

顾及非构造形变的参考站长期稳定性分析

钱 闯¹ 刘 晖¹ 丁志刚² 郑洪艳¹

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

² 山东北斗华宸导航技术有限公司, 山东 淄博, 255086

摘要: 连续运行参考站可为地表位移研究提供连续可靠的原始数据, 研究多个参考站的位置时间序列(也称为坐标时间序列)可以反映出该地区地表沉降和运动趋势, 进而对引起运动的线性变化和非线性变化进行研究。本文以江西连续运行参考站网络(JXCORS)为例, 通过建立各参考站 3 a 的位置序列对江西地区的线性变化和非线性变化现象进行研究。在江西地区的线性变化中, 局部平面变形很小(与附近陆态网站点的平均速率差异在 1 mm/a 以内, 优势方向差异为 1.63°), 垂向变化较为稳定(上抬升平均速度为 1.887 mm/a, 沉降平均速度为 0.906 mm/a); 在非线性变化研究中, 参考站存在垂向半年周期的变化规律, 进一步研究表明, 水文负载是造成该变化的成因之一。

关键词: CORS; 位置时间序列; 速度场; 地面沉降; 非构造形变

中图法分类号: P228.42 文献标志码: A

参考站长期稳定性计算和变化规律研究是卫星大地测量中的重要研究内容, 是监测板块运动、建立坐标参考框架的重要内容。

对于参考站长期稳定性的研究, 国内外学者主要利用参考站长时间位置序列进行分析。文献[1]由两个相距 50 m 的 GPS 参考站 1998~2001 年 3 a 的时间序列, 解算出其相对位置变化在 0.3 mm 以内。文献[2]则分析了 3 a 的某 GPS 站点日坐标时间序列, 得出该点沉降了 3 cm 或者说是 1 cm/a。文献[3]利用两个 GPS 参考站点的一年的时间序列, 通过一定范围内参考站、CORS、IGS 跟踪站三者线性速度的一致性, 确定参考站是否存在局部平面变形或沉降, 量化参考站的长期稳定性。

上述研究主要侧重于位置时间序列中的线性变化规律, 然而最新研究表明, 参考站位置时间序列中不仅存在线性变化, 而且存在显著的上下波动^[4-5]。这种非线性变化的起因一般认为是由技术系统误差、非构造形变以及随机因素(噪声^[5])三部分组成。相比线性变化, 对非构造形变等造成的非线性变化的研究并不多见。本文利用江西省连续运行参考网(Jiangxi continuously operating reference stations, JXCORS)参考站 3 a 的位

置时间序列, 对参考站长期位置变化规律进行了研究, 着重对其非构造形变的规律和起因进行了剖析, 力图寻找适合于省级系统长期位置变化分析方法。

JXCORS 由覆盖江西省的 62 个永久性 GNSS 连续运行参考站组成, 绝大部分站点为楼顶站(52 个, 楼层小于 4 层), 少数为土层站。建站参考了《IGS 基准站建立规范》、《中国地壳形变监测网络基准站建立规范》等, 接收机为天宝 R3, 天线为 Zephyr Geodetic II。

1 位置时间序列获取

利用 GAMIT/GLOBK(10.4)求取 JXCORS 参考站位置时间序列。首先, 利用 GAMIT 软件, 引入 BJFS、SHAO、WUHN、KUNM、TNML 5 个 IGS 站点作为约束, 进行基线计算; 然后, 用 GLOBK 基线解算获取的松弛解 h 文件进行平差, 从而得到各站点的天解位置时间序列; 通过坐标转换, 得到各个站点的 N、E、U 三个分量的时间序列(N、E、U 为站心坐标系坐标分量)。图 1 为 DUCH 的位置时间序列。

从图 1 可以看出, 参考站位置既有线性变化,

收稿日期: 2013-11-28

项目来源: 国家 863 计划资助项目(2012AA12A209)。

第一作者: 钱闯, 博士。主要从事高精度 GNSS 数据处理与应用。E-mail: qcforever112358@gmail.com

通讯作者: 刘晖, 博士, 教授。E-mail: loweliu@263.net

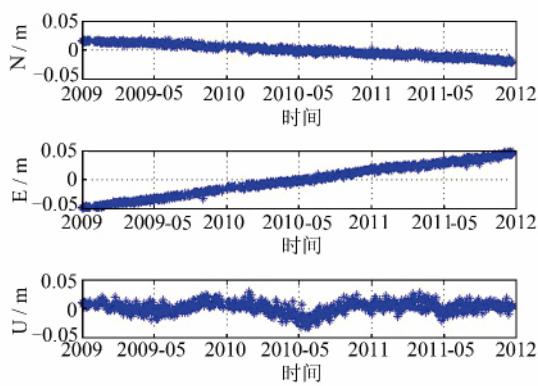


图1 DUCH站的位置时间序列

Fig. 1 Position Time Series of DUCH

也有非线性变化,且具有相似的趋势,说明有相似的影响因素。

2 线性变化分析

参考站的线性变化可以分解为水平方向和垂直方向。水平方向上主要表现为大尺度下的构造运动,比较一定范围内参考站及其他跟踪站之间线性速度的一致性,可以确定参考站点是否存在局部平面变形^[3]。垂直方向上主要通过速率大小反映地面沉降或抬升。

赣江断裂带横贯江西全省,是地表上一个醒目的低谷带(赣江),由3条断裂组成。水平和垂直速度场可能与该断裂带有一定关系,在文中的各图中各以黑线示出。

2.1 水平方向变化分析

本文主要通过ITRF框架和欧亚框架下的水平速度场来分析参考站水平方向上的线性变化,在欧亚框架下与附近的陆态工程站点的水平速度场进行比较,分析参考站的局部平面变形。

2.1.1 ITRF05框架下水平速度场

按照GLOBK平差策略,当一个GPS测站的数据至少有2个历元且间隔不少于0.9 a时,可以估计速度。GAMIT/GLOBK解算结果描述的是测站的绝对位移和速度。为了获取JXCORS网的速度场,本文采用获取坐标单日解的中国及其周边的5个IGS站BJFS、SHAO、WUHN、KUNM、TNML进行基准定义,对JXCORS网基线解算的松弛结果h文件进行平差,获取ITRF2005框架下的速度场,得到的水平速度场见图2。

计算可知,62个站点E方向平均速度为33.667 mm/a,N方向的平均速度为-11.687

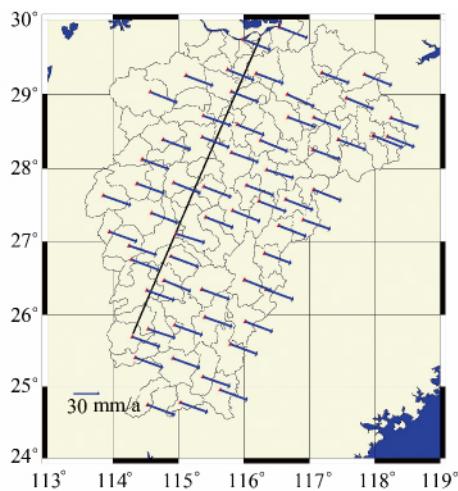


图2 参考站在ITRF2005框架下的水平速度场

Fig. 2 Horizontal Velocity Field Under ITRF2005

mm/a,水平方向的平均速度为35.643 mm/a,优势方向SEE109.13°。

2.1.2 欧亚框架下水平速度场

采用GLOBK提供的速度场参考框架转换工具CVFRAME进行转换,表1给出了进行框架转换的欧亚板块欧拉矢量参数 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 。欧亚板块的欧拉矢量参数是由模型NNR-NUVEL-1A所确定的,该模型可以直接用作背景场,进而可以方便地计算区域变形场。将ITRF2005框架下JXCORS参考站的水平速度转换到以欧亚板块为运动背景场的框架下,得到的水平速度场如图3所示。

表1 欧亚板块欧拉矢量参数表/(°/Ma)

Tab. 1 Euler Vector Parameters of Eurasia/(°/Ma)

模型	ω_x	ω_y	ω_z
NNR-NUVEL-1A	-0.05621	-0.13722	0.18065

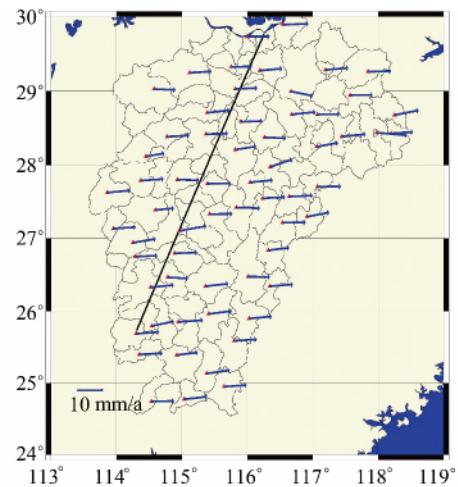


图3 参考站在欧亚框架下的水平速度场

Fig. 3 Horizontal Velocity Field Under Eurasia

计算得,62 个站点在欧亚框架下的 E 方向平均速度为 8.657 mm/a, N 方向的平均速度为 0.573 mm/a, 水平方向的平均速度为 8.675 mm/a, 优势方向为 SEE89.56°。

2.1.3 成果比价与分析

为对成果进行比较,本文以陆态工程中江西省附近的 18 个陆态网站点的测站速度(欧亚框架)为参照基准^[6], 站点分布见图 4。在欧亚板块下, 将其速度与本文计算的 JXCORS 参考站的速度进行比较。

表 2 给出了本文计算得到的速度与文献^[6]中结果的差值, 二者水平运动方向差异在 1.63°, 数值相差 1 mm/a 内, 说明了局部平面变形很小, 参考点在水平方向上稳定性良好。

2.2 垂直方向的线性变化分析

从图 5 可以看出, 在垂直方向上, 大部分测站的垂向速度是隆升的。计算可知, 上升方向的平均速度为 1.887 mm/a, 下降方向的平均速度为 0.906 mm/a。在垂直方向上, JXCORS 62 个参

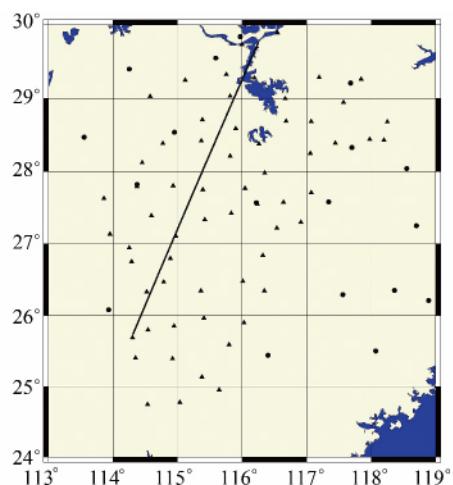


图 4 JXCORS 站点(三角)和文献[6]中的 18 个站点(圆形)分布图

Fig. 4 Distribution of JXCORS Stations(Triangle) and 18 Stations in Reference [6](Circle)

考站的速度普遍很小。根据以上统计, JXCORS 参考点在垂直方向上比较稳定。

表 2 本文计算的欧亚框架速度与文献[6]结果的比较

Tab. 2 Velocity Comparison Between this Paper and Reference [6]

	E 方向平均速度/(mm/a)	N 方向平均速度/(mm/a)	水平方向平均速度/(mm/a)	优势方向
本文(欧亚框架)	8.657	0.573	8.675	SEE86.21°
文献(欧亚框架)	8.094	0.305	8.100	SEE87.84°
较差	0.563	0.268	0.575	1.63°

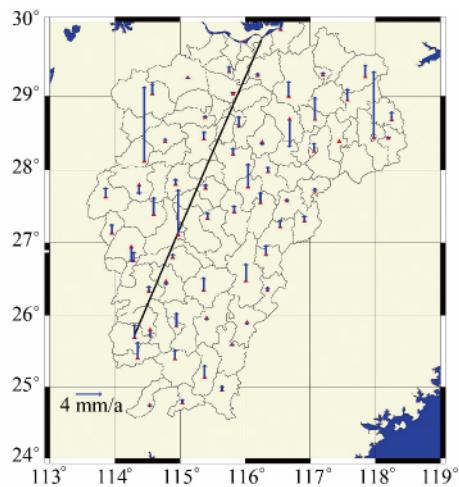


图 5 参考点在 ITRF2005 框架下的垂向速度场

Fig. 5 Vertical Velocity Field Under ITRF2005

3 非线性变化分析

参考站的位置变化包含了线性变化和非线性变化, 后者包含了技术系统误差和非构造形变以及噪声的影响, 主要表现为周期变化^[7-12]。已有

研究表明, GPS 位置时间序列存在的大部分周期信号被认为是真实的测站实际位移^[13-14], 而这种位移部分由非构造形变造成^[1,10,15]。为了研究这种非线性变化的本质, 本文首先实现形变信号与噪声的有效分离, 建立最优噪声模型, 进而根据非构造形变分析非线性变化的成因。

3.1 最优噪声模型的获取

许多研究表明, GPS 参考点的位置时间序列中不仅包含白噪声, 还包含有色噪声^[4,11-12,16]。利用最大似然估计计算不同噪声模型下的最大似然值(MLE), 通过最大似然值的比较来研究噪声特性。主要考虑白噪声(white noise, WN)、闪烁噪声(flicker noise, FN)、随机漫步噪声(random walk noise, RWN)、高斯马尔可夫噪声(Gauss Markov noise, GM)。蒙特卡罗模拟实验表明, 当两种噪声模型的最大似然值之差大于 3.0 时, 两种模型具有可区分性(95% 的显著水平)。

图 6 为按照上述方案计算的“白噪声+闪烁噪声”与“白噪声”的最大似然值之差。

在绝大部分测站上, “WH + FN”模型的 MLE 值大于“WH + RWN”和“WH + GM”; 而

“WH+FN+RWN”模型的MLE值大于“WH+FN”模型,且“WH+FN+RWN”中已经包涵WH噪声和FN噪声,可以完全代替“WH+FN”

模型。所以,本文选取“WH+FN+RWN”为JXCORS参考站的最佳噪声模型。

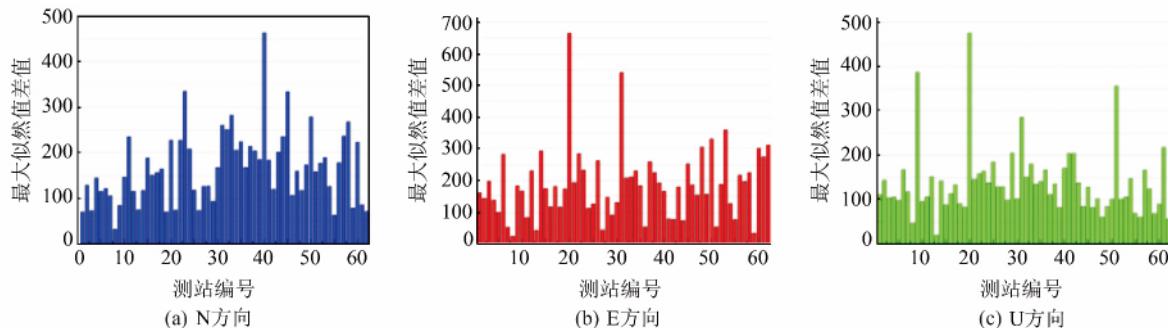


图 6 JXCORS 参考站坐标分量的最大似然值之差

Fig. 6 Difference Between Maximum Likelihood Estimate (MLE) of JXCORS

3.2 非构造形变对参考站位置的影响分析

3.2.1 概述

引起地壳非构造形变的地球物理因素主要包括两大类^[5]:第一类是潮汐形变,第二类是地球表面流体圈中的大气和各态水的质量迁移引起地表质量负荷变化,主要包括大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水等质量负荷,也称为环境负载。第二类形变在进行JXCORS数据处理时没有进行改正,可能是导致参考站时间序列中非线性变化的部分来源,特别是垂直方向上时间序列呈现非线性变化的原因。本文主要对环境负载进行分析。

江西是内陆省,海洋非潮汐负载未考虑,所研究的环境负载主要包括大气负载和水文负载(包

括土壤湿度和积雪深度负载等)。利用QOCA采用美国国家环境预测中心(NCEP)再分析数据计算了大气负载和水文负载造成地表位移。其中,大气负载利用的是NCEP的大气地表压力数据,时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;积雪深度和土壤湿度负载利用的是NECP的再分析数据,时间分辨率为1 d,空间分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 。地表质量负载主要作用于径向,主要影响CORS站的垂向位置变化,本节提到的位置序列特指垂向分量。

图7中列出了QMAN站的位置垂向分量的相对变化,包括了原始位置、大气负载、土壤湿度和积雪深度负载引起的地表位移的垂向分量。

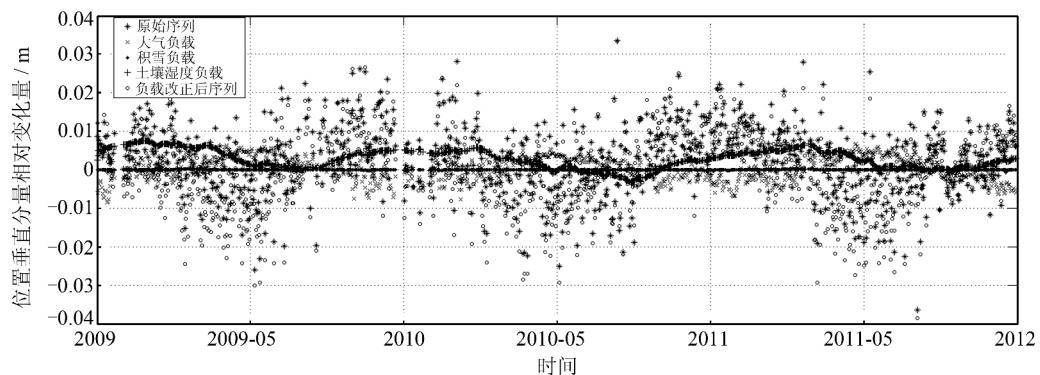


图 7 QMAN 站的位置(垂向分量)时间序列

Fig. 7 Position (Vertical Component) Time Series of QMAN

3.2.2 环境负载对测站时间序列的影响分析

为了判断大气负载和水文负载的改正效果,本文分3种方式对原始序列进行了改正,包括大气负载改正、水文负载改正、水文负载加大气负载改正,分别计算了改正前后时间序列的RMS差。RMS差定义为:

$$RMS_{(difference)} =$$

$$RMS_{(gps)} - RMS_{(gps - load)} \quad (1)$$

RMS的具体计算公式见文献[5]。RMS差为正,负载改正效果良好;若为负,则表示改正效果不理想。

计算62个参考站3种方式改正前后时间序列的RMS差,分别定义为RMS-RMS_{atm}、RMS-RMS_{hydro}、RMS-RMS_{atm}-RMS_{hydro},结果见表3,篇幅原因只列出了6个测站。

表 3 3 种负载改正方式的 RMS 值变化/mm

Tab. 3 RMS Changes of 3 Load Correction Methods/mm

站点	RMS- RMS _{atm}	RMS- RMS _{hydro}	RMS-RMS _{atm} - RMS _{hydro}
ANFU	-1.731	0.141	-1.203
CHYI	-1.642	0.014	-1.558
CREN	-1.21	-0.27	-1.219
QNAN	-1.418	0.391	-1.177
RUIJ	-1.21	0.146	-1.163
SHIC	-1.553	0.201	-1.205
:	:		:

由统计结果可知, 经过大气负载改正后, 所有测站位置序列的 RMS 值增大; 经过水文负载改正后, 76% 的测站位置序列 RMS 值减小。这表明在江西区域大气负载计算结果不太理想, 水文负载计算结果是可用的。

表 4 测站垂向位置周年及半年变化的振幅和初相

Tab. 4 Amplitude and Initial Phase of Annual and Semi-annual Terms

测站	原始时间序列				水文负载改正后的时间序列			
	周年项		半年项		周年项		半年项	
	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)	振幅/mm	相位/(°)
ANFU	3.317	108.573	2.611	267.647	2.806	152.588	2.300	271.677
ANYU	4.174	107.857	1.775	254.073	4.675	142.523	1.636	269.492
CHYI	4.162	100.661	0.952	286.335	4.028	136.914	1.041	306.987
:	:							:

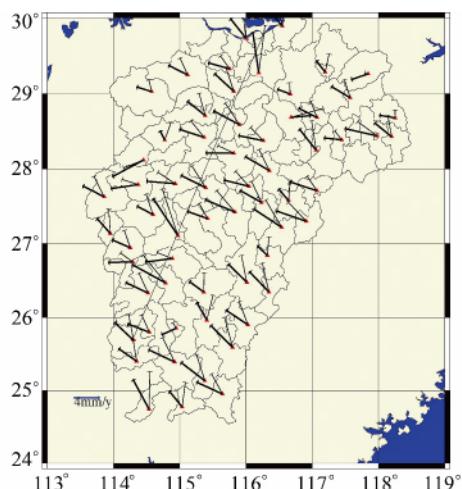


图 8 负载改正前(细)、后(粗)JXCORS 参考点垂向变化的周年项(正弦函数拟合, 参考点 2009.0)

Fig. 8 Annual Terms of Vertical Position Variations for the Fiducial Stations Before (Thin) and After(Thick) the Corrections to Effects Caused by Mass Loading (Fitting for a Yearly Sinusoidal Curve, with the Reference Time as 2009.0)

水文负载改正后, 虽然周年平均振幅增大 10%, 但初始相位有较大的变化(1~2 mon), 所以水文负载可能是 JXCORS 参考点垂向分量的

3.2.3 水文负载对参考站位置变化的影响

已有的研究表明, 参考点位置序列中的周年项和半年项周期变化^[4-5]在垂向分量上最为明显。本节通过周年项和半年项的振幅变化, 研究水文负载对参考站位置变化的影响。

在“WN + FN + RWN”噪声模型下, 利用 CATS 软件, 分别计算水文负载改正前后位置序列的年周期项和半年周期项的振幅和相位, 部分结果列于表 4 中。

数据统计得出, 29% 参考点经过水文负载改正后周年振幅减小, 平均周年振幅从改正前的 3.49 mm 增大到改正后的 3.85 mm; 66% 参考点经过水文负载改正后半年周期振幅减小, 平均半年周期振幅从改正前的 1.97 mm 减小到 1.88 mm。各参考站周年项变化见图 8。

周年变化的成因之一, 但是还有其他因素的影响, 例如温度变化造成的垂向位移等, 需要进一步分析; 半周年项的平均振幅减小 5%, 部分测站减小幅度较大(40%~50%), 所以水文负载是 JXCORS 参考点垂向分量的半年周期变化的成因之一, 对垂向分量的半年变化的影响与测站位置有关。

图 8 中, 箭头长度表示振幅, 东向逆时针旋转的方位角表示初相位方向, 箭头指向东、南、西、北方向依次表示极值发生在 0.25、0.50、0.75、0.0 a。

4 结语

本文以 JXCORS 为例分析了 CORS 参考点的长期稳定性, 分别从参考站位置的线性变化和非线性变化进行研究, 得出了一些结论。

1) 欧亚框架下, JXCORS 参考点的水平运动方向与其附近的陆态网站点具有一致性, 运动速率没有明显差异, 表明 JXCORS 参考点不存在明显的局部平面变形; 垂直方向上, 抬升和沉降的平均速率较小, 参考点较为稳定。

2) 为了分离形变信号和噪声, 利用最大似然

法获取了JXCORS参考站位置时间序列的最优噪声模型——“白噪声+闪烁噪声+随机漫步噪声”。在最优噪声模型下,根据水文负载改正前后的测站位置垂向分量的周年、半周年项的振幅和初相的变化,水文负载是JXCORS参考站位置垂向分量半周年周期变化的成因之一,可能是周年变化的成因之一,需要从更多的影响因素进一步分析。

参 考 文 献

- [1] Agnew D C, Bock Y, Wyatt F. Comments on NGS Proposed CORS Monumentation[EB/OL]. http://pfostrain.ucsd.edu/gpsmon/monument_design/ngscomments.pdf, 2013
- [2] Fisher B, Conway B. Evaluation of Survey Control Stations Height Stability in Subsidence Zones [EB/OL]. <http://www.surpriseaz.gov/DocumentCenter/Home/View/3769>, 2009
- [3] Liu Hongfei, Xiao Yugang, Deng Liansheng, et al. Analysis of Long-Term Stability of Reference Stations in GPS Deformation Monitoring System[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(1): 113-116(刘鸿飞,肖玉刚,邓连生,等. GPS 变形监测系统中基准站长期稳定性分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(1): 113-116)
- [4] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS-Derived Site Position Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (B4), DOI: 10.1029/2001JB000573
- [5] Li Zhao. Research on the Non-linear Variation of GPS Coordinate Time Serie[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(李昭. GPS 坐标时间序列的非线性变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012)
- [6] Li Qiang, You Xinzhaoyang Shaomin, et al. A Precise Velocity Field of Tectonic Deformation in China as Inferred from Intensive GPS Observations [J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 695-698 (李强,游新兆,杨少敏,等. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测: 现今速度场[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 55: 695-698)
- [7] Fu Yang. Present-Day Crustal Deformation in China and GPS-Derived Coordinate Time Series Analysis [D]. Shanghai: Shanghai Observatory, 2002(符养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2002)
- [8] Qiao Xuejun, Wang Qi, Wu Yun, et al. Time Series Characteristic of GPS Fiducial Stations in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(4): 413-416(乔学军,王琪,吴云,杜瑞林. 中国大陆 GPS 参考站的时间序列特征 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2003, 28(4): 413-416)
- [9] Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. Noise in GPS Coordinate Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B2): 2797-2816
- [10] Yuan L G, Ding X L, Chen W, et al. Characteristics of Daily Position Time Series from the Hong Kong GPS Fiducial Network[J]. *Chinese J Geophy*, 2008, 51(5): 1372-1384(袁林果,丁晓利,陈武,等. 香港 GPS 基准站坐标序列特征分析 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5): 1372-1384)
- [11] Mandelbrot B, van Ness J. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications[J]. *SIAM Review*, 1968, 10(4): 422-439
- [12] Xu Ying. Research on the Stability of GPS Reference Stations in Tianjin CORS[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(徐莹. TJCORS 参考站的位置稳定性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011)
- [13] Blewitt G, Lavallee D, Clarke P, et al. A new Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected[J]. *Science*, 2001, DOI: 10.1126/science.1065328
- [14] Blewitt G, Lavallee D. Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (B7), DOI: 10.1029/2001JB000570
- [15] Wang M, Shen Z K, Dong D N. Effects of Non-tectonic Crustal Deformation on Continuous GPS Position Time Series and Correction to them[J]. *Chinese J Geophys*, 2005, 48(5): 1045-1052(王敏,沈正康,董大南. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1045-1052)
- [16] Tian Yunfeng, Shen Zhengkang. Progress on Reduction of Non-tectonic Noise in GPS Position Time Series[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 31(1): 68-81(田云峰,沈正康. GPS 坐标时间序列中非构造噪声的剔除方法研究进展[J]. *地震学报*, 2009, 31(1): 68-81)

Long-Term Stability of Reference Stations by Taking Non-tectonic Deformation into Account

QIAN Chuang¹ LIU Hui¹ DING Zhigang² ZHENG Hongyan¹

1 Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Shandong CompStar Navigation Technology Co., Zibo 255086, China

Abstract: Continuously operating reference stations can provide continuous and reliable original data for surface displacement studies. Multiple reference stations' position time series(Coordinate time series) may reflect surface subsidence and movement trends in the region, and is the basis for further research on linear and non-linear change in the movement. In this paper, continuously operating reference station network in Jiangxi (JXCORS) is researched as an example. The phenomena of linear and non-linear changes in Jiangxi were studied based on the establishment of the position series for three years at each reference station. For the linear variation, local plane deformation is small (The difference of average rate and dominant direction with the nearby sites are less than 1 mm/a and 1.63° respectively, the change of elevation direction is comparative stable). The average lifting speed and settlement speed are 1.887 mm/a and 0.906 mm/a respectively. For the non-linear change, the vertical position of the reference stations has a semi-annual cycle, which is partially caused by hydrological load.

Key words: CORS; position time series; velocity field; ground settlement; non-tectonic deformation

First author: QIAN Chuang, PhD, specializes in high-precision GNSS data processing. E-mail:qforever112358@gmail.com

Corresponding author: LIU Hui, PhD, professor. E-mail:loweliu@263.net

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2012AA12A209.

(上接第 1246 页)

the availability for the proposed scheme and the old one were validated with the real-time data from HBCORS in China. Test results verify that, for a reference network with a station separation of about 120 km, user ambiguities can be fixed in several epochs, with real-time positioning precision for a user in the horizontal and vertical directions are 1 to 2 cm and 6.3 cm, respectively. Once the user ambiguities are successfully fixed, the new URTK service can support an almost unlimited number of users. In comparison with the 94.27% service effectiveness of the existing URTK scheme, the new scheme can fill these service gaps and provide users with more reliable and continuous service.

Key words: undifferenced network RTK; wide-area PPP-RTK; seamless transition; massive users; real-time precise point positioning

First author: ZOU Xuan, PhD, specializes in undifferenced network RTK and high accuracy data processing. E-mail:supermanzx1982@sina.com

Foundation support: The Open Foundation of the State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, No. SKLGED2013-4-9-E; National Natural Science Foundation of China, No. 41304028; Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (SR-FDP), No. 20130141120005; the National 863 Program of China, No. 2014AA123101.