

方荣新,施闯,宋伟伟等. 实时 GNSS 地震仪系统实现及精度分析. 地球物理学报, 2013, 56(2): 450-458, doi: 10. 6038/cjg20130209.

Fang R X, Shi C, Song W W, et al. Real-time GNSS seismometer and its accuracy. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(2): 450-458, doi: 10. 6038/cjg20130209.

实时 GNSS 地震仪系统实现及精度分析

方荣新, 施 闯*, 宋伟伟, 牛小骥, 张 全, 陈克杰, 刘经南

武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079

摘 要 高频 GNSS 数据实时精密单点定位(RTPPP)可实时获得地表瞬时动态形变和地震波信号,为地震参数快速确定、地震快速响应及海啸预警提供实时的观测资料. 本文构建了实时 GNSS 地震仪系统,主要包括 RTPPP 和实时探测两部分. 利用 RTPPP 方法处理了模拟的震动实验平台实验数据和 2010 年 Baja California 地震的数据,并与惯导(IMU)、事后 PPP 和差分相对定位结果比较,定量评估了实时 GNSS 地震仪系统的精度. 结果表明,该系统可实现水平方向优于 1cm,高程方向优于 3cm 的实时定位,且对 Baja California 地震的实时探测结果与南加州地震数据中心公布的结果相一致.

关键词 GNSS 地震仪,实时精密单点定位,PANDA 软件,海啸预警

doi:10. 6038/cjg20130209

中图分类号 P223

收稿日期 2012-04-06,2012-11-20 收修定稿

Real-time GNSS seismometer and its accuracy

FANG Rong-Xin, SHI Chuang*, SONG Wei-Wei, NIU Xiao-Ji,

ZHANG Quan, CHEN Ke-Jie, LIU Jing-Nan

GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract Real-time high-rate GNSS data can be used to obtain the dynamic ground displacements caused by earthquakes. The displacements are greatly useful in earthquake early warning and emergency response. A real-time GNSS seismometer system is built with real-time precise point positioning (RTPPP) and displacement waveforms detection techniques. In order to evaluate the accuracy of real-time displacement waveforms derived from RTPPP, simulated data from a shaking table platform, which can generate the dynamic displacements, and real-world data of the 2010 Baja California earthquake are processed. Comparing the above results with those of Inertial Measurement Unit (IMU), precise point positioning (PPP) and relative positioning, it is illustrated that the real-time GNSS seismometer system is able to obtain the displacement waveforms with the accuracy of better than 1 cm and 3 cm in horizontal component and vertical component, respectively. The displacement waveforms of Baja California earthquake detected by this GNSS seismometer system are consistent with the results released by Southern California Earthquake Data Center (SCEDC).

Keywords GNSS seismometer, Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP), PANDA software, Tsunami warning

基金项目 国家自然科学基金项目(41104024,41231174,41274049)、中国博士后科学基金(2012M511670)、海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(2011B01)、地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金(11-02-03)联合资助.

作者简介 方荣新,男,1982年生,讲师,博士,主要从事高精度 GNSS 数据处理和 GNSS 地震学研究. E-mail: rxfang@whu.edu.cn

* **通讯作者** 施闯,男,1968年生,教授,博导,主要从事 GNSS 数据处理理论、算法及应用研究. E-mail: shi@whu.edu.cn

1 引言

传统地震仪可以监视地震发生、记录地震波信号等相关信息,为快速确定地震震中、震级以及地震预警提供宝贵的观测资料.地震仪主要有宽频带地震仪(速度型地震仪)和强震仪(加速度型地震仪)两种,在应用中主要存在两个问题:一是宽频带地震仪遇到强震时经常会超出记录量程,无法完整的记录地震波波形;二是在地震和海啸预警研究中,地震仪数据通常需要积分为位移量计算震级和海啸高度^[1-2],但受仪器倾斜、旋转等因素影响,积分结果会引入许多误差,难以获得准确的地壳形变信息.以上两个问题是造成地震震级确定误差的主要原因之一.例如,2011年3月11日,日本发生 M_w 9.0级大地震(东日本大地震),但是日本气象厅(JMA)1h后速报的震级仅为 M_w 8.4,3天后才修订为 M_w 9.0.速报震级偏小,导致日本相关部门对地震引起的海啸高度预报偏低,最终造成日本东北部沿海地区应对海啸准备不足,增加了大量的人员伤亡和财产损失.

近年来,随着高频 GNSS 接收机(1~50 Hz)的出现和精密定位技术的发展,利用高频 GNSS 数据恢复地震时期地表瞬时动态形变信息和地震波信号的研究已较为成熟.2003年,Larson 等成功利用实测的高频 GPS 数据采用 JPL 研发的 GIPSY 软件恢复了 2002 年 Delali 地震的远场地震波^[3].Kouba 采用 PPP 方法处理了此次地震期间的 IGS 跟踪站网 1 Hz GPS 数据,表明 PPP 方法同样可以获得地震波信号^[4].随后,高频 GNSS 数据恢复地震波信号的研究得到了迅速发展^[5-6],其结果也被用于震源破裂过程、震源参数反演、断层滑动分布等研究中^[7-9],并发展为一门新的学科——“GNSS 地震学”^[10].GNSS 作为记录地震波信号的一种新型仪器,也被称为“GNSS 地震仪”.

然而,上述研究主要基于事后处理模式,若要利用 GNSS 观测结果实现地震参数实时确定及地震预警,需要提供实时的 GNSS 数据处理结果.一种能够实现 GNSS 数据实时解算及地震波信号实时探测的系统,本文称之为“实时 GNSS 地震仪系统”.GNSS 实时精密定位是实现该系统的关键技术.GNSS 实时精密定位主要有两种模式,即实时相对定位和实时精密单点定位(Real-time Precise point positioning -RTPPP)模式.实时相对定位需要一个测站作为参考站,当地震发生时,地震波的波及范围可达几百甚至上千公里,很难快速实时地选择完全静止的参考站.RTPPP 模式采用单台接收机实现精密定位,定位方式灵活,适合实时定位处理^[11].JPL 实施的实时地震和海啸预警工程(GREAT)旨在采用 RTPPP 方法实现全球范围 cm 级精度定位服务,用于自然灾害监测和预警(<http://www.gdgps.net/products/great-alert.html>).Allen 等将实时 GPS 数据获得的地震波结果与利用加速度和速度计获得的结果进行对比,表明实时高频 GPS 数据能够用于地震震级确定和地震预警^[12].张小红等利用精密单点定位采用仿实时模拟的方式,获得了汶川地震 GPS 测站的定位结果^[13].但是,这些研究未对 GPS 获得的地震波信号进行定量的精度评定.本文将基于 RTPPP 方法,构建实时 GNSS 地震仪系统,并通过模拟震动平台和实测地震数据,定量分析 GNSS 地震仪系统的精度.

2 实时 GNSS 地震仪系统构成

本文构建的实时 GNSS 地震仪系统主要包括实时 GNSS 定位和实时地震信号探测两个部分.其中实时 GNSS 定位部分包括实时数据流的接收、轨道和钟差产品生成、产品播发和用户端实时定位.实时地震信号探测部分主要是利用 GNSS 实时定位结果探测并捕捉地震波信号.系统原型如图 1 所示.

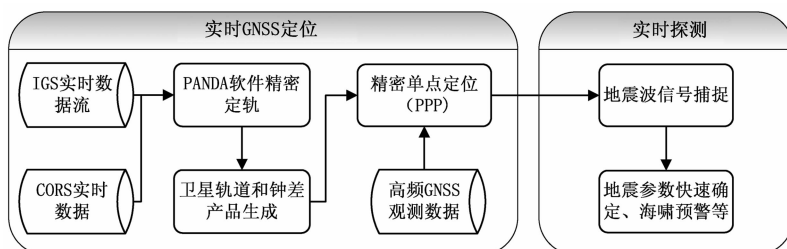


图 1 实时 GNSS 地震仪系统原型

Fig. 1 A prototype of real-time GNSS seismometer system

2.1 GNSS 实时定位

本文构建的实时 GNSS 地震仪系统采用 RTPPP 方法进行精密定位. RTPPP 方法需要实时获得高精度的卫星轨道和钟差产品,目前国际 GNSS 服务组织(IGS)提供预报的卫星轨道和钟差产品(IGU 产品)其预报部分的轨道精度为 5 cm,钟差精度仅为 3 ns,无法满足高精度 mm-cm 级实时定位的需求.因此,需要通过精密定轨获得高精度实时卫星轨道和钟差产品,然后通过数据播发模块发送给用户用于实时精密定位.

2.1.1 实时数据流接收

2007 年 6 月,IGS 开展了 IGS 实时实验计划(Real Time Pilot Project, RTPP),主要目标包括:管理和维护 IGS 的实时跟踪站网络;生成组合的 IGS 实时分析产品;研究出一套标准的实时数据接收和发布格式;制定实时分析产品的标准格式.该计划旨在形成一套完整的 IGS 实时产品服务系统(<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>).

武汉大学卫星导航定位技术研究中心自 2009 年开始参与 RTPP 计划,并于 2009 年 6 月,由 IGS 实时数据流工作组 BKG 的 GNSS data center 授权在武汉大学卫星导航定位技术研究中心成立了亚太地区最早的数据转发中心(<http://ntrip.gnsslab.cn>).图 2 为武汉大学实时数据中心转发的 GNSS 实时基准站分布图,这些基准站实时数据流是实现实时精密定轨获得实时精密轨道和卫星钟差的数据基础.

2.1.2 实时卫星轨道和钟差产品生成

目前一些数据处理中心已可以提供实时的钟差

产品:BKG 分析中心实时获取跟踪站网络的高采样率实时数据流,采用 RTNet 软件开展了秒级更新的实时钟差估计工作,钟差精度优于 0.5 ns^[14];ESA 采用基于扩展卡尔曼滤波开发的 Auto-BAHN 软件可以提供精度为 0.3 ns 的 5 s 更新的钟差产品^[15].

武汉大学自主研发的 PANDA(Positioning And Navigation Data Analyst)软件具有实时定轨功能,能为用户提供实时轨道精度 3~5 mm 和钟差精度 0.1~0.3 ns 的产品^[16-17].具体过程是:(1)接收图 2 中显示的 GNSS 基准站的实时数据流,利用基准站实时数据流管理软件实现对实时观测数据流的接收、时间同步处理,并将实时数据流发送至轨道和钟差处理端;(2)利用获取的基准站实时数据精密定轨,获得卫星精密轨道;(3)固定利用 PANDA 软件定轨获得的精密轨道,同时强约束测站坐标,模糊度参数通过历元间差分方法进行消除,参数估计采用平方根信息滤波,估计参数包括卫星钟差历元间的变化、接收机钟差历元间的变化以及对流层参数.由于通过历元间差分方法估计的是卫星钟差历元间的变化,因此需引入一参考历元的卫星钟差初值,该初值可采用广播星历计算得到.

2.1.3 数据通信和产品播发

数据通信协议采用通用的 Ntrip 协议与 TCP/IP 协议两种方式连接.这两种方式应用于不同的情况:一,对具有管理控制功能的实时跟踪站接收机,直接采用 TCP/IP 协议与数据处理中心进行连接;二,实时跟踪站接收机通过服务器转发与客户端数据连接软件连接,采用 Ntrip 协议.数据格式主要包括 RTCM2.0、RTCM3.0 以及接收机原始二进制

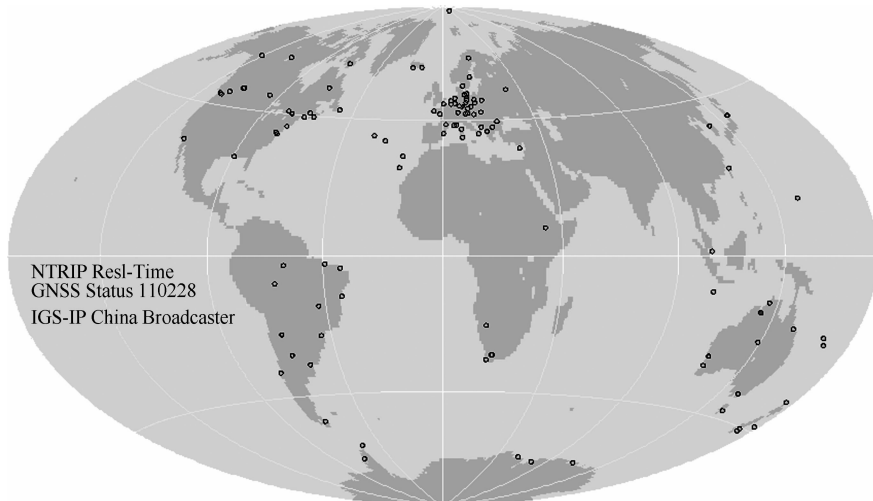


图 2 武汉大学实时数据中心转发的 GNSS 基准站分布图

Fig. 2 Distribution of real-time reference stations distributed from Wuhan University

格式.

卫星轨道与钟差产品可采用多种播发方式,主要包括 GPRS、3G 等 Internet 传输和同步通信卫星播发,本系统采用 3G 传输播发方法.

2.1.4 实时精密单点定位

利用 PANDA 计算的实时精密卫星轨道和钟差产品,在用户端实时接收并对观测站高频 GNSS 数据进行实时精密单点定位,可获得观测站逐历元定位结果.具体过程为:自接收机获得实时观测数据后,利用服务端发送的轨道和钟差信息改正广播星历的卫星轨道误差以及卫星钟误差,观测值采用双频无电离层组合观测值(LC),利用模型改正潮汐误差,相位偏差、对流层延迟等,其中对流层延迟改正采用 Saastamoinen 模型加 GMF 投影函数^[18],残余的天顶对流层延迟误差采用随机游走方法进行实时估计.最后采用卡尔曼滤波实时估计测站坐标和模糊度等参数.

2.2 实时探测

高频 GNSS 数据通过 RTPPP 方法解算可以实时获得观测站逐历元动态定位结果.当定位结果收敛以后,测站坐标时间序列将处于平稳状态.一旦测站位置发生变化,RTPPP 定位结果将实时反映测站运动轨迹.图 3 为 2011 年东日本大地震 USUD 站的 RTPPP 处理结果,当地震波到达前,RTPPP 结果处于平稳状态,一旦地震波到达测站,RTPPP 结果将实时反应测站瞬时运动情况.从图中我们发现,E 方向不仅包含动态的地震波形,还存在 20 cm 的永久性偏移,说明高频 GNSS 数据不仅可以捕获地

震波信号,还可以测定测站永久性偏移量.这些信息可以为地震参数快速确定和地震预警提供更加可靠的观测资料和判断依据.

3 精度分析

为了定量评估实时 GNSS 地震仪系统的精度,本文分别利用模拟震动实验平台试验数据和 Baja California 地震数据进行分析.

3.1 震动实验平台

为研究 GNSS 动态定位精度,我们构建了震动实验平台^[19],如图 4 所示.该实验平台由 8 根弹簧将一块铝板固定在金属框架上,铝板上可同时承载 GNSS 接收机天线、加速度计和惯导设备(IMU)等多种仪器设备.通过外力作用于铝板,平台可在三维空间 6 个自由度方向运动.

本次实验采用的仪器包括一台 Trimble NetR8 GNSS 接收机,接收的数据设置为该仪器的最高采样率 50 Hz,一台惯导设备(IMU),设置的数据采样率为 250 Hz.如图 4 所示,GNSS1 为 Trimble NetR8 GNSS 接收机的天线,而另一个接收机天线(GNSS2)为 IMU 提供时间脉冲和加速度漂移校正,该 GNSS 接收机的采样率为 1 Hz.

IMU 设备本身即可提供平台的瞬时运动位置信息.IMU 包括加速度计和陀螺仪,前者测量加速度(以及重力,合称比力),后者测量角速度(或角度变化).IMU 的测量信息可以通过积分运算得到运载体位置、速度和姿态信息,但是 IMU 传感器存在

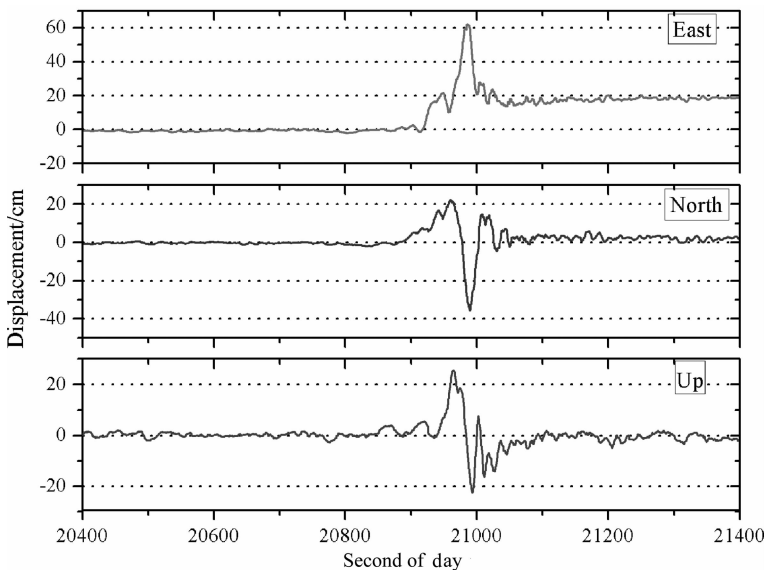


图 3 2011 年东日本大地震 USUD 站获得的地震波信号

Fig. 3 Displacement waveforms derived from USUD station in 2011 Tohoku-Oki earthquake

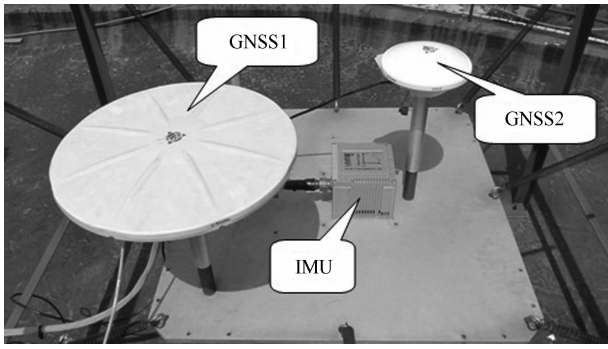


图 4 模拟震动试验平台

Fig. 4 A shaking table platform with GNSS and IMU

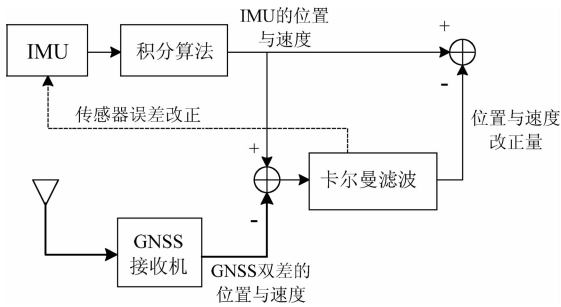


图 5 GNSS/IMU 组合定位流程图

Fig. 5 GNSS/IMU positioning processing flow chart

误差且其积分误差随时间无限发散,因此需要额外的辅助信息来抑制发散现象,本实验采用 GNSS/IMU 组合方式获得载体运动位置信息,其处理流程如图 5 所示.其中 GNSS 辅助信息采用双差相对定位获得天线 GNSS2 的位置与速度.相对定位采用的 GNSS 基准站距离震动实验平台约 400 m,采样

率为 1 Hz.而 IMU 测量获得震动平台的加速度和姿态信息,通过积分算法获得 IMU 的位置与速度,结合 GNSS 相对定位结果,采用卡尔曼滤波估计方法,最终获得震动平台的瞬时运动位置信息.

本文将 IMU 获得的平台运动位置信息作为参考,验证 RTPPP 方法的定位精度.由于 IMU 与 GNSS1 在震动平台上的摆放位置不相同,两者之间存在一个杆臂向量,因此要通过杆臂改正将 IMU 得到的定位信息转换到 GPS 所处的位置,并将坐标结果由地固系(X/Y/Z)转换至站心坐标系(E/N/U).

RTPPP 计算流程如 2.1 节所述,实时精密轨道和钟差产品由 PANDA 软件提供,轨道和钟差差分每秒播发一次.用户端实时接收播发的产品采用 PPP 方法可实时获得震动平台实时运动结果.为了比较 RTPPP 和 IMU 结果,坐标结果均由地固系(X/Y/Z)转换至站心坐标系(E/N/U).图 6 为其中一组震动实验的 RTPPP(红线)与 IMU(蓝线)结果,为定量分析 RTPPP 精度,计算了 RTPPP 与 IMU 结果的互差(绿线所示).通过统计,E、N、U 方向互差 RMS 值分别为 7.4 mm、6.2 mm 和 16.9 mm.从图中 U 方向的结果可以看出,尽管 RTPPP 结果表现出一定的长周期趋势项,但短时间内(数分钟)精度较高,同样完整地恢复了震动平台的震动波形.而在实时地震监测和地震波信号提取研究中,主要关注的是短时间内相对变化量和振动波形,因此, RTPPP 在短时间内的精度正好可以满足地震实时监测和地震波获取的需求.

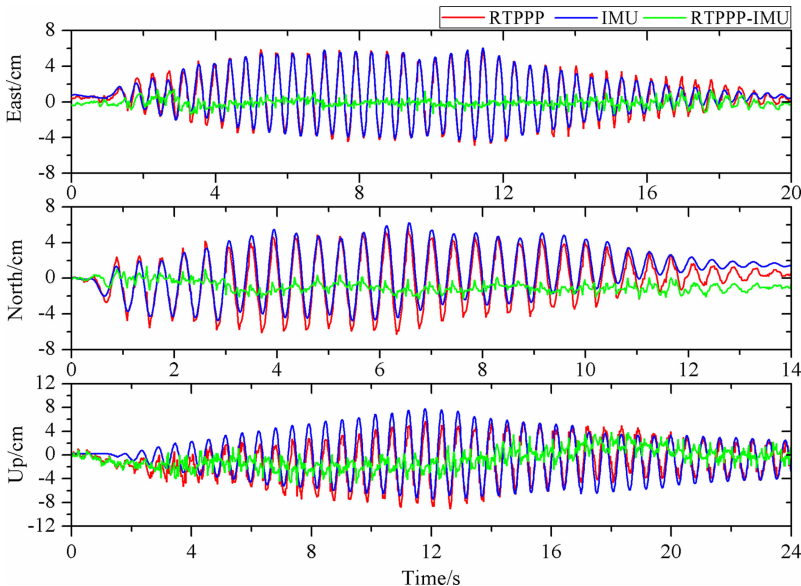


图 6 平台震动 RTPPP 与 IMU 结果及互差

Fig. 6 Displacements of platform movements derived from RTPPP and IMU and their differences

3.2 实测地震分析

为了实现实时 GNSS 地震仪系统在实际地震中的运用,本文对 2010 年 4 月 4 日(UTC 时间 22:40:42)墨西哥北部发生的 M_s 7.2 级 Baja California 地震进行研究.美国南加州区域布设的 GPS 测站记录了本次地震的发生过程,为此次地震研究提供了宝贵的观测资料.利用本文介绍的 RTPPP 方法,以模拟实时的方式重新处理了 Baja California 地震期间共 4 个测站的 1 Hz 高频 GPS 数据,为便于分析,均转换为站心坐标系(E/N/U).图 7 为 P500 站 RTPPP 计算的 E、N、U 方向结果.

为了定量分析 RTPPP 结果的精度,分别与事后 PPP 结果以及相对定位(DD)结果进行对比.事后 PPP 结果利用 PANDA 软件计算得到,精密星历采用 CODE 分析中心提供的事后精密轨道和钟差产品,利用模型改正潮汐误差,相位偏差、对流层延迟等,其中对流层延迟改正采用 Saastamoinen 模型加 GMF 投影函数,残余的天顶对流层延迟误差采用随机游走方法进行估计,电离层延迟采用双频无线电层组合消除,最后通过最小二乘方法估计测站坐标、接收机钟差和模糊度等参数.具体计算策略详见参考文献[6].

相对定位(DD)结果采用南加州地震数据中心(SCEDC)公布的结果.美国地质调查局(USGS)和南加州地震研究中心(SCEC)等机构共同建立的南加州地震数据中心提供了此次地震期间 GPS 数据

解算的测站坐标时间序列,其数据处理方式为相对定位模式^[20],(http://www.data.scec.org/research/MayorCucupah20100404/Mexicali_GPSsac.tar.gz).

图 8 给出了 P500 站地震前后共半小时(22:30—23:00)的 RTPPP 与事后 PPP 结果以及两者的差值,图 9 为 RTPPP 与 DD 结果比较结果.

4 个测站地震前后共半小时(22:30—23:00)的 RTPPP 与事后 PPP、RTPPP 与 DD 结果比较见表 1.经统计,RTPPP 与事后 PPP 互差 RMS 水平方向为 4~8 mm,优于 1 cm,高程方向为 23~27 mm,优于 3 cm;RTPPP 与相对定位(DD)结果互差 rms 水平方向为 5~9 mm,优于 1 cm,高程方向为 24~28 mm,优于 3 cm.

表 1 RTPPP 与 PPP 和 DD 结果的互差 rms

Table 1 Difference(rms) between RTPPP and PPP and Difference(rms) between RTPPP and DD

测站	RTPPP-PPP(rms)			RTPPP-DD(rms)		
	E(mm)	N(mm)	U(mm)	E(mm)	N(mm)	U(mm)
P494	4.3	6.7	26.3	5.9	8.9	27.8
P497	4.7	7.8	26.4	5.4	7.3	24.4
P500	4.8	6.1	23.1	6.1	6.9	24.0
P501	5.1	6.5	26.5	6.2	7.0	25.5

详细分析图 9 中可以发现,RTPPP 结果在水平方向的精度与事后 PPP 和 DD 结果相差较小(优于 1 cm),而高程方向与事后 PPP 和 DD 结果有较大

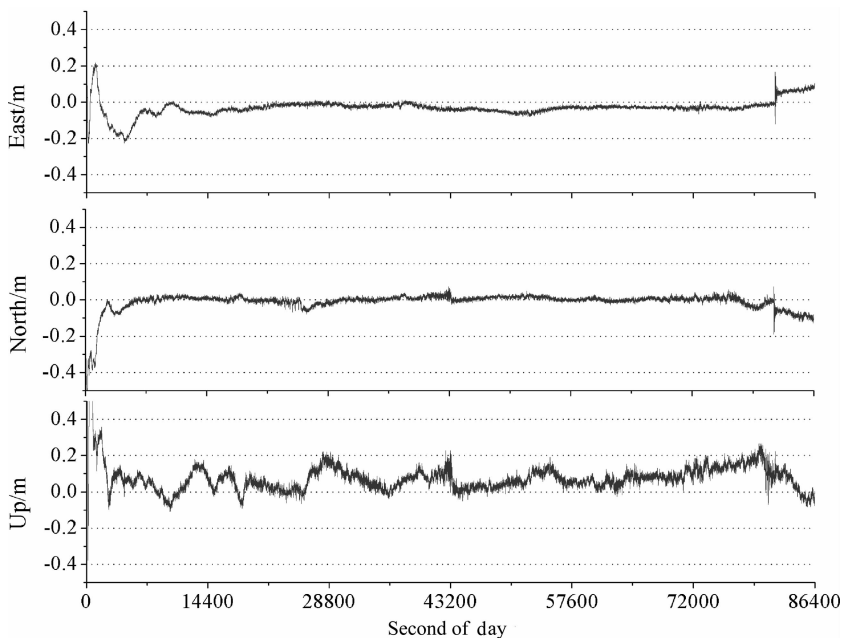


图 7 测站 P500 单天 RTPPP 结果

Fig. 7 RTPPP results for one day on station P500

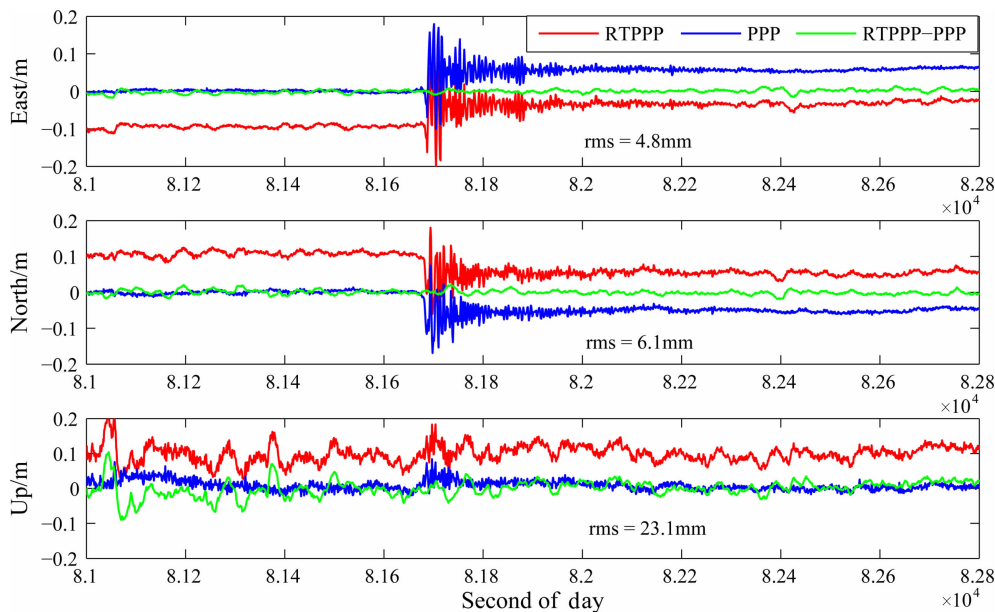


图 8 P500 测站 RTPPP 与事后 PPP 结果比较

Fig. 8 Displacement on station P500 derived from RTPPP and PPP and their differences

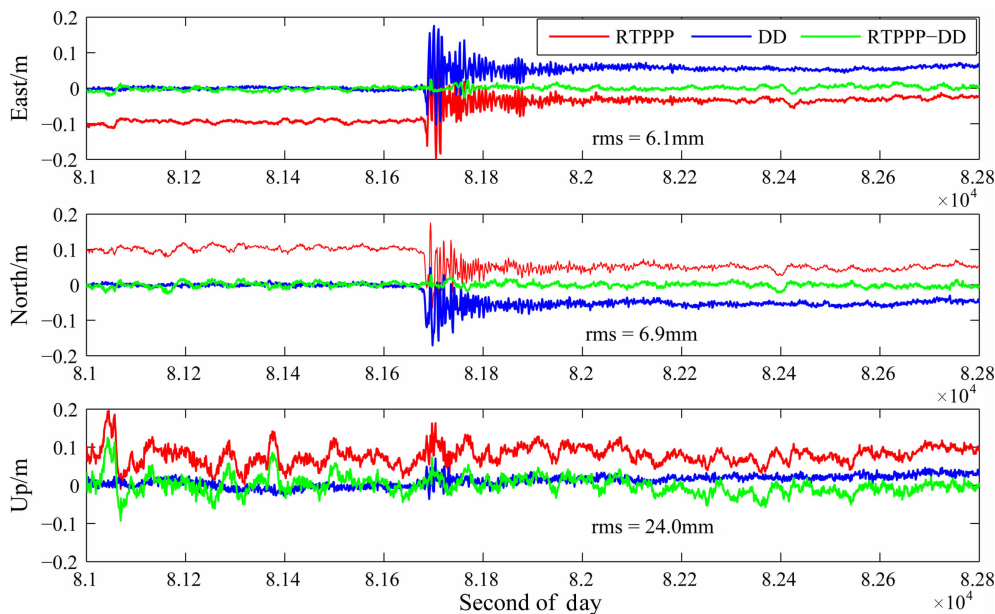


图 9 P500 测站 RTPPP 与双差 (DD) 结果比较

Fig. 9 Displacements on station P500 derived from RTPPP and relative positioning and their differences

差别,且主要呈现长周期特性,主要是受预报的轨道和钟差精度、以及对流层延迟的影响.而 DD 结果通过差分方法有效消除了轨道、卫星钟差及对流层延迟等误差影响.

图 10 为 P500 测站地震前后 2 min 的 RTPPP 与 DD 的结果,此次地震造成的 P500 测站水平方向振幅约 20 cm,RTPPP 获得的水平方向地震波形与 DD 结果非常一致.而高程方向振幅约为 5 cm,且 RTPPP 结果在 U 方向表现的震动波形与 DD 结果基本一致,说明 RTPPP 对于振幅为 5 cm 的高程方

向运动也具有监测能力.

4 结论

本文构建的实时 GNSS 地震仪系统采用 RTPPP 方法能获得高精度的测站瞬时地表形变和地震波,该方法采用单站独立测量模式,具有很好的定位灵活性.当 RTPPP 收敛后,统计半小时观测时段,其定位精度水平方向优于 1 cm,高程优于 3 cm. RTPPP 结果在水平方向的精度与事后 PPP 和 DD

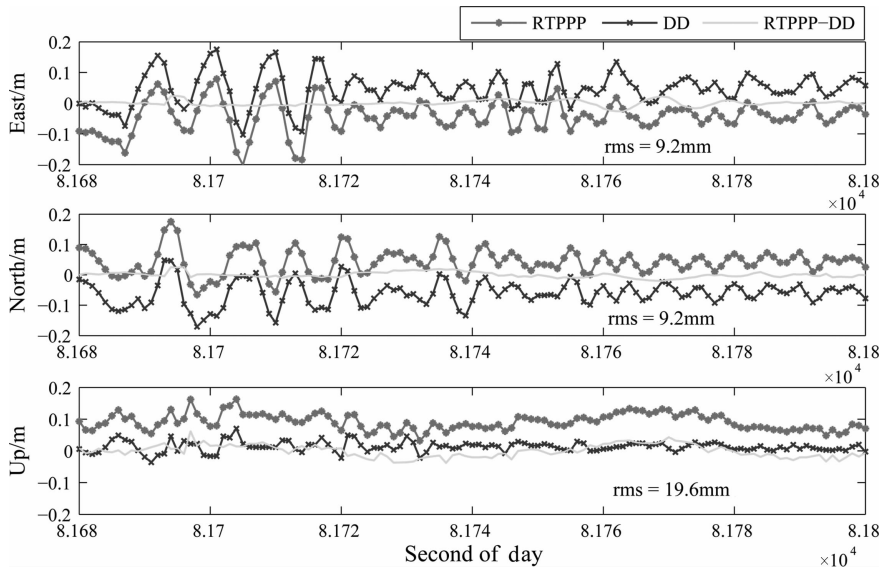


图 10 P500 测站 RTPPP 与双差(DD)地震前后 2 min 结果比较

Fig. 10 Displacements on station P500 derived from RTPPP and relative positioning and their differences(2 minutes)

结果相当,而高程方向与事后 PPP 和 DD 结果相比,主要存在长周期特性误差的影响,在短时间内的相对定位精度较高.在实时 GNSS 地震监测和地震波信号提取中,主要关注的是短时间内相对变化量和振动波形,因此 RTPPP 方法非常适合应用于实时 GNSS 地震仪系统.

GNSS 地震仪系统的测量幅度范围没有限制,只要 GNSS 接收机能正常工作,可以测量任意震动幅度的位移.由于实时数据流传输和用户实时轨道钟差产品播发与接收受到网络延迟影响,该系统的信号输出延时一般为 3~5 s.而该系统的测量频带范围与 GNSS 数据采样率有关,例如,50 Hz 采样的 GNSS 地震仪无法提取频率大于 25 Hz 的地震信号,而许多传统地震仪能捕获频率高达几十甚至几百赫兹的地震波信号,说明 GNSS 地震仪系统在高频部分的分辨能力与传统地震仪仍有明显差距.因此,通过实时 GNSS 地震仪系统获取瞬时地表形变和地震波信号,再结合传统地震仪记录的地震波加速度和速度数据,将为地震参数确定和地震快速响应提供更加丰富、可靠的观测资料,从而实现地震早期预警、海啸预警以及地震灾害快速评估等方面的应用.

参考文献 (References)

[1] Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (11): L11309, doi:10.1029/2006GL026145.

[2] Crowell B W, Bock Y, Squibb M B. Demonstration of

earthquake early warning using total displacement waveforms from Real-time GPS networks. *Seismological Research Letters*, 80(5): 772-782.

- [3] Larson K M, Bodin P, Gombert J. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake. *Science*, 2003, 300(5624): 1421-1424.
- [4] Kouba J. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2003, 47(4): 741-755.
- [5] Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. GPS seismology: Application to the 2002 M_w 7.9 denali fault earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98 (2): 593-606.
- [6] Shi C, Lou Y, Zhang H, et al. Seismic deformation of the M_w 8.0 Wenchuan earthquake from high-rate GPS observations. *Advances in Space Research*, 2010, 46(2): 228-235, doi:10.1016/j.asr.2010.03.006.
- [7] Ji C, Larson KM, Tan Y, et al. Slip history of the 2003 San Simeon Earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(17): L17608, doi:10.1029/2004GL020448.
- [8] Miyazaki S I, Larson K M, Choi K, et al. Modeling the rupture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki earthquake using 1-Hz GPS data. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(21): L21603, doi:10.1029/2004GL021457.
- [9] Avallone A, Marzario M, Cirella A, et al. Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the M_w 6.3 L' Aquila (central Italy) event. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: B02305, doi: 10.1029/2010JB007834.
- [10] Larson K M. GPS seismology. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3-4): 227-233.
- [11] Geng J, Teferle F N, Meng X, et al. Kinematic precise point

- positioning at remote marine platforms. *GPS Solutions*, 2010, 14(4): 343-350.
- [12] Allen R M, Ziv A. Application of real-time GPS to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): L16310, doi:10.1029/2011GL047947.
- [13] 张小红, 李星星, 郭斐等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1308-1314.
- Zhang X H, Li X X, Guo F, et al. Server based real time precise point positioning and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1308-1314.
- [14] Iwabuchi T, Rochen C, Lukes Z, et al. PPP and Network True Real-time 30 sec Estimation of ZTD in Dense and Giant Regional GPS Network and the Application of ZTD for Nowcasting of Heavy Rainfall. // Proceeding of the ION-GNSS, Institute of Navigation, Fort Worth, Texas, 2006: 26-29.
- [15] Zhang Q, Moore P, Hanley J, et al. Auto-BAHN: Software for near real-time GPS orbit and clock computations. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1531-1538.
- [16] 施闯, 楼益栋, 宋伟伟等. 广域实时精密定位原型系统及初步结果. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(11): 1271-1274.
- Shi C, Lou Y D, Song W W, et al. A wide area real-time differential GPS prototype system and the initial results. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2009, 34(11): 1271-1274.
- [17] Shi C, Lou Y D, Song W W, et al. A wide area real-time differential GPS prototype system in China and result analysis. *Survey Review*, 2011, 43(322): 351-360.
- [18] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- [19] 方荣新, 施闯, 陈克杰等. GPS地震仪: PANDA 软件测试结果与验证. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(4): 453-456.
- Fang R X, Shi C, Chen K J, et al. GPS seismometer: PANDA software testing results and validation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2011, 36(4): 453-456.
- [20] Bock Y, Melgar D, Crowell B W. Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 106(6): 2904-2925, doi:10.1785/0120110007.

(本文编辑 胡素芳)