 业务站观测数据, 采用作者研制的精密单点定位 (PPP) 软件 UniP, 对此次地震的 GPS 数据响应进行了研究。结果表明: (1) GPS 观测数据能清晰、连续地记录震时地表形变的过程, 我国 CHAN, NCST 等站点水平方向的震时最大位移在 10 cm 以内, 高程方向的震时最大位移在 15 cm 以内, 且形变以可恢复性的弹性形变为主。(2) 我国距震中较远, 受此次日本地震的影响较小, 且大部分站点是在东坐标方向出现不同程度的震后永久性位移。其中 CHAN 站点的震后位移最为明显, 东向形变量为 (1.8 ± 0.11) cm; NCST、NLHT 站点次之, 东向形变量分别为 (1.1 ± 0.26) cm 和 (1.0 ± 0.18) cm。(3) 地震波传输到国家海洋局 GPS 业务站 NCST、NLHT 等的时间约为 10 min, 比海啸在深海的传播速度快约 14 倍, 可为海啸预警提供所需的时间差。这些结果显示 GPS 能够为地震监测和动力学特征研究提供有价值的基础资料, 也表明中国沿海 GPS 业务观测系统在海底地震监测、海啸预警服务中的应用潜力。

关键词: GPS; 地震; 精密单点定位; 地表形变; 海啸预警

中图分类号: P731.235

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2012)06-0059-07

1 引言

2011年3月11日 UTC 5 时 46 分 23 秒, 日本宫城县以东的太平洋海域 (38.1°N , 142.6°E) 发生海底地震, 震中距离东京 382 km, 震级高达 M_w 9.0 级, 震源深度约 20 km。地震引发了海啸、火灾和核泄漏事故。此次地震导致日本东北地区部分城市遭受毁灭性破坏, 也使周边地区和海洋受到核辐射污染, 引起世界各国的高度关注。

利用 GPS 监测地震孕育及发生过程是近年来的活跃研究方向之一。国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络项目组”曾利用采样率为 30 s 的

GPS 数据计算了 2008 年汶川 M_w 8.0 级地震的大区域范围内中、远场同震位移场^[1], 殷海涛等^[2]则利用高频 (1 Hz) GPS 观测数据获取了汶川地震的震时近场地表动态形变过程。2011 年日本地震发生后, ARIA 研究团队、GPS Solutions、美国阿拉斯加大学、加拿大新不伦瑞克大学、日本东北大学、武汉大学等对日本境内的 GPS 站点数据进行了快速处理, 其数据解算结果被国际地质灾害研究门户网站刊登 (<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>)。王敏等利用国家重大科技基础设施项目“中国大陆构造环境监测网络”的 GPS 观测资料, 计算了日本地震对中国大陆构造形变场的同震

收稿日期: 2011-08-30; 修订日期: 2012-04-18。

基金项目: 国家“863”计划 (2009AA12Z127); 国家海洋局 GNSS 业务运行项目。

作者简介: 刘焱雄 (1968—), 湖北省鄂州人, 研究员, 博士, 主要从事卫星精密定位、GPS 气象学、海洋测绘研究工作。E-mail: yxliu@fia.org.cn

影响^[3]。上述成果对于地震监测和动力学特征研究以及抗震救灾等都具有十分重要的意义。

国际 GNSS(Global Navigation Satellite System)服务组织(简称 IGS)在全球布设了很多 GPS 连续运行跟踪站(简称 IGS 站),为世界范围内的地球动力学、地球物理学等多学科的科学提供多种数据和产品支持。2009 年国家海洋局在中国沿海布设了 56 个连续运行 GPS 站,其中在黄海、渤海沿岸布设了 16 个站,为海面变化监测、灾害海洋天气的监测与预报、海底和近岸地震监测等提供了新的数据来源^[4]。上述 GPS 站在此次日本地震发生期间保持了连续的观测,及时记录了震前、震时和震后的原始观测数据信息,为研究地震波传播、动态的地表破裂过程以及地震动力学特征等提供了可靠的基础资料。本文选用日本及周边国家的部分 IGS 站和国家海洋局 GPS 业务站数据,基于精密单点定位(PPP)和相对定位方法,采用我们研制的 UniP 软件和 GAMIT/TRACK 模块,提取了地震发生时近、远场同震地表形变信息,监测地震发生前后 GPS 站址的位置变异,挖掘 GPS 站点在地震发生前后的数据响应,并探索 GPS 技术在海底地震监测、海啸预警等研究中的应用。

2 GPS 站点选择

为了获得此次地震的近、远场同震位移信息,揭示地震引起的地表瞬时位移和震后地表形变,本文选取位于日本且距震中较近的 3 个 IGS 站 MIZU, TSK2 和 USUD,韩国境内的 1 个 IGS 站 DAEJ,中国东部地区的 4 个 IGS 站 CHAN, BJFS, SHAO 和 WUHN,以及 6 个国家海洋局 GPS 业务观测站 NCST, NLHT, NZFD, NQHD, NXMD 和 SXSA,各 GPS 站点与震源位置的分布如图 1 所示, GPS 站点至震中的距离见表 1。

表 1 GPS 站至震中的距离(单位: km)

IGS 站	震中距	GPS 站	震中距
MIZU	173	WUHN	2 703
TSK2	316	NCST	1 750
USUD	436	NLHT	1 819
DAEJ	1 362	NZFD	1 857
CHAN	1 572	NQHD	1 919
SHAO	2 099	NXMD	1 975
BJFS	2 307	SXSA	3 729



图 1 GPS 站点分布

3 数据处理方法

本文采用动态定位和静态定位两种模式,对上述 GPS 站点的观测数据进行处理。

3.1 动态定位模式

在动态定位模式中,采用 UniP 软件的动态 PPP 模块^[5],对地震发生当日上述 GPS 站的观测数据进行处理,逐历元计算站点的三维地心坐标,以反映各站点震时三维运动过程。为了更加直观的描述 GPS 站点位置的变化,以 GPS 观测站的震前已知坐标为原点,将本文计算得到的 GPS 站点三维地心坐标(X, Y, Z)转换为站心坐标(N, E, U)。

动态 PPP 模式的数据处理策略:基于传统的双频无线电层组合非差观测模型,消除电离层一阶项的折射影响;采用 IGS 精密星历和卫星钟差;接收机钟差参数作为白噪声处理,每一个历元设置一个独立的钟差改正参数;GPS 天顶静水力学延迟利用经验模型(如 Saastamoinen 模型)估算,而 GPS 天顶湿延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)分量则作为待估参数,并利用随机游走过程模拟 ZWD 的动态变化,附加参数的动态噪声约束^[6];映射函数采用 GMF 模型^[7];考虑水汽分布的不均匀性,引入大气水平梯度改正参数^[8](北向分量 G_N 和东向分量 G_E);同时考虑接收机天线

相位中心偏差、卫星天线相位中心偏差、相对论效应、地球自转改正、固体潮、海洋负荷等误差影响。最后采用序贯最小二乘法逐历元进行参数估计,得到各个估计参数的动态PPP解。

为了验证UniP的计算结果,采用GAMIT/GLOBK软件中的TRACK运动学分析模块(1.24版)^[9]处理了同期数据。TRACK模块的数据处理策略:选择一个稳固且坐标精确已知的基准站,基于GPS相对定位的双差观测模型,消除接收机钟差、卫星钟差影响;卫星星历采用IGS精密星历;采用双频无电离层组合方法消除电离层一阶项的折射影响;对流层天顶延迟改正采用GPT模型^[10];映射函数采用GMF模型^[8];采用全球海潮模型FES2004^[11]改正海潮引发的测站地壳形变,并同时考虑海潮导致的地球质心变化。最后采用卡尔曼滤波法逐历元进行参数估计,得到流动站接收机相对于基准站的相对位置。

3.2 静态定位模式

在静态定位模式中,采用UniP软件的静态PPP模块,对上述GPS站每天24h的连续观测数据进行处理,计算出各站点的单天解坐标。静态PPP模式的数据处理策略与动态PPP模式的不同之处在于:测站接收机坐标参数作为常未知数处理,采用序贯最小二乘法或卡尔曼滤波法,对一天24h的连续观测数据进行逐历元参数估计,即可得到接收机三维坐标的PPP单天解,其结果与基于双差相对定位模型的多点网解具有等价性^[12]。

4 地震的GPS响应及其结果分析

基于上述数据处理策略,采用不同的数据处理软件和方法,对14个GPS站在地震发生前后的观测数据(采样率均为30s)进行了处理,分别提取GPS震时、震前和震后地表震动信息。通过对不同软件和方法解算结果的相互比对和校验,以确保GPS数据处理结果的准确性,真实地反映GPS对此次特大地震的数据响应。

4.1 震时地表形变

基于动态定位模式,采用UniP软件和GAMIT/TRACK模块,对地震发生当日上述GPS站点数据进行了处理,以提取GPS同震地表位移信息。在UniP软件中采用IGS事后精密星历和钟差进行动态PPP处理;GAMIT/TRACK模块中则采用IGU超快速预报星历进行实时计算。以MIZU,

TSK2为例,采用两种不同软件和方法,站点震时三维坐标时间序列如图2所示。

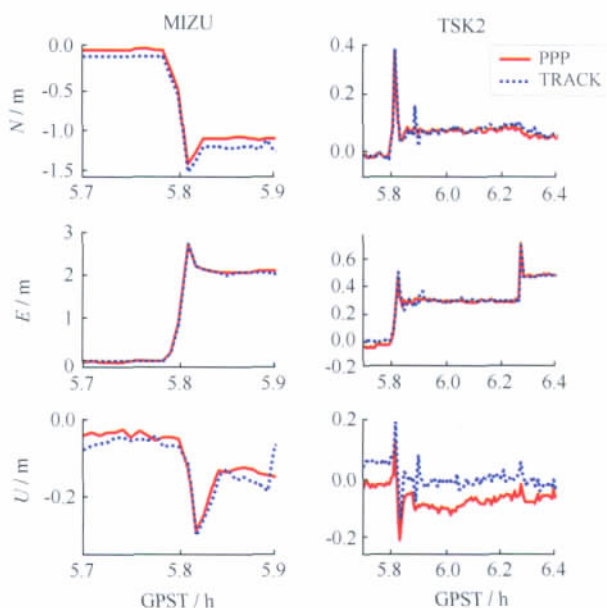


图2 GPS站点的震时三维坐标时间序列

由图2可知:UniP软件的PPP结果和GAMIT/TRACK模块动态定位的平面位置坐标基本一致,而高程方向出现明显的系统性影响。其原因是GAMIT/TRACK模块采用IGS站DAEJ作为基准点,地震发生时DAEJ的高程方向也发生了轻微变化。根据结果的残差显示,UniP软件的动态PPP结果优于GAMIT/TRACK模块动态定位结果。图2的比较也证明了我们研制的UniP软件具有较高的精度。

本文对MIZU,USUD等日本GPS站点的数据处理结果与国际地质灾害研究门户网站刊登(<http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>)的GPS研究成果是一致的,在此不予赘述。以中国IGS站和国家海洋局GPS业务站为主,研究此次日本地震对中国东北部地表位移的影响,分析其震时运动过程。以CHAN,SHAO,NCST,NLHT,NXMD,SXSA站点为例,各GPS站点的震时水平运动轨迹和高程时间序列如图3和图4所示。

由图3和图4可知:我国境内CHAN,SHAO,NCST等站点距震中较远,水平方向的震时最大位移在10cm以内,高程方向的震时最大位移在15cm以内,且形变以可恢复性的弹性形变为主,震后站点位置没有出现较大的变化,详见本文4.2节对震后地表永久性形变的分析。

利用 GPS 数据的动态定位结果,由站点位置的跳变可提取此次地震波传播到各站点的时间信息,

以各 GPS 站点出现东向最大位移量的历元时刻进行统计,结果见表 2。

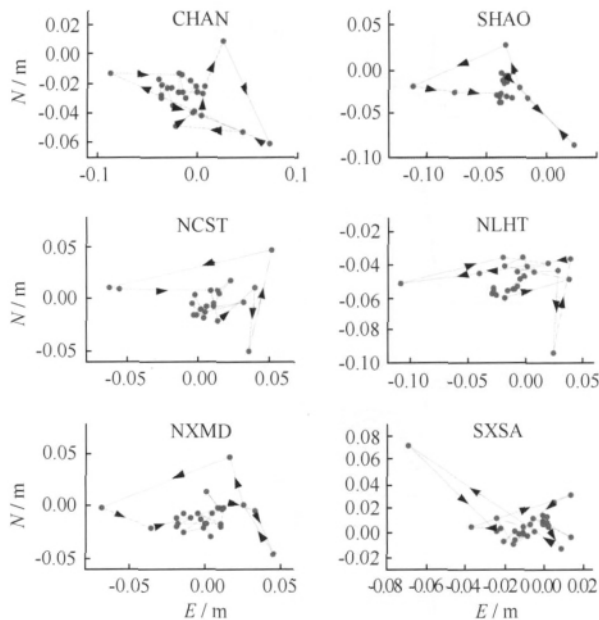


图 3 GPS 站点的震时水平运动轨迹

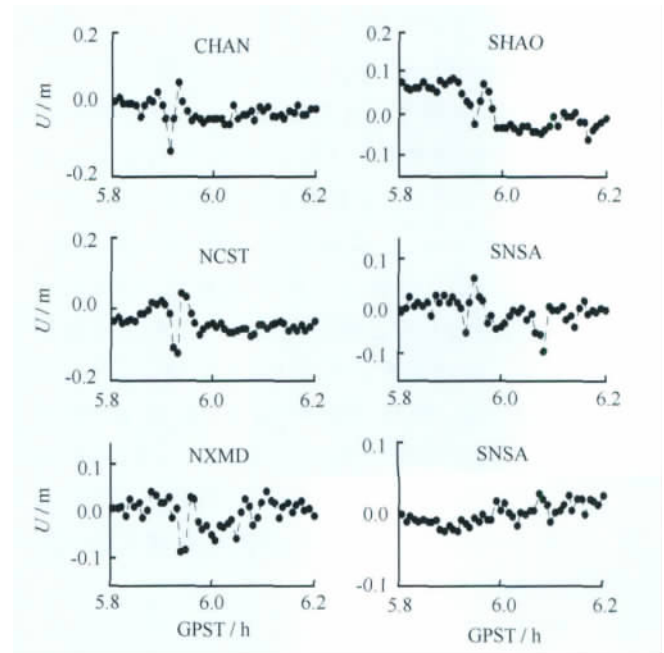


图 4 GPS 站点的震时高程时间序列

表 2 地震波传播到 GPS 站点的历元和传播时间

IGS 站	GPS 时	传播时间/min	GPS 站	GPS 时	传播时间/min
MIZU	5:48'30"	2.0	WUHN	6:00'00"	13.5
TSK2	5:49'30"	3.0	NCST	5:56'00"	9.5
USUD	5:49'30"	3.0	NLHT	5:56'30"	10.0
DAEJ	5:53'30"	7.0	NZFD	5:56'30"	10.0
CHAN	5:54'30"	8.0	NQHD	5:56'30"	10.0
SHAO	5:56'00"	9.5	NXMD	5:57'00"	10.5
BJFS	5:58'30"	12.0	SXSA	6:03'00"	16.5

由表 2 可知:此次地震波传播到国家海洋局黄海、渤海沿岸 GPS 业务站 NCST、NLHT 等的时间约为 10 min,由此可以推算出地震波的速度约为 3 000 m/s。海啸的传播速度为 $\sqrt{gh}$ (g 为重力加速度, h 为海洋的深度),在深度为 4 000 m 的海域,其传播速度接近 200 m/s,远远低于地震波的传播速度^[13-14],而且水深越浅、海啸的传播速度越慢。假设此次地震引起的海啸能直接传播到黄海、渤海,海啸波传播到 NCST、NLHT 等站点的时间需要 150 min 以上。由此可见,地震波的传播速度比海啸的速度快了 14 倍以上。

动态 PPP 模式处理 GPS 数据的速度很快,可

以近乎实时地计算各 GPS 站点的瞬时位置;如果 GPS 数据能够每秒钟回传到数据处理中心,计算时间不会超过 0.2 s,由此引起的时间延迟与海啸传播时间相比,可以不予考虑。所以,采用沿海实时的 GPS 观测数据,快速捕获海底地震信息,同时根据地震波与海啸传播的速度差异,完全可以利用这个时差对海啸做出预报和预警。

4.2 震后地表永久性形变

在正常状态下, GPS 站址较为稳定,几天之间的坐标应该完全一致。由于 GPS 观测中的偶然误差和数据处理中的计算误差与模型残差等因素的影响, GPS 单天解之间存在微小差异,经过多天平均

后,可以消减偶然误差和长周期项残差的影响,其结果更加接近真值、精度更高。以IGS站CHAN为例,站点单天解坐标(*N, E, U*)随时间的变化如图5所示(图中箭头所指为地震发生当日的单天解坐标);震前7 d的单天解坐标(*N, E, U*)的标准差为(1.4, 4.0, 2.1)mm, 7 d平均值的误差为(0.5, 1.5, 0.8)mm。正常情况下, *N*和*E*分量的精度应高于分量*U*, 这里发现*E*分量的精度较差, 甚至比*U*分量精度还低, 其原因应与此次日本地震有关。此次地震主要位移发生在*E*方向, 震前*E*方向就出现了

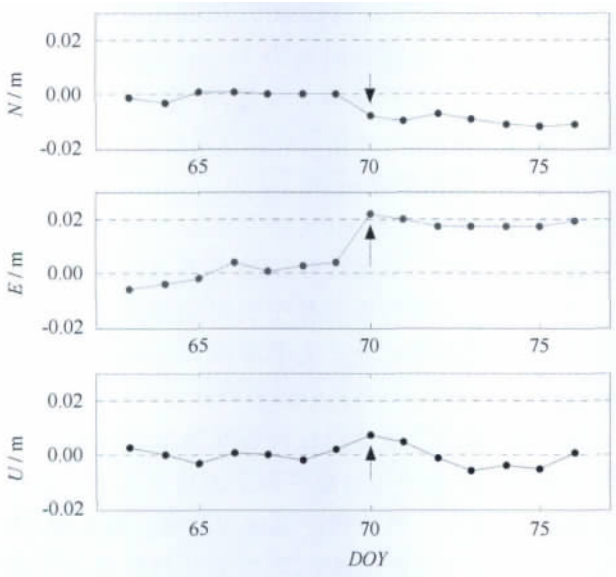


图5 CHAN 站点单天解坐标的变化

持续性缓慢移动, 单天解无法反映每天的动态变化, 导致精度下降; 从图5可以看出*E*坐标在震前就出现了明显的趋势性变化, 这正是导致震前7 d的*E*坐标的标准差较大的原因。同理可得震后7 d的单天解标准差和平均值误差分别为(1.8, 2.0, 5.0)mm和(0.7, 0.8, 1.9)mm。由此可知: 震前、震后7 d平均值的误差均优于2 mm, 比单天解的准确度更高。因此, 为了更加精确地反映各GPS站点的震后形变, 分别将震前7 d和震后7 d单天解的平均值作为震前、震后的位置。

为分析地震造成的各GPS站点的震后地表永久性形变(包含地表同震形变和破裂断层震后滑移信息), 基于静态定位模式, 采用UniP软件, 对中国部分GPS站观测数据进行了统一处理。震前7 d为3月4—10日(DOY: 063~069), 震后7 d为3月11—17日(DOY: 070~076); 考虑地震造成GPS站点位置的可能偏移, 会影响GPS静态定位的精度, 因此3月11日(DOY: 070)的数据只采用UTC 06'00"—24:00'00"时间段(地震发生于3月11日UTC05:46'23")^[3]。以天为单位, 首先计算出各站点的单天解坐标, 然后将震前7 d和震后7 d的单天解坐标取平均值, 作为各GPS站点的震前和震后位置坐标; 最后根据震前和震后平均坐标的变化, 来描述震后各GPS站点位置的永久性形变信息, 并按照误差传播定律计算其标准差, 结果统计见表3。

表3 震后GPS站点的坐标变化(m)

站点名	ΔN	ΔE	ΔU	STD_ΔN	STD_ΔE	STD_ΔU
CHAN	-0.010	0.018	0.000	0.001 0	0.001 1	0.002 7
SHAO	0.001	-0.002	0.010	0.0018	0.002 7	0.003 2
BJFS	-0.001	0.005	0.002	0.0013	0.001 2	0.002 2
WUHN	0.001	-0.003	0.003	0.0013	0.002 0	0.003 6
NCST	0.000	0.011	-0.004	0.0015	0.002 6	0.002 7
NLHT	-0.003	0.010	0.006	0.0010	0.001 8	0.003 8
NZFD	-0.001	0.007	0.006	0.0020	0.002 6	0.003 5
NQHD	-0.002	0.007	0.002	0.0011	0.001 9	0.002 4
NXMD	-0.002	0.005	0.001	0.0014	0.001 9	0.002 7
SXSA	-0.001	-0.007	0.010	0.0011	0.001 7	0.002 7

对表3中数据进行分析可知:

(1)我国距震中较远, 受此次日本地震的影响较小, 且大部分站点是在东坐标方向出现不同程度的

震后永久性位移。其中CHAN震后位移最为明显, 东向形变量为(1.8±0.11)cm; 国家海洋局GPS业务站NCST和NLHT的东向形变量分别为(1.1±

0.26)cm 和 (1.0 ± 0.18) cm; BJFS, NZFD, NQHD, NXMD 等站点的东向形变量更小, 仅有几个毫米。

(2) SHAO 和 SXSA 站点在高程方向出现趋势性位移, 其形变量分别为 (1.0 ± 0.32) cm 和 (1.0 ± 0.27) cm。

(3) WUHN 站点震后没有出现明显的形变。

(4) SXSA 站远离震源, 应该不会产生明显形变, 表 3 中显示其高程方向出现 (1.0 ± 0.27) cm 的变化, 其原因应与站点观测墩的结构和周围环境有关。SXSA 站点采用的是屋顶钢架型观测墩, 其稳定性较基岩型观测墩差, 容易受到房屋沉降和外界震动的影响。SXSA 站点东方向 1 km 范围内当时正在兴建大型码头, 观测期间的站址变化应与此有关, 定量分析还需要进一步研究。

5 结论与建议

本文采用不同的软件和方法, 对 2011 年日本 $M_w 9.0$ 级地震的 GPS 数据响应进行研究, 提取并分析此次地震的震时地表形变过程、震后地表形变, 结果表明:

(1) GPS 动态定位结果详细地记录了同震地表位移信息, 精确地记载了地震发生时地表真实的运动过程。我国 CHAN, NCST 等站点水平方向的震时最大位移在 10 cm 以内, 高程方向的震时最大位移在 15 cm 以内, 且形变以可恢复性的弹性形变

为主。

(2) 我国距震中较远, 受此次日本地震的影响较小, 且大部分站点是在东向出现不同程度的震后永久性位移。CHAN 站点的震中距最小, 其震后位移最为明显, 东向形变量接近 2 cm; NCST, NLHT 站点次之, 东向形变量为 1 cm 左右; BJFS, NZFD 等站点的东向形变量更小, 仅为几个毫米。SHAO, SXSA 站点在高程方向出现趋势性位移, 其形变量为 1 cm 左右; 而 WUHN 站点震后没有出现明显的趋势性形变。

(3) 地震波传输到国家海洋局 GPS 业务站 NCST, NLHT 等的时间约为 10 min, 比海啸在深海的传播速度快约 14 倍。因此, 根据 GPS 观测到的地震信息, 可为海啸预警提供所需的时间差, 最大限度的获取逃生窗口。

本文结果显示 GPS 技术具备监测地震形变的能力, 也表明了中国沿海 GPS 业务观测系统在海底地震监测、海啸预警服务中的应用潜力。中国东临太平洋, 沿海地区处于太平洋板块和亚欧板块的前沿地带, 国家海洋局在中国沿海布设的 GPS 业务观测系统, 可以直接监测板块边缘的活动状况和海底地震, 因此, 在满足目前的海平面变化监测任务的基础上, 该系统可进一步升级成为海啸监测系统, 这也需要在 GPS 数据快速处理、海啸传播机理等方面进一步开展研究工作。

参考文献:

- [1] 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的同震位移场[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(10): 1195—1206.
- [2] 殷海涛, 张培震, 甘卫军, 等. 高频 GPS 测定的汶川 $M_s 8.0$ 级地震震时近场地表变形过程[J]. 科学通报, 2010, 55(26): 2621—2626.
- [3] 王敏, 李强, 王凡, 等. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 $M_w 9.0$ 级地震远场同震位移[J]. 科学通报, 2011, 56(20): 1593—1596.
- [4] 冯义楷, 刘焱雄, 高兴国, 等. 国家海洋局 GNSS 业务化系统的设计与实现[C]//CPGPS 2009 卫星导航定位技术论坛论文集, 2009: 30—34.
- [5] FAN Shijie, LIU Yanxiong, XU Caijun, et al. GPS Kinematic Precise Point Positioning Based on Sequential Least Squares Estimation [C]. IEEE Proceedings of the 18th International Conference on Geoinformatics 2010, Beijing, June 18—20, 2010.
- [6] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [7] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function(GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33: L07304.
- [8] KING R W, BOCK Y. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software, Release 10. 2[CP]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [9] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT. Release 10. 4[M]//CAMBRIDGE M A. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachuset Institute of Technology, 2010.
- [10] BOEHM J, HEINKELMANN R, SCHUH H. A global model of pressure and temperature for geodetic applicationa[J]. J Geodesy, 2007, 81(10): 679—683.
- [11] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, et al. Modelling the global ocean tides; modern insights from FES2004[J]. Ocean Dyn,

2006, 56(5/6): 394—415.

- [12] 刘焱雄,彭琳,周兴华,等. 网解和 PPP 解的等价性[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(8):736—738.
- [13] 温瑞智,周正华,谢礼立. 基于强震台网的我国沿海海啸走时预警[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(2):20—24.
- [14] 文汉江,章传银. 由卫星测高数据观测到的印度洋海啸波高[J]. 测绘科学,2005,30(2):39—40,54.

GPS responses to the 2011 M_w 9.0 earthquake in Japan

LIU Yanxiong^{1,2}, FAN Shijie^{1,2,3}, QIAO Fangli¹, ZHOU Xinghua¹, ZHANG Jian¹

(1. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 200061, China*; 2. *School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China*; 3. *School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China*)

Abstract: A massive M_w 9.0 earthquake occurred on 11 March 2011, off the Pacific coast of the east of Miyagi, Japan. The earthquake caused severe surface dislocations and launched a tsunami. In this paper, our developed software UniP, based on the precise point positioning mode, is used to extract the co-seismic and post-seismic surface movement information from IGS data and Chinese coastal GPS data. The results show: (1) The co-seismic surface deformation processes are clearly recorded by the GPS kinematic positioning results, and these elastic deformation on CHAN and NCST sites is up to 15 cm. (2) The massive earthquake did not cause obvious permanent position shift of GPS sites in China, because of distant range. The maximum eastward shift on CHAN is (1.8 ± 0.11) cm. (3) The travel time is almost 10 minutes for seismic wave to NCST and NLHT site. The propagation velocity of seismic wave is about 14 times faster than that of tsunami. So the arrival time difference may be enough for the tsunami prediction. These results reveal that GPS technology can provide valuable basic data for earthquake monitoring and dynamic characteristics. It further demonstrates the application potential of Chinese Coastal GPS monitoring system in seaquake monitoring and tsunami warning services.

Key words: Global Positioning System; earthquake; precise point positioning; surface deformation; tsunami warning