

文章编号: 1000-7598-(2003) 06-0931-04

大范围地面沉降的差分 GPS 监测法

熊春宝¹, 唐立刚¹, 匡绍君², 黄立人³

(1. 天津大学 建工学院, 天津 300072; 2. 天津市控制地面沉降办公室, 天津 300042; 3. 国家地震局第一地形变监测中心, 天津 300180)

摘 要: 详细介绍了差分 GPS 静态测量和动态测量两种测量模式应用于大范围地面沉降监测的工作原理, 探讨了 GPS 测量与水准测量, 这两种方法因测量基准面不同, 而使得所测地面沉降量存在的差异。将差分 GPS 静态测量模式实际应用于天津市的地面沉降监测, 通过对其 4 年的实际测量精度的分析表明, 对于大范围地面沉降监测, 采用差分 GPS 静态测量法取代长距离的一等精密水准测量是完全可行的。

关 键 词: 地面沉降; GPS (全球定位系统); 差分; 监测

中图分类号: TU 433; P22 **文献标识码:** A

Method of differential GPS to monitor large-scale land subsidence

XIONG Chun-bao¹, TANG Li-gang¹, KUANG Shao-jun², HUANG Li-ren³

(1. School of Constructional Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Control Land Subsidence Office, Tianjin 300042, China; 3. First Land Deformation Monitoring Center, State Seismological Bureau, Tianjin 300180, China)

Abstract: The methods of monitoring large-scale land subsidence by static and kinematic differential global positioning system (DGPS) were described in detail. Resulting from different reference planes, the difference between the measured subsidence by GPS and by leveling were investigated. An example of monitoring Tianjin land subsidence by GPS was given. Through analyzing the accuracy of Tianjin land subsidence monitored by GPS in 1999-2002, it was shown that static DGPS can take the place of long-distance precise leveling for monitoring large-scale land subsidence.

Key words: land subsidence; GPS (global positioning system); differential; monitoring

1 引 言

GPS (全球定位系统) 是当今世界上最先进的大地测量定位技术之一, 已广泛应用于各有关领域。采用 GPS 精确地测量地面的平面位置已成现实, 但还未能将其普遍应用于测量地面的高程或沉降。究其原因, 主要有两点: 其一, 采用传统几何水准测量方法测高程所依据的基准面是大地水准面, 而 GPS 测高程所依据的基准面是参考椭球面, 这两个基准面之间处处有差距, 且其差距无简单的规律可循; 其二, GPS 所测高程的精度比所测平面位置的精度要低^[1~3]。

近年来, 随着精化大地水准面研究工作的进展、GPS 卫星星座的完善、地面测控精度的提高、数据处理软件的改进以及 GPS 用户接收机的型号不断更新, 使得 GPS 测量定位的模式、精度和速度

都有了较大地改进和提高^[4]。采用 GPS 技术进行地面沉降的监测, 因点与点之间不受通视条件、距离和高差的限制, 其工作效率大大高于同精度的几何水准测量, 目前, 在理论和技术上也已成为可能。笔者将差分 GPS 技术应用于天津市地面沉降监测的工作中, 在实践中取得了较满意的成果^[5]。

2 差分 GPS 监测地面沉降的工作原理

2.1 GPS 单点绝对定位

GPS 系统是由美国军方于 20 世纪 80 年代末建成的, 它由 24 颗卫星 (含 3 颗备用卫星) 组成, 这些卫星分布在 6 个轨道面内, 轨道的平均高度约为 20 200 km, 卫星运行周期为 11 h 58 min, 这样使得在任何时刻全球任何地点的地平线以上卫星数不少于 4 颗, 最多可达 11 颗。

设将 GPS 定位仪的天线安置在地面的某个测点

上, 定位仪接收到 GPS 卫星的信号以及信号从卫星到达测点的时间延迟 t , 由此, 可以算得卫星与测点之间的直线距离 d 为

$$d = ct \quad (1)$$

式中 c 为信号的传播速度。

d 与卫星坐标 (x_s, y_s, z_s) 和测点坐标 (x, y, z) 之间又有如下关系:

$$d = [(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2]^{1/2} \quad (2)$$

卫星的瞬时坐标 (x_s, y_s, z_s) 可根据接收的卫星导航电文求得, 故在上式中仅有三个未知数 x, y, z (这里 z 即为测点的大地高程), 如果定位仪同时接收三颗或三颗以上卫星的信号及时间延迟 t , 就可以列出三个或三个以上形似式 (1) 和式 (2) 的方程, 从理论上讲, 这样就能解算出测点的三维坐标 x, y, z , 从而, 得到测点的大地高程。对地面上某一点所测两次的大地高程之差即为此点在这两次期间的沉降量。这种仅用一台 GPS 定位仪独立确定测点三维坐标的方法称为 GPS 单点绝对定位。

实际上, 式 (1) 和式 (2) 中的 d 只是测得的伪距, 它含有卫星钟差、定位仪钟差以及电离层和对流层的折射误差等, 其不含误差的实际距离应为

$$d' = d + \delta d_i + \delta d_t - cv_a + cv_b \quad (3)$$

式中 δd_i 为大气中电离层的折射改正数; δd_t 为对流层的折射改正数; v_a, v_b 为信号在发射和接收时刻的卫星和接收机的钟差改正数。由于存在上述误差, 伪距测量的精度只能达到米级, 这也是 GPS 单点测量法所能达到的精度。

2.2 GPS 差分相对定位

差分相对定位法 (Differential GPS 简称 DGPS) 可以很好地消除上述卫星钟差、定位仪钟差以及电离层和对流层的折射误差等。这种方法是将一台定位仪安置在地面某一坐标已知的基准点上, 同时, 另一台定位仪安置于地面沉降监测点上。由于两台定位仪在同一时刻所测伪距中, 均含有类似于卫星钟差、定位仪钟差、电离层和对流层的折射误差等这样的一些共有的系统误差, 且在测区的一定范围内, 两台定位仪的共有系统误差基本相等, 因此, 在测得基准点的共有系统误差值 (实测坐标与其已知坐标之差) 之后, 以此对沉降监测点的坐标进行改正, 则可得到沉降监测点的精确坐标值。

差分相对定位有静态和实时动态 (Real Time Kinematic, 简称 RTK) 两种测量模式。静态测量是在能够构成一个三角形或大地四边形的几个监测点上 (其中至少一点的坐标已知) 安置定位仪, 同时连续观测数小时或数十小时, 然后, 在室内进行平

差解算, 求得各监测点的坐标; 实时动态测量是在一个基准点和一个监测点上安置定位仪, 同时观测一秒或几秒钟, 并通过基准点和监测点上的电台通讯, 将基准点上求得的共有系统误差值实时传至监测点上, 并对监测点坐标进行实时改正。静态测量比实时动态测量费时, 但精度要高。

2.3 GPS 高程与水准高程的差异

GPS 测量所依据的基准面为一纯数学面——地球椭球面; 水准测量所依据的基准面为一与重力有关的物理面——大地水准面。二者既不重合, 也不平行, 如图 1 所示, 地面点 P 沿地球椭球面的法线方向至椭球面的距离 U 称为大地高, P 点沿重力线方向至大地水准面的距离 h 称为正高, 大地高 U 与正高 h 之差称为大地水准面差距 [6]:

$$d = U - h \quad (4)$$

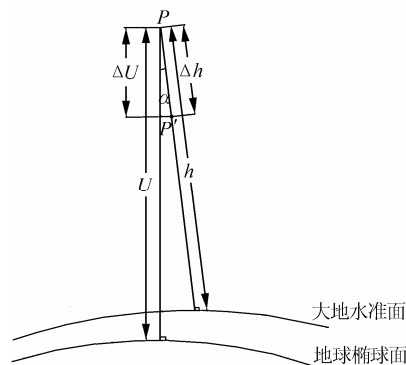


图 1 GPS 沉降量与水准沉降量的差异
Fig.1 Difference between the measured land subsidences by GPS and by leveling

大地水准面差距 d 可通过天文水准或天文重力水准获得, 其值因地而异, 且无简单的规律可循, 最大可达数米, 这对于精密高程测量显然是不容忽视的。

进一步假设 P 点因地面沉降而变为 P' 点, 则其水准高程 (正高) 变化量为 Δh , GPS 高程 (大地高) 变化量为 ΔU , 从图 1 中不难看出二者的关系:

$$\Delta U = \Delta h \cos \alpha \quad (5)$$

式中 α 为椭球法线方向与重力线方向之间的夹角, 称为垂线偏差。垂线偏差 α 的变化也是不规则的, 但其值一般在 $20''$ 左右, 最大不超过 $1'$; 另一方面, 对于地面沉降, 年下沉量一般最大不会超过 1 m (例如天津市的地面沉降), 考虑最不利情况, 即当 $\Delta h = 1\text{ m}$, $\alpha = 1'$ 时, 有

$$\Delta h - \Delta U = \Delta h - \Delta h \cos \alpha = 4.2 \times 10^{-8}\text{ m} \approx 0 \quad (6)$$

由此, 可以得出结论: 尽管地面点的 GPS 所测高程 (大地高) 与水准测量高程 (正高) 存在较大

的差异（即大地水准面差距），但从式（6）可以得知，即使对于大范围的地面沉降监测，也完全可以将 GPS 所测的沉降量 ΔU 视为采用几何水准所测的沉降量 Δh 。

3 差分 GPS 地面沉降监测实例

3.1 天津市地面沉降及其监测现状

天津市位于华北准地台边缘，在北东向和北西向的断裂构造格局下，呈东西分带、南北分块的构造特征，是第三纪形成的断陷式湖盆，新生界沉积厚度高达 4 500~7 000 m，土层软弱，加之近年来大量开采第四纪地下水、第三纪地下热水、油气资源等，以及地面上建筑荷载迅速增加，引起了严重的地面沉降。为了研究天津市的地面沉降现状，以及因地面沉降造成的大型构筑物或基础设施的破坏，以便及时采取各种防范措施和对策，天津市政府自 1986 年起，每年拨付大量经费开展地面沉降监测。多年来的监测成果资料表明，天津市最大累积地面沉降量已超过 2 m，这已成为天津市可持续发展所面临的一个非常重要的战略问题^[7]。

天津市沉降监测的方法主要采用的是传统的几何水准测量，水准路线的长度逐年增加，等级亦逐年提高，至 2002 年止，一等精密水准测量路线长度已达 1 154.3 km，二等水准测量路线长度已达 2 224.8 km，监测周期也由起初的三年变成了现在的一年，每年 9~12 月间同时委托三家甲级测绘单位施测。这种传统的几何水准测量方法要求非常严格，例如一等水准测量要求在路线上连续设测站，且每一测站的视线长度不能大于 30 m，作业人员的劳动强度非常大，且费时费钱，因此，将不受距离和高差限制的 GPS 技术引入天津市这样大范围的地面沉降监测，从而，取代繁重的几何水准测量是非常必要的。

3.2 GPS 地面沉降监测点的布设与观测

如图 2 所示，在天津的全市范围内一共布设了

26 个 GPS 地面沉降监测点，为了 GPS 测量与水准测量便于比对分析，其中第 1~13 号点既是 GPS 点，同时也是一等水准点。从图 2 中可以看出，东部靠近海边的滨海新区，因其沉降严重，且由于地域的战略重要性，监测点布设的密度明显大一些。为了与几何水准测量的成果进行同步比对，GPS 地面沉降监测工作在每年 9~12 月间与几何水准测量同时进行。具体测量时，将相邻监测点之间连接成同步环，采用差分 GPS 的静态测量法进行观测，相邻同步环间保留两个共用点，测量仪器为 Trimble 4700 和 Trimble 5700 双频 GPS 接收机，在每个点上连续观测 48 h，采样速率为 30 s，卫星截止高度角为 15° 。测量结束后，将观测的数据采用定位仪自身携带的软件，根据广播星历进行初步计算，在确认观测成果没有问题后，再回到室内重新用 IGS 精密星历和 GAMIT 软件进行解算。

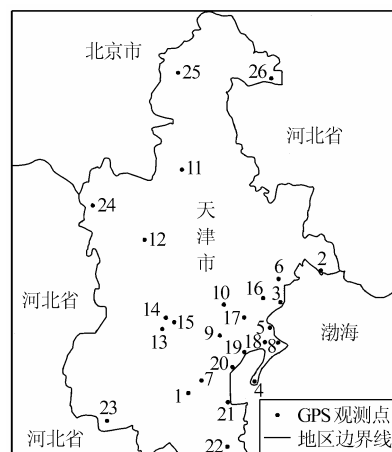


图 2 天津市 GPS 地面沉降监测点布设图
Fig.2 Layout of GPS points for monitoring land subsidence in Tianjin

3.3 GPS 地面沉降监测的精度分析

表 1 列出了 1999~2002 年期间天津市每年 GPS 地面沉降监测后所统计的内部符合精度。从表 1 可

表 1 GPS 地面沉降监测的内部符合精度
Table 1 Inner accuracy of land subsidence monitored by GPS

监测结果	观测时间			
	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年
点位之间的距离 / km	8~107	25~105	8~107	8~112
平差后边长相对误差	$(0.62\sim7.6) \times 10^{-8}$	$(0.74\sim3.3) \times 10^{-8}$	$(0.32\sim4.0) \times 10^{-8}$	$(0.71\sim9.8) \times 10^{-8}$
A / mm	0.71	1.25	0.40	0.94
B / ppb	0.25	0.34	0.12	0.51
水平位置标准差 m_x / mm	1.16~1.44	1.68~2.05	0.86~1.21	2.36~2.97
垂直位置标准差 m_y / mm	0.81~1.00	1.25~1.41	0.58~0.78	1.49~1.71
沉降标准差 m_H / mm	3.1~4.2	4.5~5.8	2.3~3.9	4.7~5.6

注：边长平均误差 $M = A + BS$ ，其中 A 为固定误差， B 为比例误差， S 为边的长度值。

看出,采用差分 GPS 静态测量,将天津市宝坻基岩原点高程经过 100 km 以上的距离传递至各监测点上,近 4 年来测量的标准差(亦称中误差)比较稳定,均在 2.3~5.8 mm 范围内。下面将 GPS 沉降监测的内部符合精度与一等精密水准测量规范要求的内部符合精度作一比较:一等精密水准测量的闭合差限值为^[8]: $1.8\sqrt{D}$, 其中 D 为水准测量路线的长度(km)。这里即使取闭合差限值的 1/3 作为一等水准的偶然闭合差,即当 $D=100$ km,一等水准测量的偶然闭合差约为 6 mm,这与表 1 中所显示的差分 GPS 静态测量的精度基本相当。

表 2 将 1999~2002 年期间在第 1~13 号点上 GPS 测得的沉降量与一等精密几何水准同时测得的

沉降量进行了对比,表 2 中的空白处表示监测点被破坏或被遮挡后未能继续观测,或是新增设的监测点在增设之前未观测。从表 2 中可以得知,差分 GPS 静态测量与一等精密水准测量二者所测沉降量之差最大为 18.2 mm(4 号点在 2000~2001 年期间),但大多数点的沉降量之差在 ± 10 mm 以内,各点沉降量之差的均方根在 $\pm (6.67\sim 10.40)$ mm 范围内。考虑到水准测量本身也有误差,若假设 GPS 测量误差和水准测量误差对表 2 中沉降量之差的均方根值是等权影响,则可以算得 GPS 测量精度在 $\pm (4.72\sim 7.35)$ mm 范围内,这与表 1 中所得的 GPS 测量内部符合精度比较接近,假设成立,这说明差分 GPS 静态测量的精度与一等精密水准测量的精度相当。

表 2 GPS 沉降量与水准沉降量的对比

Table 2 Comparison between the measured subsidences by GPS and by leveling

监测点	沉降量(1999~2000年)/mm			沉降量(2000~2001年)/mm			沉降量(2001~2002年)/mm		
	GPS	水准	GPS-水准	GPS	水准	GPS-水准	GPS	水准	GPS-水准
1	8.9	19.6	-10.7	14.2	15.4	-1.2	49.4	50.9	-1.5
2	26.7	29.5	-2.8	34.7	32.5	+2.2	48.1	54.5	-6.4
3	0.5	1.0	-0.5	24.2	16.8	+7.4	/	/	/
4	13.9	9.4	+4.5	1.9	20.1	-18.2	53.5	47.8	+5.7
5	10.7	7.8	+2.9	0.3	8.0	-7.7	32.3	42.3	-10.0
6	13.2	18.3	-5.1	48.1	55.6	-7.5	2.9	7.5	-4.6
7	41.5	55.1	-13.6	61.8	51.7	+10.1	83.6	87.9	-4.3
8	107.7	101.6	+6.1	70.4	61.6	+8.8	/	/	/
9	32.8	31.7	+1.1	/	/	/	/	/	/
10	/	/	/	44.1	61.0	-16.9	49.2	37.6	+11.6
11	/	/	/	/	/	/	34.0	45.5	-11.5
12	/	/	/	/	/	/	124.2	138.4	+3.8
13	/	/	/	/	/	/	96.7	78.6	+18.1
均方根			± 6.67			± 10.40			± 9.08

4 结 论

(1) 采用差分 GPS 静态测量的方法进行大范围的地面沉降监测,从测量精度看,完全可以取代长距离的一等精密水准测量,且前者比后者的工作效率要高得多,其经济效益是非常可观的。

(2) 与一等精密水准测量相比, GPS 测量有许多优越性:点与点之间无需通视,相邻测站之间基本上无距离和高差的限制,但 GPS 测量也有其局限性:它需要监测点附近四周地势开阔,以便卫星信号不被遮挡,因此,某些原有墙上水准点就无法用于 GPS 测量,需重新布设监测点,这也是天津市地面沉降监测采用 GPS 测量方法全面取代水准测量方法所需解决的一个问题。

(3) 天津市的地面沉降监测网由一等精密水准路线、二等水准路线和少量的三等水准路线组成。除一等精密水准路线外,天津市的二等水准路线长度达 2 224.8 km,本文只涉及了用差分 GPS 的静态测量取代长距离的一等精密水准测量,而采用差分

GPS 的实时动态(RTK)测量广泛取代二等水准测量,同样具有非常重要的经济意义,这也是笔者有待进一步研究的工作。

参 考 文 献

- [1] 周忠谟,易杰军. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1994.
- [2] 李征航. GPS 测高精度的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1993,18(3): 67-73.
- [3] 王泽民,张子连. 中国 GPS 大地高的精度分析[J]. 地壳形变与地震,1997,17(1): 28-33.
- [4] 美国 Trimble 公司. Trimble GPS 5700 测量手册[S], 2001.
- [5] 匡绍君,姚忠杰,董国凤. GPS 技术在天津市地面沉降监测中的应用研究报告[R]. 天津:天津市控制地面沉降办公室,2002.
- [6] 徐绍铨,吴祖仰. 大地测量学[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996.
- [7] 喻宗浩,李阳,宋豫林. 天津市滨海新区地面沉降与控制对策研究[R]. 天津:开益国际咨询研究中心,2000.
- [8] GB12897-91,国家一、二等水准测量规范[S].