

# GNSS 流动观测水平速度精度评估<sup>\*</sup>

占 伟 刘志广 苏建锋 夏 峰 孟宪纲

(中国地震局第一监测中心,天津 300180)

**摘 要** 利用 GNSS 连续观测数据评估了 GNSS 流动观测水平速度精度,并分析了相邻两期观测时间差、每期观测时长、观测周期对水平速度精度的影响。结果表明:按照目前的观测模式,流动观测与连续观测得到的水平速度值之差的绝对值在 3 mm/a 以内;相邻两期观测时间不一致会影响流动观测水平速度的精度,如果绝对值在 3 mm/a 以内的速度差为可接受值,那么建议相邻两期观测时期差应控制在 25 天之内;延长每期观测时间和缩短观测周期能提高流动观测水平速度精度。

**关键词** GNSS 流动观测;水平速度场;精度评估;观测时长;观测周期

中图分类号:P227

文献标识码:A

## ACCURACY EVALUATION OF HORIZONTAL VELOCITY MEASURED BY GNSS MOBILE OBSERVATION

Zhan Wei, Liu Zhiguang, Su Jianfeng, Xia Feng and Meng Xiangang

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180)

**Abstract** The accuracy of horizontal velocity measured by GNSS mobile observation was evaluated by continuous observation, and the effects of difference of observation time period between two adjacent observations, observation time and observation cycle on the accuracy were also analyzed. The results show that, according to the current observation style, the absolute value of difference of horizontal velocity between mobile and continuous observation is less than 3mm/a. The difference of observation time period between two adjacent observations can affect the accuracy of horizontal velocity. If the difference which is less than 3 mm/a can be accepted, it is suggested that the difference of observation time period in the two years should be less than 25 days. The accuracy can be improved by prolonging observation period and shortening observation cycle.

**Key words:** GNSS mobile observation; horizontal velocity field; accuracy evaluation; observation period; observation cycle

## 1 引言

自中国地壳运动观测网络(简称“网络工程”)和中国大陆构造环境监测网络(简称“陆态网络”)投入运行以来,已经产生了大量的 GNSS 连续和流动观测数据<sup>[1]</sup>。依据这些数据得到的地壳水平和

垂直速度场,已经成为中国大陆地壳运动、地震监测预报等多方面研究的基础<sup>[2-5]</sup>。

限于国情,网络工程和陆态网络都保留了数千个区域站。对于这些区域站,目前采用的流动观测模式为每隔 2~3 年观测一期,每期连续观测 4 天。

\* 收稿日期:2011-05-25

基金项目:中国地震局地震行业科研专项(200908029)

作者简介:占伟,男,1983 年生,工程师,主要从事 GNSS 数据处理与分析研究工作. E-mail:zw000373@163.com

与连续观测相比,流动观测存在观测周期长、观测时间短、观测仪器不一致等不足,因此流动观测得到的速度精度值得关注。尽管速度解算结果会给出各速度分量的精度,但这个精度只是内符合精度,至今还没有一种有效的外部手段来客观评估流动观测速度精度。鉴于此,本文基于 GNSS 连续观测数据,按照流动观测模式模拟流动观测数据,进而评估流动观测水平速度精度,并针对相邻两期观测时间差、每期观测时长、观测周期对该精度的影响进行了分析,以期流动观测模式的制定提供依据或参考。

2 水平速度精度的评估

2.1 评估方法

利用 GAMIT/GLOBK 10.34 解算了网络工程基准站及周边 IGS 站 1999—2009 年的观测数据<sup>[6]</sup>,从中选取较为稳定的 YANC 站数据用于分析。图 1 为 YANC 站 2004—2007 年东向和北向时间序列,分别

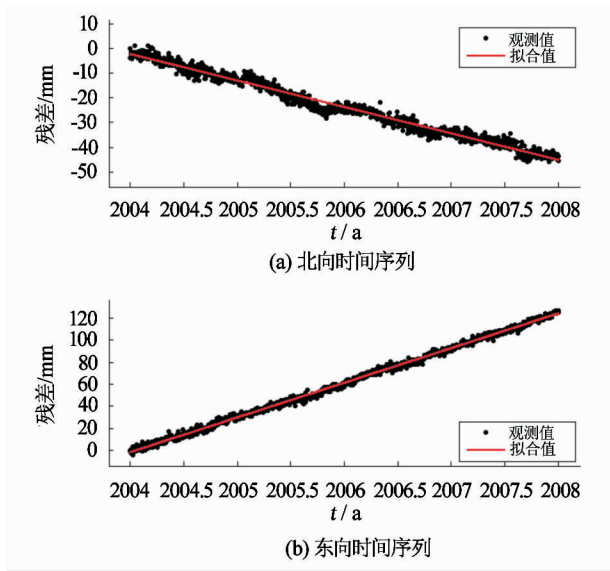


图 1 YANC 时间序列(2004—2007 年)  
Fig. 1 Time series of YANC station (2004—2007)

记为  $T_e$  和  $T_n$ ,去除线性运动后的残差标准差分别为 1.90 mm 和 1.74 mm。对  $T_e$  和  $T_n$  采用最小二乘求解的线性速度,分别记为  $V_{ec}$  和  $V_{nc}$ 。

由于 GNSS 观测会受到季节性因素的影响<sup>[7,8]</sup>,因此流动观测时要求同一测站相邻两期观测时间尽量一致。为此,首先分析相邻两期观测时间严格一致时流动观测水平速度与连续观测速度的差异。

将区域网 2004 年观测时段记为  $\Delta t_1$ ,在  $\Delta t_1$  内随机生成 100 组整数,记为  $d_1(i)$ , $1 \leq i \leq 100$ 。在  $T_e$  和  $T_n$  中从 2004 年和 2007 年第  $d_1(i)$  天起各截取 4 天数据,如随机生成的某一组整数为 84,则在  $T_e$  和  $T_n$  中截取 2004 年第 84~87 天和 2007 年第 84~87 天的数据。然后每期取坐标平均值和时间平均值,最后两期的坐标平均值之差除以时间平均值之差得到水平速度,分别记为  $V_{em}(i)$  和  $V_{nm}(i)$ 。

将 100 组  $V_{em}(i)$  和  $V_{nm}(i)$  分别与  $V_{ec}$  和  $V_{nc}$  求差,得到水平速度差分别记为  $\Delta v_{e1}$  和  $\Delta v_{n1}$ 。从表 1 可以看出,对于 YANC 站,不考虑诸如两期观测仪器不一致带来的观测误差等其他因素,观测 8 天得到的水平速度与连续观测值之差在  $\pm 1.27$  mm/a 以内。

2.2 不同噪声环境下的水平速度差异

由于选用的 YANC 站观测噪声较小,而大多数区域站达不到这个水平,为此另挑选了 9 个网络工程基准站进行计算(表 1),其中测站噪声水平表示测站东向和北向时间序列去除线性运动后的残差标准差。从表 1 可以看出,标准差的整体变化趋势随测站观测噪声的增大而增大。综合这 10 个测站的计算结果,观测 8 天得到的水平速度与连续观测值之差在  $\pm 3$  mm/a 以内。在实际的流动观测中,由于存在诸如两期观测仪器不一致带来的观测误差等影响因素,实际的流动观测得到的水平速度精度可能要更低一些。

表 1 不同噪声水平下的速度场差异

Tab.1 Difference of horizontal velocity with different level of noise

站名	测站噪声水平		东向			北向		
	东向 (mm)	北向 (mm)	最小值 (mm/a)	最大值 (mm/a)	标准差 (mm/a)	最小值 (mm/a)	最大值 (mm/a)	标准差 (mm/a)
DLHA	1.8	2.1	-1.61	1.12	0.48	-1.22	0.76	0.48
YANC	1.9	1.7	-1.08	1.06	0.43	-1.27	0.77	0.54
BJFS	2	2.6	-1.13	1.15	0.53	-0.94	1.93	0.7
CHUN	2.1	1.7	-1.4	0.87	0.54	-2.44	0.76	0.6
LHAS	2.4	2.5	-0.86	1.19	0.47	-1.31	1.4	0.59
ZHNZ	2.5	2	-1.78	1.46	0.65	-1.83	1	0.62
LUZH	2.5	2.3	-1.48	0.99	0.51	-1.73	1.32	0.64
GUAN	3.2	2.9	-1.85	1.64	0.82	-1.69	2.34	0.86
HRBN	3.4	1.9	-1.35	1.09	0.6	-1.85	1.22	0.69
QION	6.3	3.5	-2.93	2.98	1.5	-1.51	2.11	0.91

2.3 两期观测时间非严格一致

实际上,流动观测很难做到每一个测站相邻两期观测时间严格一致,尤其对于网络工程和陆态网络这样全国性的区域网,为此以 YANC 站为例分析相邻两期观测时间非严格一致时流动观测水平速度与连续观测速度的差异。

评估方法修改为:

$$d2(i) = d1(i) + \text{rand}[-d \ d],$$
$$d = 10, 15, 20, 25, 30, 1 \leq i \leq 100 ;$$

将得到的东向速度差和北向速度差分别记为  $\Delta v_{e2}$  和  $\Delta v_{n2}$ ,其统计信息见表 2,其中比例一列表示  $\Delta v_{e2}$  和  $\Delta v_{n2}$  在  $\Delta v_{e1}$  和  $\Delta v_{n1}$  分布范围的比例。从表 2

可以看出,季节性因素等非线性运动干扰对流动观测结果是有影响的,尤其是线性运动稍差的北向。从表 2 的“比例”一列来看,相邻两期观测时间差从 10 ~ 25 天的比例均在 95% 以上,说明这些结果较为接近相邻两期观测时间严格一致的结果,对观测精度的影响是可以接受的。而相邻两期观测时间差为 30 天的北向比例仅为 90%,与相邻两期观测时间严格一致的结果相差较大,对观测精度的影响较为严重。综合考虑实际情况和观测精度,建议流动观测相邻两期观测时间尽可能一致,如果达不到严格一致,按 2.2 节计算得到的  $\pm 3 \text{ mm/a}$  的速度差为可接受值,相邻两期观测时间差应控制在 25 天之内。

表 2 两期观测时间差对水平速度差异的影响

Tab.2 Effect of observation time difference on difference of horizontal velocity

两期时间差/天	东向				北向			
	最小值 (mm/a)	最大值 (mm/a)	比例 (%)	标准差 (mm/a)	最小值 (mm/a)	最大值 (mm/a)	比例 (%)	标准差 (mm/a)
0	-1.08	1.06	100	0.43	-1.27	0.77	100	0.54
10	-1.01	1.31	98	0.42	-1.64	0.69	97	0.58
15	-0.73	1.14	98	0.38	-1.30	0.76	98	0.49
20	-0.79	1.25	99	0.40	-1.55	0.88	96	0.48
25	-0.63	1.06	100	0.40	-1.49	0.88	95	0.49
30	-0.94	1.46	96	0.45	-1.70	0.88	90	0.58

3 观测模式对水平速度精度的影响

3.1 观测时长的影响

按照 2.1 节方法,选用 10 个网络工程基准站的数据计算了观测时长为 2 ~ 14 天时流动观测与连续观测的水平速度差,其标准差随时间变化曲线见图 2,其中(a)为东向速度差的标准差,(b)为北向速度差的标准差,为了使图形更清楚,在图 2(a)中将 CHUN、DLHA、HRBN、JIXN、LHAS 站曲线分别整体向上移动 0.8、0.4、0.5、0.5、0.65 mm,将 QION 站

曲线整体向下移动 0.5 mm,在图 2(b)中将 CHUN、HRBN、ZHNZ 站曲线分别整体向上移动 0.4、0.1、0.4 mm。从图 2 可以看出,速度差的整体变化趋势是随着观测时间的延长而减小。以各站每期观测 4 天得到的速度差的标准差为基准,统计各站每期观测 5 ~ 8 天得到的速度差的标准差与基准的比值,结果列于表 3。从表 3 中可以看出,对于不同的测站,延长观测时间提高观测精度的幅度是不一样的,因此在制定观测方案时需要综合考虑精度要求、观测成本、测站噪声水平等因素。

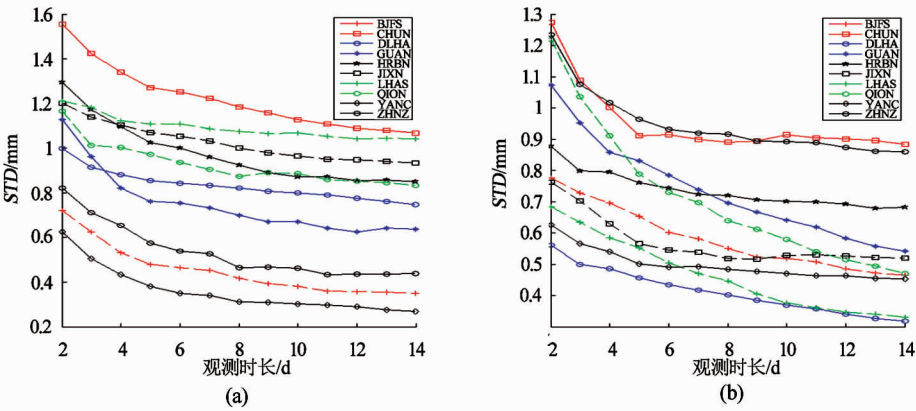


图 2 观测时长对水平速度差异的影响

Fig.2 Effect of observation days on difference of horizontal velocity

表 3 观测 5~8 天得到的结果与观测 4 天结果的比值

Tab.3 Ratio of results with 5-8-day observation to results with a 4-day observation

站名	天数	北向比例 (%)	东向比例 (%)	站名	天数	北向比例 (%)	东向比例 (%)
BJFS	5	90.2	93.8	JIXN	5	94.3	89.9
	6	87.5	86.5		6	91.6	86.7
	7	84.8	83.5		7	88.2	85.6
	8	78.3	79.1		8	82.9	82.2
CHUN	5	86.9	84.7	LHAS	5	97.3	94.4
	6	83.3	85.4		6	97.3	86.2
	7	78.0	82.9		7	92.7	80.2
	8	71.2	81.4		8	90.0	76.3
DLHA	5	94.8	94.2	QION	5	97.9	86.6
	6	92.1	89.6		6	95.4	80.2
	7	90.5	86.1		7	93.5	76.6
	8	88.0	83.0		8	91.3	70.2
GUAN	5	92.8	96.8	YANC	5	87.9	92.8
	6	91.8	91.3		6	80.9	90.8
	7	89.0	85.9		7	78.4	91.1
	8	85.1	81.1		8	71.6	89.6
HRBN	5	88.3	95.1	ZHNZ	5	88.0	91.3
	6	84.0	92.8		6	82.5	86.2
	7	77.3	89.7		7	80.5	84.3
	8	71.0	89.2		8	71.0	83.7

3.2 观测周期的影响

选择 YANC 站 2001—2007 年共 7 年的东向和北向时间序列,观测时长设为 4 天,计算方法与 2.1 节方法大体一致,只是多期观测数据采用线性拟合的方法求解水平速度,例如观测周期为 3 年,则有 2001、2004、2007 年 3 期共 12 天观测数据,对这 12 天数据线性拟合解算速度。表 3 为观测周期分别为 1、2、3、5 年时流动观测与连续观测水平速度差的标准差。从表 4 可以看出,观测周期越短,流动观测结果就越接近连续观测结果。因此,加密观测也是一种提高流动观测水平速度精度的有效手段。

表 4 观测周期对水平速度场的影响

Tab.4 Effect of observation cycle on the difference of horizontal velocity

观测周期 (年)	观测次数 (次)	N 向标准差 (mm/a)	E 向标准差 (mm/a)
1	7	0.25	0.29
2	4	0.28	0.38
3	3	0.28	0.43
5	2	0.31	0.50

4 结语

1)综合 10 个测站的计算结果,观测 8 天得到的水平速度与连续观测值之差在  $\pm 3\text{ mm/a}$  以内。在实际的流动观测中,由于存在诸如两期观测仪器不一致带来的观测误差等影响因素,得到的水平速度

精度还可能会更低一些。

2)受季节性因素的干扰,相邻两期观测时间不一致会降低流动观测水平速度的精度,建议流动观测相邻两期观测时间尽可能一致。如果实际观测时达不到严格一致,仍以  $\pm 3\text{ mm/a}$  为可接受偏差,那么相邻两期观测时间差应控制在 25 天之内。

3)流动观测与连续观测水平速度差会随着测站观测噪声的增加而显著增大,对于观测噪声较大的测站,建议在实际观测中延长观测时间。

4)延长观测时间并缩短观测周期能提高流动观测速度精度。对于不同的测站,延长观测时间提高观测精度的幅度是不一样的,因此在制定观测方案时需要综合考虑精度要求、观测成本、测站噪声水平等因素。

致谢 感谢黄立人研究员对本文的指导。

参 考 文 献

1 牛之俊,等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学,2002,(3):88-93. (Niu Zhijun, et al. Crustal Movement Observation Network of China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002,(3):88-93)

2 Wang Qi,et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. Science,2001,294:574-577.

3 黄立人,等. 用速度场得到的华北地区活动块体及变形[J]. 地震学报,2003,25(1):72-81. (Huang Liren, et al. References active blocks and their deformations derived from the velocity field in north China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(1):72-81)

4 赖锡安,等. 中国大陆现今地壳运动[M]. 北京:地震出版社,2004. (Lai Xi'an, et al. Present-day crustal movement in China constrained [M]. Beijing: Seismological Press, 2004)

5 杨国华,等. 中国大陆整体无旋转基准及其应用[J]. 大地测量与地球动力学,2005,(4):6-10. (Yang Guohua, et al. No-net-rotation on crustal movement of China mainland and its application[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005,(4):6-10)

6 占伟,等. GNSS 参考框架点的选取对时序位移的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2011,(1):91-94. (Zhan Wei, et al. Effect of selecting GNSS frame sites on the time series of displacement[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,(1):91-94)

7 张飞鹏,等. 利用 GPS 监测中国地壳的垂向季节性变化[J]. 科学通报,2002,47(18):1370-1377. (Zhang Feipeng, et al. Crustal vertical seasonal variations in China observed by GPS[J]. Chinese Science Bulletin,2002,47(18):1370-1377)

8 王敏,等. 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. (Wang Min, et al. 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)