

GPS 城市沉降监测网数据处理方法研究

张永海

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: GPS 技术在大地测量、维护大地坐标系和进行全球板块运动或区域地壳形变监测中已得到非常广泛的应用,但在城市地面沉降监测方面,仍存在基准选取、系统参数对高程形变影响等问题。比较了平差过程中的不同基准模型,分析了各自的适用性,讨论了系统参数对平差结果的影响,得出附加系统参数和附有约束条件的网平差计算模型,最后对西安地区布设的 GPS 地面沉降和地裂缝监测网进行计算,比较了不同的平差方案,得出系统参数和不同基准模型对地面沉降数据处理的影响和适用性。

关键词: 系统参数; 基准; 秩亏自由网平差; 地面沉降监测

中图分类号: P228.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2009)03-0327-04

Study on Datum Design of High Precise GPS Height Monitoring Network

ZHANG Yong-hai

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract GPS had been widely used in geodetic measuring, coordinate system retaining and monitoring of global plate movement or regional crustal deformation. However, some questions (reference models, systemic parameters, etc) are still unresolved in urban land subsidence monitoring. This paper analyzes and compares the effects of different reference models, systemic parameters on adjustment result, and takes an adjustment model which adds systemic parameters and constrains. Finally, it compares with some schemes of adjusting the monitor network of land subsidence in Xi'an, and provides some valuable results of systemic parameters and different reference models.

Key words: systemic parameters; reference model; rank defect network adjustment; land subsidence monitoring

0 引言

随着 GPS 技术的成熟和完善,其平面精度可达 $\pm 1 \sim 3$ mm,高程精度一般比平面精度低 2 ~ 3 倍^[1]。因此, GPS 被广泛应用于二维坐标测量和平面监测方面^[2]。随着中国地面沉降和地裂缝等地质灾害的加重,许多城市也布设不同规模的 GPS 监测网进行垂直形变监测,如西安、北京等^[3-7]。通常 GPS 监测网的数据处理包括两大部分, GPS 基线解算和 GPS 基线网平差。因为 GPS 基线网本身含有尺度和方位基准,所以,理论上只需提供一个已知点便可进行基线网平差,而在实际工作中,人

们往往利用多个已知点进行固定基准平差,以实现将 GPS 网较好地吻合到所需框架内。GPS 网平差的方案很多,选择正确的基准框架对获得高精度的 GPS 垂向变形至关重要。究竟哪些方案是合适的?不同方案之间有何差别?针对这些问题,笔者以西安地区的 GPS 沉降监测网进行实例分析,得出了有参考价值的结果。

1 GPS 基线网平差通用模型

1.1 基线平差数学模型

利用高精度基线解算软件,平差后可得到高精度的基线向量,考虑不同期的观测需要统一基准,

收稿日期: 2008-11-20

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010440410); 国家自然科学基金项目(40672173)

作者简介: 张永海(1956-),男,陕西延川人,工程师,从事大地测量教学和实验研究。E-mail: huang830928@yahoo.com.cn

观测方程中引入系统参数;对于基线观测值,只含有尺度和旋转参数信息。

设第 m 期 GPS 网中含有 t 个监测点, n 条基线,则有线性化后的误差方程组^[1, 8-9]

$$V(m) = \underset{3n \times 1}{A_x} \underset{3n \times 3t}{DX(m)} + \underset{3n \times 3t}{A_\beta} \underset{4 \times 1}{\beta(m)} - \underset{3n \times 1}{L(m)} \quad (1)$$

式中: $V(m)$ 为观测值改正数; $DX(m)$ 为未知点待定参数; $\beta(m)$ 为系统参数; A_x, A_β 为参数 $DX(m)$ 和 $\beta(m)$ 对应的系数矩阵; $L(m)$ 为观测向量, 具体向量、系数矩阵形式参见文献 [1, 8-9]。

误差方程对应的随机模型为

$$P = Q^{-1} \quad (2)$$

式中: P 为观测权阵; Q 为观测协方差阵。

1.2 网平差基准模型

由分析可知, 所建立的 GPS 基线平差数学模型属于带有系统参数的秩亏模型, 因为 $R(A_x) = 3t - 3$, $R(A_\beta) = 4$, $R(A_x, A_\beta) = 3t - 7$ 。为求其唯一解, 同时也为了将 GPS 监测网置于一定的坐标框架内, 需附加基准条件

$$G_x^T DX(m) + G_\beta^T \beta(m) + W = 0 \quad (3)$$

对于基准模型, 有以下几种情况, 相应的系数矩阵 G_x^T, G_β^T, W 参见文献 [10]。

1.2.1 带有系统参数的重心基准

当 GPS 监测网中没有已知点或稳定点, 即监测点均在变形区域内, 可采用重心基准, 使得全部未知参数的范数最小^[8]

$$DX(m)^T DX(m) + \beta(m)^T \beta(m) = \min \quad (4)$$

对应附加的基准方程为 3 个位置基准、1 个尺度基准、3 个方位基准, 具体形式可参见文献 [8, 10]。

重心基准是以网中所有点近似坐标的重心为基准, 也就是监测网的平均基准在各期间保持不变。因此, 在网中没有已知点, 且变形体具有均匀变形的特点, 可采用重心基准。当监测网缺少约束条件时, 重心基准能够较为客观地反映监测网的整体变形情况; 但重心基准对监测网的整体稳定性依赖较大, 如果监测网各点变化不一致, 采用重心基准会导致变形结果失真。

1.2.2 带有系统参数的拟稳基准

当 GPS 网中含有 3 个或 3 个以上稳定点时, 可以采用这些稳定点组成拟稳基准。其基准条件同重心基准类似, 但 G_x^T 阵非拟稳点对应的元素均为零, G_β^T, W 阵不变。

拟稳基准是以稳定点的重心为基准, 它是将这些稳定点的平均为基准, 而不是强制符合到这些点上, 所以, 稳定点存在小的变形或不一致, 不会对变形结果产生大的影响。事实上, 绝对的不一致或稳定是不存在的, 因此, GPS 变形网宜采用拟稳基准。

1.2.3 带有系统参数的固定基准

当 GPS 网中含有已知稳定点或已知基线、已知方位时, 可以采用固定基准。分为以下 3 种情况讨论:

(1) GPS 网中含有已知点, 附加点位约束条件

$$\begin{cases} DX_i = 0 \\ DY_i = 0 \\ DZ_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(2) GPS 网含有已知边, 附加尺度约束条件

$$[(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2]^{1/2} - S_{ij} = 0 \quad (6)$$

(3) GPS 网含有已知方位, 附加方位约束条件

$$\arctan \frac{(Z_k - Z_i)}{[(X_k - X_i)^2 - (Y_k - Y_i)^2]^{1/2}} - \alpha_k = 0 \quad (7)$$

固定基准是以网中的已知点、已知尺度或已知方位作为强约束条件, 建立基准方程。由于对于 GPS 变形监测网, 当基准条件少于 7 个 (含 1 个尺度、3 个方位), 网为秩亏 (如 2 个已知点), 当基准条件大于 7 个时 (如 3 个已知点), 则存在多余基准。采用固定基准框架, 要求各已知条件之间必须具有很好的一致性, 这除了要求各点尺度、方位一致、精度一致外, 还要求各基准点具有很好的一致稳定性。否则, 不一致或不稳定的基准框架将导致网的平差结果扭曲变形, 从而导致所获取的变形监测结果失真。

1.2.4 其他情况

当 GPS 网中所含的已知点 (或稳定点) 少于 3 个时, 分 3 种情况:

(1) 当监测网中没有已知点或稳定点时, 基准模型为重心基准, 具体形式见文献 [8, 10]。

(2) 当监测网中只有一个已知点或稳定点时, 固定位置, 全网的重心提供方位和尺度。

(3) 当监测网中有两个已知点或稳定点时, 固定位置和方位, 全网的重心提供尺度。

另外, 如果不加系统参数, 即观测方程中 $A_\beta = 0$, 基准模型中 $G_\beta^T = 0$ 。

2 附加系统参数的秩亏自由网平差

由上分析可以看出, 带有系统参数的约束基准

是一种概括基准, 当对广义 Gauss-marcov 模型进行最小二乘约束, 可得法方程

$$N_{bb} \begin{bmatrix} DX(m) \\ \beta(m) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_k^T \\ A_j^T \end{bmatrix} PL(m) = 0 \quad (8)$$

因为 $R(N_{bb})=3t-7$, 式(8)需附加约束条件(3), 平差后可解出 DX 和 β 的值。

通过式(8)可以看出, 是否附加系统参数会对坐标估计的结果产生影响, 具体影响公式这里不再推导。

对于平差后求出的系统参数, 必须通过统计假设检验, 以判断其是否显著, 如不显著, 这些参数的存在会影响平差系统的性态, 应予以剔除。对于系统参数的显著性检验, 一般采用 t 检验法^[1] 进行。

3 算例分析

文中算例数据来源于西安 GPS 地面沉降和地裂缝监测网工程, 该监测网共布施了 20 个测量点。数据处理中引进了 3 个连续跟踪站(XIAA, XA-NY, BJFS)作为已知点。基线解算采用 GAMIT 软件处理。

分别对监测网两期观测数据进行数据处理, 时间间隔为 1 年, 两期选择相同的基准和初始坐标; 采用以下 8 种方案进行分析对比:

- (1) 固定 3 个已知点, 进行不带系统参数的 GPS 网平差。
- (2) 固定 3 个已知点, 进行附加系统参数的 GPS 网平差。
- (3) 3 个已知点组成拟稳基准, 进行不带系统参数的 GPS 网平差。
- (4) 3 个已知点组成拟稳基准, 进行附加系统参数的 GPS 网平差。
- (5) 采用全网重心基准, 进行不带系统参数的 GPS 网平差。
- (6) 采用全网重心基准, 进行附加系统参数的 GPS 网平差。
- (7) 固定一个点 BJFS, 进行不带系统参数的 GPS 网平差。
- (8) 对应第(7)种方案, 固定一个点位置, 重心尺度和方位, 进行附加系统参数的 GPS 网平差。

表 1 为不同方案解算出的两期沉降量数值表。对应表 1 的沉降如图 1。通过表 1 和图 1 可以看出, 8 种方案的解算结果之间存在系统偏差, 但相对

表 1 8 种不同方案监测点沉降结果对比
Tab. 1 Comparison on Site Subside Results of Eight Schemes

点名	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
XJ01	-7.2	-7.4	-7.3	-7.7	-15.8	-9.1	7.9	-16.9
XJ02	-43.8	-45.2	-43.8	-45.5	-55.9	-45.5	-28.6	-53.3
XJ03	-19.1	-19.6	-19.0	-19.9	-3.7	-20.0	-3.0	-27.7
XJ04	1.8	4.7	1.7	4.5	-5.7	1.4	18.1	-6.5
XJ06	-28.0	-28.6	-28.0	-28.9	-38.4	-29.1	-12.2	-36.9
XJ13	-4.1	0.5	-4.1	0.4	-5.1	-4.2	12.4	-12.0
XJ14	-0.6	1.5	-0.6	1.3	-5.8	-1.8	15.1	-9.5
XJA1	-86.4	-81.5	-86.4	-81.5	-86.1	-86.5	-69.6	-94.4
XJA2	-10.3	-4.4	-10.3	-4.5	39.2	-10.5	6.2	-18.3
XJA3	-15.7	-18.5	-15.7	-18.9	-27.7	-15.8	0.8	-23.6
XJA4	-14.0	-14.7	-14.0	-15.0	-27.6	-15.0	2.0	-22.9
XJA5	-4.2	4.9	-4.2	4.9	1.9	-4.3	12.5	-12.1
XJA6	-6.9	-7.4	-7.0	-7.8	-16.4	-6.7	9.7	-14.4

注: 表中数据为沉降量/mm

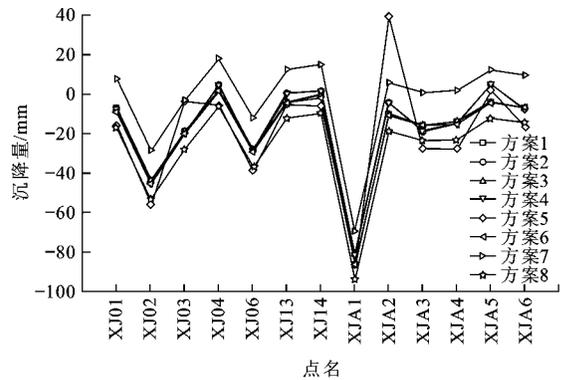


图 1 8 种不同方案监测点沉降图

Fig. 1 Subside of Monitoring Sites in Eight Schemes
趋势一致, 大部分结果能够反映出沉降信息。

考虑到 3 个已知点两期之间可能发生微小变形, 以附加系统参数的拟稳基准(方案 4)为标准, 其他方案的沉降量与其作差, 得出不同方案对方案 4 的沉降偏差统计信息如表 2。

表 2 不同方案对方案 4 的偏差统计

Tab. 2 Error Distribution of Different Schemes Comparing to Scheme 4

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
均值	-1.5	0.2	-1.5	-2.2	-2.2	14.6	-10.0
标准差	3.6	0.1	3.6	15.5	3.4	3.4	3.4

注: 表中数据为沉降量/mm

通过表 2 可以得出:

(1)方案 1~3 和方案 4 吻合较好,这说明 3 个已知点 XIAA、XANY、BJFS 初始坐标准确且两期之间没有发生显著位移,也印证了 3 个已知点作为连续跟踪站其地质条件相对稳定的现实。同时,也证明了当已知点十分稳定时,固定基准和拟稳基准是近似等价的。

(2)方案 5 的结果与其他结果相差较大,其偏差标准差高达 15.5 mm,说明采用重心基准是不合适的。因为对于监测网来说,两期监测点发生变形,其监测网重心也发生变形,两期的基准已不一致,不能够满足监测网每期相同基准的前提。

(3)对比方案 5、6 的结果可以看出,引进系统参数可以有效解决基准模型不一致的问题。两期重心基准发生变形时,不带系统参数的方案 5 结果失真;而引进系统参数的方案 6 与方案 4 吻合较好。

(4)在已知点不足的情况下,方案 7、8 都在不同程度上与方案 4 存在约 10 mm 的系统性偏差。在大范围地壳运动或高精度形变测量中,这种系统误差会造成形变结果失真。两种方案的标准差都较小,说明各监测点之间相对变形较为一致。可以看出,当监测网基准条件不足时,平差后的变形结果可以反映相对变形趋势,但其各点绝对变形量存在系统性偏差。

4 结语

利用高精度的 GPS 技术建立城市地面沉降监测网,其数据处理过程中,不同的平差模型产生不同的结果。讨论了 GPS 监测网数据处理中的平差模型,比较了不同的基准模型,并讨论了系统参数对平差结果的影响,通过处理西安市 GPS 沉降监测网数据,比较了 8 种处理方案,分析了不同方案之间的差异性,得出以下认识:

(1)对于变形监测网而言,如观测方程不带系

统参数,附加条件采用重心基准会使结果失真。

(2)当两期基准发生变化时,系统参数可以有效消除基准不同所带来的差异性,大大提高解算结果的符合精度。

(3)当已知条件不足时,平差结果可以反映相对变形趋势,但其各点绝对变形量存在系统性偏差,会造成分析结果失真。因此,监测网平差时,宜引入 3 个或以上已知点。

(4)网平差之前,应对已知点或稳定点的精确性、有效性进行检验,避免选择不合适的基准和平差模型而导致解算结果出现偏差。

参考文献:

- [1] 张 勤,李家权. GPS 测量原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 徐绍铨,李征航. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的建立[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998 23(增刊): 1-4.
- [3] 胡建国,成英燕,丁继新,等. 我国高精度 GPS 陆海垂直运动监测网的建立与精度分析[J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 289-292.
- [4] 张 勤,黄观文,王 利,等. GPS 在西安市地面沉降与地裂缝监测中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 828-833.
- [5] 武晓忠,张 勤,刘 忠. 西安地面沉降与地裂缝 GPS 监测网的设计与实现研究[J]. 测绘技术装备, 2006, 8(2): 3-5.
- [6] 杨建图,姜衍祥,周 俊,等. GPS 测量地面沉降的可靠性及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 70-75.
- [7] 高 伟,徐绍铨,刘爱田,等. GPS 测量在城市地面沉降监测中的应用研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2004, 35(3): 395-400.
- [8] 陶本藻. 自由网平差与变形分析[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2001.
- [9] 施 闯. 大规模高精度 GPS 网平差与分析理论及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2002.
- [10] 黄观文. GPS 精密单点定位和高精度 GPS 基线网平差研究及其软件实现[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [11] 隋立芬. 高精度 GPS 网的统一与数据处理若干问题研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2001.