

GNSS 连续站在天津地面沉降监测中的应用*

高艳龙 郑智江 韩月萍 付黎明 陈阜超

(中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘要 讨论单纯利用水准测量方法进行地面沉降监测时,由于基准点的变动造成地面沉降监测结果的不确定问题,提出用 CORS 站时间序列得到的高程分量变化速率与复测水准资料联合处理结果作为水准变化的速率基准,并利用实例与传统做法进行了比较,验证了该方法的优点。

关键词 地面沉降监测;CORS 站;高程分量;时间序列;速率基准

中图分类号:P207;P315.72⁺⁵

文献标识码:A

APPLICATION OF CORS OF GNSS IN LAND SUBSIDENCE MONITORING IN TIANJIN

Gao Yanlong, Zheng Zhijiang, Han Yueping, Fu Lming and Chen Fuchao

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

Abstract The difficulties and uncertainties caused by reference datum changes in land subsidence estimation are discussed. In order to solve the difficulty, the method in which the velocity datum is determined by the observed elevation variations time series combined with the repeated leveling data at several GNSS stations is presented. Some practical examples are given for the comparison between this method and the traditional one, it is proved that the new method has some advantages. On the basis of these results, some recommendations about the land subsidence monitoring and the evaluation method in the Tianjin area are proposed. These recommendations may have some helps for land subsidence monitoring and evaluation in other similar areas.

Key words: land subsidence monitoring; CORS (continuously operating reference station); elevation component; time series; velocity datum

1 引言

地面沉降监测中,地面沉降速率基准的确定是一个难题。通常是在被认为地质构造稳定的地区建立一个或数个基岩水准点,作为其检测基准。实践证明,这种做法有很大的弊病:一是在河口三角洲地区和覆盖层很厚的山前冲积平原、黄土地区,建立基岩基准点十分困难,例如天津市区基岩深达上千米,建立基岩监测点不但造价很高,且本身的稳定性也

难以保证;二是为了选取相对稳定的基岩地区,基岩点又不得不建在远离监控区的地方,使得水准监测的误差积累很大,影响监测结果的可靠性,当沉降量相对较小(例如 ≤ 10 mm/a)时,往往达不到有效监测的目的;三是通过长期的监测发现,即使是精心选埋的基准点,本身也在变化。当将这些点当作基准点时,不可避免地将这种变化叠加到监测结果中,直接影响到监测结果的可靠性。为解决这些问题,本文将探讨如何利用 GNSS 连续站的高程分量变化速

* 收稿日期:2012-04-24

基金项目:中国地震局地震研究所所长基金(IS201166003)

作者简介:高艳龙,男,1963年生,工程师,主要从事大地形变监测,地震预报及地震资料处理工作. E-mail: jedyg108@sina.com

率作为地面沉降速率基准的可能性。

2 GNSS 观测得到的高程分量的周年变化特征

天津地区于 2004 年建成了一个由 12 个 GNSS 连续站构成的 VRS 参考站网(CORS 网)(图 1)。

多年的观测发现,GNSS 站坐标的高程分量的时间序列存在明显的规律性变化,特别是以年为周期的变化特别明显(图 2)。事实上这种现象在我国其他地区的 GNSS 连续站也普遍存在^[1-5]。对于周

年变化的原因虽然并未完全搞清楚,但他们可能与环境温度、湿度、大气环流、降水、地下水位变化,以及与地球绕太阳的公转运动等因素有关^[6]。

3 利用 GNSS 连续站的高程分量变化速率作为地面沉降速率基准的可行性

有些研究者从 GNSS 高程分量测量精度的角度,讨论过地面垂直变形监测中应用 GNSS 技术监测地面沉降的可能性^[7],本文则进一步讨论 GNSS 技术与水准测量技术联合监测地面沉降的问题。由于水准复测在每年大致相同的“时间”进行,因而采用 GNSS 连续站的高程分量变化速率与复测水准资料联合进行动态平差时,必须使 GNSS 得到的速率值在时间上与复测水准同步,即采用同一时间段、去除了可能的野外值^[8]以后的高程分量观测时间序列,并去除其中的周期性变化。在确定 GNSS 连续站的沉降速率时,我们用去除了年周期项所确定的线性沉降速率和误差估计,作为联合数据处理时速率观测方程中的观测值和对该观测值加权的依据。根据对天津市 12 个 CORS 站的数据处理结果表明,比一年更短的周期变化都不能通过显著性检验。另外还需要说明的是,GNSS 的高程分量实际是大地高,而水准测量的是正高,但文献^[7]已经证明,用 GNSS 测得的大地高变化取代正高变化,两者相差 $\cos\gamma$ (其中 γ 为垂线偏差),在天津地区 γ 很小,因此可以认为 $\cos\gamma \approx 1$ 。当然这些用作速率基准的 CORS 站必须在每一期水准复测时都与水准观测网进行联测。

用 CORS 高程分量变化时间序列确定沉降速率的公式为:

$$L_i + V_i = a_0 + b_0 T_i + A_1 \cos(2\pi T_i) + B_1 \sin(2\pi T_i) \quad (1)$$

式中, L_i 为观测时间段内第 i 个 GNSS 高程分量观测值, V_i 为相应的残差, a_0 为该时段内高程分量均值, b_0 为要求的该时段内高程分量年变速率, T_i 为该观测值的以年的小数表示的归零后的观测时间, A_1 、 B_1 为年周期变化的余弦和正弦分量幅度。

利用观测时间段内的高程分量时间序列中的所有观测值,就可用最小二乘法求出式(1)中的待求参数和它们的误差估计。需要说明的是,这里的 b_0 及其误差估计就是用来与相应时间段的水准复测结果联合进行动态平差时组成速率观测方程,速率观测方程与高差观测方程一起组成法方程求解,最终求出所有复测水准点和作为速率观测值的 CORS 站

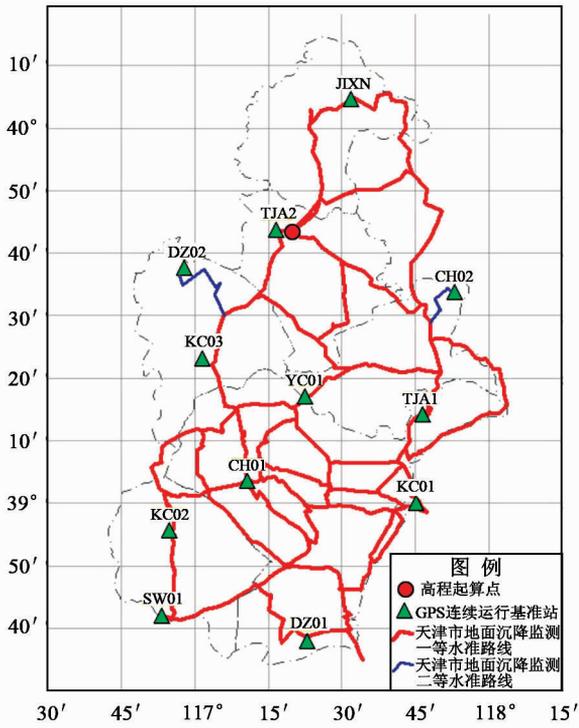


图 1 天津地区 CORS 网站点及地面沉降一等水准网分布

Fig. 1 Distribution of the first order leveling network and CORS network in Tianjin for land subsidence monitoring

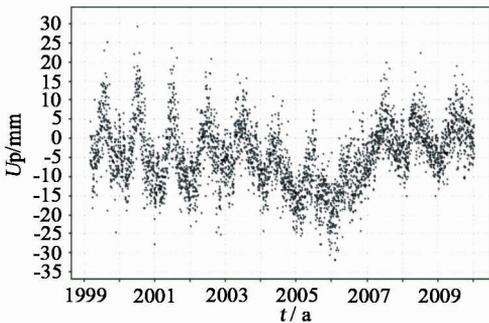


图 2 天津蓟县站站坐标高程分量时间序列

Fig. 2 Time sequences of coordinate elevation component of the Jixian station of Tianjin

的年变线性速率。但严格来说,GNSS 观测值与水准测量观测值是两类不同的观测值同时进入平差,需要进行方差估计,以确定适当的权比^[9,10]。但当速率观测值个数与水准观测的观测值个数相差悬殊时,严格的方差分量估计经常会不收敛。因此本文没有采取这种严格的方法,而是直接使用时间序列分析得到的速率方差估计值的倒数为这些速率观测值加权。不过最终得到的单位权方差验后估计与单纯采用水准资料处理的结果十分接近,表明速率加权采用的数值是基本合理的。在以后处理大区域水准和 GNSS 资料时,可能用到更多的 GNSS 站,将再尝试采用严格的方差估计结果对 GNSS 的速率观测值加权。

由于天津地区是一个地面沉降严重而且变化较大的地区。因此天津市政府每年在固定的时间对全市进行水准复测,为此本文采用同一时间段内 GNSS 连续站的结果求得的沉降速率观测值与水准资料联合处理,防止了采用更长时间的时间序列得到的平均速率而使求得的当年沉降结果受到歪曲的弊病。而这些速率观测值的可靠性可以从文中给出的相应的误差估计结果得到证明。

4 算例和比较

2008—2009 年的解算资料来源于天津市 9 个 GORS 站 (DZ01、DZ02、KC01、KC02、TJA1、TJA2、CH01、CH02 和 SW01), 2009—2010 年的来源于 DZ01、DZ02、KC01、KC02、TJA1、TJA2、CH01、CH02 和 JIXN 站,以及相应年份的地面沉降监测网的全部一等水准复测资料,采用 CORS 站速率基准方法和单水准基岩点假定速率为零方法,用同样的水准复测资料求得的地面沉降结果作了比较。网中约有 450 个点(每相邻两期间由于水准点破坏、补埋等原

因会略有不同)单期一等水准路线长约 1 600 千米(图 1)。由于篇幅,本文只给出一些表征两种方法结果的比较数据。其中表 1 是 2008—2009 年两种方法所得结果的比较,表 2 是 2009—2010 年两种方法所得结果的比较。表 1、2 中,单水准基准点法是指经典动态平差法,即假定一个基准点的高程不变且其速率为零的动态平差法(过去天津市的地面沉降监测一直使用这种方法),而用 CORS 速率观测值与复测水准联合作动态平差时,不再存在速率基准缺失问题,因而不需要给一个假定的速率基准。表 3、4 给出了两期沉降数据处理时所用到的各 CORS 站的速率观测值及误差估计,表的最后一列则给出了表征 CORS 站运行情况的有效观测值个数(应有观测值个数应为 365 或 366 个(闰年))。图 3(a)~(d)则为两期沉降观测的两种方法得到的沉降速率误差等值线图。图 3(a)与(b)比较、图 3(c)与(d)比较可以看出加入 CORS 站的速率观测值后,速率误差比传统方法的大为减小且更加均匀。

5 讨论

1)由图 1 可以看出天津 12 个 CORS 网站点大部分均匀分布在天津地面沉降一等水准网中或周围,能对复测水准网起到很好的控制作用。

2)通过算例中表 1 和表 2 数据以及图 3(a)~(d)可以看出,利用与地面沉降观测时间对应的高程分量时间序列,建立以 CORS 站的高程变化速率观测值为速率基准的方法有效地解决了起算点离测线过远而造成误差累积过大和起算点自身运动而引入的变化量的叠加等问题,速率误差均值明显减小,且分布较为均匀,资料处理效果有显著的提升。

表 1 2008—2009 年结果比较

Tab. 1 Comparison between results of Tianjin land subsidence monitoring in 2008 and 2009

沉降计算方法	水准测量单位权中误差 (mm/km ^{1/2})	速率误差最大值 (mm/a)	速率误差最小值 (mm/a)	各监测点速率误差均值(不包括 CORS 站, mm/a)	方法 1 与 2 的速率最大差值 (mm/a)
速率基准法	0.66	5.97	0.51	3.60	7.07
水准基准点法	0.66	8.36	0.00(速率基准点)	6.02	

表 2 2009—2010 年结果比较

Tab. 2 Comparison between results of Tianjin land subsidence monitoring in 2008 and 2009

沉降计算方法	水准测量单位权中误差 (mm/km ^{1/2})	速率误差最大值 (mm/a)	速率误差最小值 (mm/a)	各监测点速率误差均值(不包括 CORS 站, mm/a)	方法 1 与 2 的速率最大差值 (mm/a)
速率基准法	0.84	8.91	0.64	4.82	22.43
水准基准点法	0.70	9.81	0.00(速率基准点)	7.281	

表3 2008—2009 天津 GNSS (CORS) 连续站观测值高程分量速率误差

Tab.3 Mean square errors of observed elevation component velocity at Tianjin GNSS (CORS) stations in 2008 - 2009

序号	测站名	起止时间(历元)	速率误差 (mm/a)	有效观测天数
1	CH01	2008.7900—2009.7870	0.84	361
2	CH02	2008.7900—2009.7870	0.94	361
3	DZ01	2008.7900—2009.7870	0.78	362
4	DZ02	2008.7900—2009.7870	0.98	332
5	KC01	2008.7900—2009.7870	0.98	359
6	KC02	2008.7900—2009.7870	0.78	362
7	SW01	2008.7900—2009.7870	0.91	361
8	TJA1	2008.7900—2009.7870	0.83	361
9	TJA2	2008.7900—2009.7870	0.77	362

表4 2009—2010 天津 GNSS (CORS) 连续站观测值高程分量速率误差

Tab.4 Mean square error of observed elevation component velocity at Tianjin GNSS (CORS) stations in 2009 - 2010

序号	测站名	起止时间(历元)	速率误差 (mm/a)	有效观测天数
1	CH01	2009.7900—2010.7870	0.87	364
2	CH02	2009.7900—2010.7870	1.07	362
3	DZ01	2009.7900—2010.7870	0.86	347
4	DZ02	2009.7900—2010.7870	1.02	355
5	KC01	2009.7900—2010.7870	1.07	358
6	KC02	2009.7900—2010.7870	0.76	362
7	TJA1	2009.7900—2010.7870	0.92	364
8	TJA2	2009.7900—2010.7870	0.93	364
9	JIXN	2009.7900—2010.7870	1.05	354

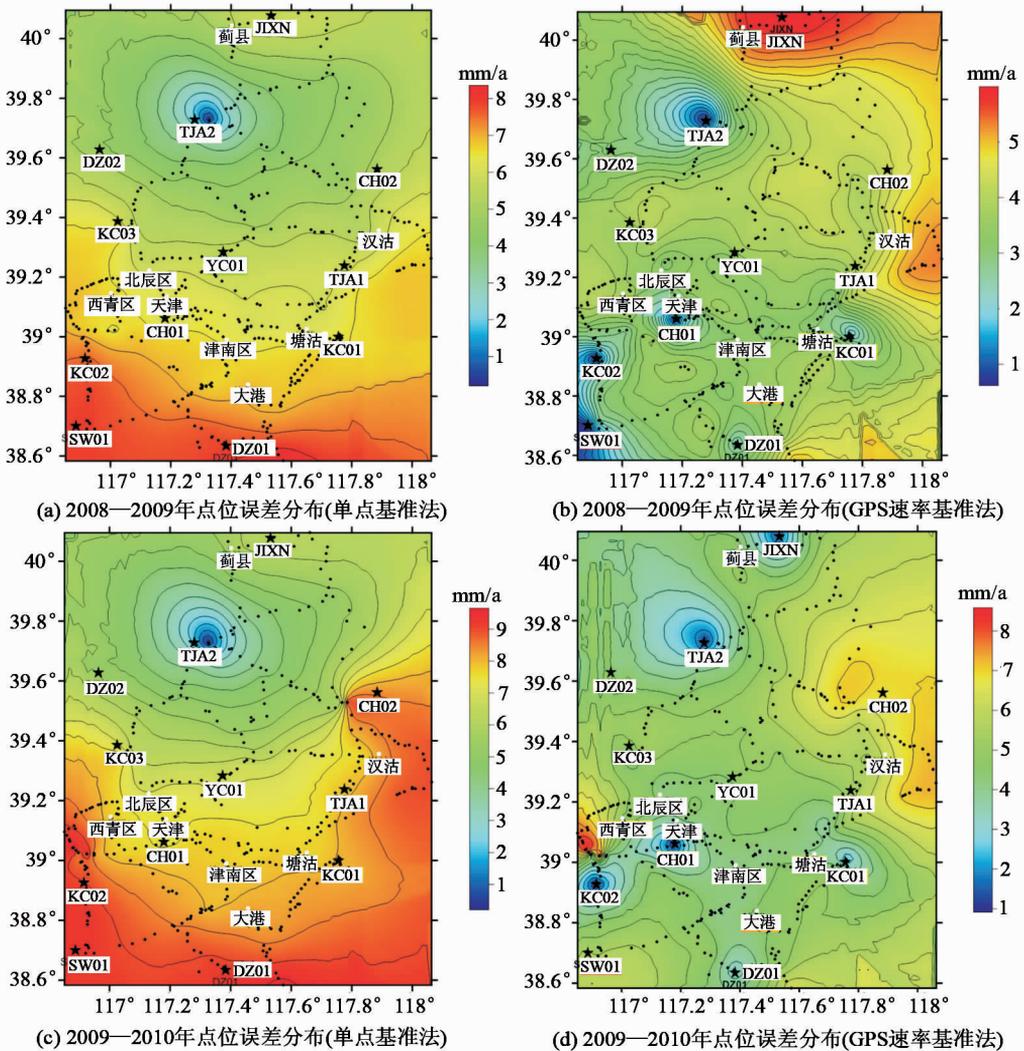


图3 点位误差分布

Fig.3 Distribution of mean square error of point

3) 通过连续运行基准站高程变化速率观测值为基础建立的速率基准的方法的引入,有效地解决了地面沉降监测网的速率基准问题,对计算结果起到了去“伪”存“真”的效果。读者可能注意到在表

2中,两种方法在有的点上,所得的沉降量相差甚至达到22毫米。在当时的沉降监测结果的分析时就发现当年监测的结果沉降量出乎意料的大,怀疑可能速率基准点本身产生了变化。通过这次加入

CORS 站速率观测值计算结果的分析得到了证实。所以本文方法可以得到更为客观的沉降值。

参 考 文 献

- 1 黄立人,等. GNSS 连续站坐标的高程分量时间序列在地壳垂直运动研究中应用的若干问题[J]. 大地测量与地球动力学,2012,(4):1-5. (Huang Liren, et al. Several issues in application of elevation component time series of GNSS CORS on vertical crustal movement studying [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012,(4):1-5)
- 2 朱文耀,符养,李彦. GPS 高程导出的全球高程振荡运动及季节变化[J]. 中国科学 D 辑,2003,5(1):470-481. (Zhu Wenyao,Fu Yang and Li Yan. The global height oscillation and seasonal variation derived from GPS height[J]. Science in China D Ser,2003,5(1):470-481)
- 3 杨强,党亚民,秘金钟. 基于 IGS 连续跟踪站的 GPS 高程时间序列分析[J]. 测绘科学,2007,3(1):55-56,27. (Yang Qiang, Dang Yamin and Mi Jinzhong. Analysis of GPS time series of height component based on IGS continuous observation stations[J]. Science of Surveying and Mapping,2007,3(1):55-56,27)
- 4 黄立人,等. GPS 连续站在地面沉降监测中的应用[J]. 工程地质学报,2005,(S1):94-97. (Huang Liren, et al. The Application of GPS continuous stations in Monitoring ground subsidence [J]. Journal of Engineering Geology, 2005,(S1):94-97)
- 5 董克刚,等. 利用 GPS 监测天津市地面沉降的可行性研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,(4):68-71. (Dong Kegang, et al. Study on Monitoring Land Subsidence in Tianjin with GPS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008,(4):68-71)
- 6 田云峰,沈振康. 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):68-80. (Tian Yunfeng and Shen Zhengkang. Progress on reduction non-tectonic noise in GPS position time series [J]. Acta Seismologica Sinica, 2009,31(1):68-80)
- 7 黄立人,匡绍君. 论地面垂直变形监测中应用 GPS 技术的可能性[J]. 地壳形变与地震,2000,(1):30-37. (Huang Liren and Kuang Shaojun. Vertical Deformation Measurement [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2000,(1):30-37)
- 8 王鑫,等. 用 Ormige 剔除线性拟合中实验数据的异常值[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2003,17(1):45-49. (Wang Xin, et. al. Data rejection in linear fitting using Oringe [J]. Journal of Shanxi Teacher's University (Natural Science Edition), 2003,17(1):45-49)
- 9 黄立人. 测网中两个方差因子的估计[J]. 大地测量与地球动力学,1989,(1):46-51. (Huang Liren. Estimation of two variance components in trilateration network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,1989,(1):46-51)
- 10 李希峰,岳东杰,卫柳艳. 赫尔默特方差分量估计在混合水准网平差中的应用[J]. 现代测绘,2005,28(5):20-22. (Li Xifeng, Yue Dongjie and Wei Liuyan. The application of helmert-WF variance component estimation in mixed leveling control network [J]. Journal of Modern Surveying and Mapping,2005,28(5):20-22)
- 11 吕坚,等. 汶川 8.0 级地震序列重新定位及其发震构造初探[9]. 地震地质,2008,30(4):917-925. (Lü Jian, et al. Discussion on relocation and seismo-tectonics of the Ms8.0 Wenchuan earthquake sequences [J]. Seismology and Geology,2008,30(4):917-925)
- 12 张天中,等. 近台资料对近震相对定位算法的影响[J]. 地球物理学报,2007,50(4):1123-1130. (Zhang Tianzhong, et al. Effect of the data recorded at nearby stations on earthquake relative location [J]. Chinese Journal of Geophysics,2007,50(4):1123-1130)
- 13 吕坚,等. 2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 Ms5.7、Ms4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报,2008,51(1):158-164. (Lü Jian, et al. Focal mechanisms and seismic fault of Ms5.7、Ms4.8 Jiujiang-Ruichang earthquake on Nov. 26,2005 [J]. Chinese Journal of Geophysics,2008,51(1):158-164)
- 14 胡幸平,等. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报,2008,51(6):1711-1718. (Hu Xingping, et al. Focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake and its strong aftershocks obtained from initial P wave polarity analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics,2008,51(6):1711-1718)
- 15 郑勇,等. 汶川地震强余震 ($M_s \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学(D 辑),2009,39(4):413-426. (Zhen Yong, et al. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008-05-12 Wenchuan earthquake and the implication for seismo-tectonics [J]. Science in China (Ser D),2009,39(4):413-426)
- 16 李传友,等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带北川以北段的基本特征[J]. 地震地质,2008,30(3):683-696. (Li Chuanyou, et al. Characteristics of the surface rupture zone of the Ms8.0 Wenchuan earthquake, China along the segment north to Beichuan [J]. Seismology and Geology,2008,30(3):683-696)

(上接第 21 页)

sequence of Wenchuan earthquake [J]. Chinese Sci Bull., 2009,54: 2 263-2 270)