

城市 GPS 地面变形监测网的精度研究

王 军

(徐州市勘察测绘研究院, 江苏 徐州 221002)

Research on Accuracy of GPS Urban Groud Deformation Monitoring Network

WANG Jun

摘要:根据大量的实测资料进行分析和论证,对于较大范围的矿区和城市地面变形监测网,用 GPS 静态相对定位技术,采用广播星历进行基线解算,如果措施得当,能够达到变形观测的精度要求。同时指出 GPS 相对定位技术用于地面形变测量应当注意的事项。

关键词:基线向量;PDOP;精度分析

一、静态相对定位实测精度统计

用两台以上的 GPS 接收机同步观测相同的 GPS 卫星进行静态相对定位,将载波相位观测值组成双差观测值,用广播星历解算测站之间的基线向量,对于双频 GPS 接收机,其基线解算精度,一般都给出其标称精度为 $\pm(5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D)$ 。实测结果表明,只要 GPS 接收机比较稳定可靠,共同观测的 GPS 卫星足够多,即使使用单频接收机,两测站之间的距离在 5 km 以内时,其基线解算精度也能达到 $\pm(5 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D)$ 的精度,大量的观测解算结果优于上述精度指标。

某市 GPS 变形监测网,基准点和变形点共 10 个。点间距离从 0.8~5.3 km,在进行多期观测解算的 100 多条基线向量中,对于距离小于 3.5 km 的基线向量,其中误差都在 3 mm 以内。对于 4~5 km 的基线向量,其中大部分误差都在 6 mm 以内。表 1 仅列出 4~5 km 的基线向量中误差及其按标称精度计算的标称中误差,以便进行精度比较与分析。

表 1 某市 GPS 变形监测网 4~5 km 基线解算中误差 mm

距离/m	次数						标称误差
	1	2	3	4	5	6	
4 431	4.1	4.1	4.7	6.6	7.0	10.8	6.7
4 463	3.7	3.9	4.2	5.3	5.4	5.6	6.7
4 496	3.3	3.8	4.0	4.4	4.6	7.3	6.7
5 257	4.1	4.4	4.7	4.8	8.6	9.2	7.3

表中数字为便于比较和分析,按从小到大排列。

可以看出,4~5 km 的基线,用广播星历进行基线解算,多数能够达到 5 mm 以内的精度。

另有某一露天矿 GPS 变形监测网,3 期观测的 24 条基线解算的精度也有类似情况,总体上说 4~5 km 基线精度优于表 1 的统计。但是,个别 1~3 km 的基线在 3 次观测结果中,有 1 次出现了异常现象。如 J3-G3 长 3 206 m,3 次观测解算中误差分别为 $\pm 3 \text{ mm}$, $\pm 3 \text{ mm}$ 和 $\pm 412 \text{ mm}$,而 J2-G5 长 1 473 m,3 次观测解算中误差分别为 $\pm 3 \text{ mm}$, $\pm 5 \text{ mm}$, $\pm 17 \text{ mm}$ 。当然,在数据处理与变形分析中,大误差的基线被当作粗差而剔除不参与平差计算。但是,应当分析产生大误差的原因,以便今后观测时借鉴。

少数基线解算后误差偏大,经研究分析主要原因有:GPS 卫星的空间几何分布不理想;GPS 点周围的障碍物及地面反射影响;观测时段气象条件不好等。这些原因之一都会造成基线解算精度的降低。

二、GPS 卫星的空间几何分布对基线精度的影响

1. 单点定位空间位置精度因子 PDOP

在用伪距法进行单点定位(绝对定位)中,首先列出测站点对不同 GPS 卫星同步观测的伪距观测误差方程式,同步观测的卫星数多于 4 颗时,按最小二乘法求解,得到未知数(测站点坐标)的权系数 Q_x 。由 Q_x 阵中主对角线元素(Q_{ii})定义的空间 3 维位置精度因子 PDOP 及其相应的位置中误差 M_p 为

收稿日期:2003-10-14

作者简介:王 军(1963-),男,安徽宿州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为 GPS 技术在城市测量中的应用。

$$PDOP = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} \quad (1)$$

$$M_p = PDOP \cdot \sigma_0 \quad (2)$$

式中, σ_0 为伪距测量中误差。

PDOP 可以解释为误差放大系数, 即位置误差是伪距测量误差 σ_0 的 PDOP 倍。当同步观测的卫星个数较少以及卫星空间几何分布不好时, PDOP 值偏大。

用载波相位观测值代替伪距观测值, 求出的 PDOP 值为用伪距观测值求出的 PDOP 值的 f/c 倍 (约为 $1/5$), f 为载波频率, c 为电磁波在空中传播速度。

2. 相对定位空间位置精度因子 RDOP

相对定位中, 用载波相位观测值组成站间和星间双差观测值, 按最小二乘法解算两测站点之间的基线向量, 同时求得其权系数阵 Q_x 。用 Q_x 阵中主对角线上的元素 $Q_{x_{ii}}$ 构成相对定位中空间位置精度因子 RDOP。

双差观测值误差方程式见文献 [1] 第 129 页。组成法方程式后, 用 Q_x 主对角线上元素组成空间位置精度因子 RDOP

$$RDOP = \sqrt{Q_{x_{ii}} + Q_{y_{ii}} + Q_{z_{ii}}} \quad (3)$$

基线向量中误差 M_x 为

$$M_x = RDOP \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

式中, σ_0 为双差观测值的单位权中误差。

RDOP 与卫星的空间几何分布有关, 在一个观测时段中, 有多个历元的观测值, GPS 卫星的空间分布也有一定变化。在整个观测时段中, RDOP 是个变值。对基线精度的影响应当是多个 RDOP 所产生的综合影响。

3. 大误差基线的 RDOP

上述某露天矿 GPS 变形监测网 3 期观测中, 有 1 期 J3-G3 基线中误差为 ± 412 mm, 另 1 基线 J2-G5 基线中误差 ± 17 mm, 属同一天观测。观测时段中卫星共 5 颗, 从 9:00 ~ 11:00 其空间分布如图 1。

可以看出, 从 9:00 ~ 11:00, 5 颗卫星由西北—东南方向排列到西南—东北方向排列。到 11:00 时, 其中 4 颗卫星几乎排成了一条直线, 而且有 2 颗卫星 (11) 高度角很低。如果仅用近似排成一条直线的 4 颗卫星计算 RDOP 值, 其权系数阵几乎变为奇逆阵, 求出的 RDOP 值相当大。

RDOP 计算结果如下:

9:00, 5 颗卫星, RDOP = 0.56

11:00, 5 颗卫星, RDOP = 0.92

不考虑 11 号卫星则 RDOP = 1.37

一般情况下, 使用 5 颗以上分布均匀的卫星, 比如测站天顶附近以及每个象限各有 1 颗 GPS 卫星, 经计算, 其 RDOP 都在 0.6 以下。这时, 解出的基线精度都比较高。上述情况, 卫星数少且分布不理想, RDOP 较大, 使得解算的基线精度较差, 而同一基线, 另 2 期观测精度则很高。

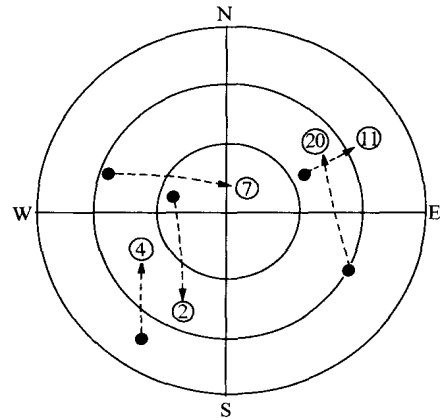


图 1 2001 年 5 月 18 日 9:00 ~ 11:00 某露天矿上空 GPS 卫星分布

三、GPS 信号传播误差的影响

GPS 卫星信号经过电离层、大气层时有传播延迟, 用双频载波消除或减弱电离层延迟误差以及用模型改正电离层和大气层传播延迟都可能产生一些剩余误差。而单频接收机比双频机剩余误差会更大, 故相对定位距离不能太远。卫星信号到达 GPS 接收机天线时, 不可避免地产生地面或附近建筑物反射影响, 对于 4 km 以内的基线, 地面反射影响占有主要成分。基于这些原因, 城市监测网的基线精度不如露天矿监测网的基线精度高。某城市监测网布点时, 部分点周围有高度角约 30° 的小山包, 高层楼房上的点则有如广告牌, 街道附近的点往往有车辆通过等等, 这些因素都造成地面反射误差较大, 影响基线解算的精度。对于 4 km 以上的基线有较大误差, 除了地面反射影响之外, 主要原因还是信号传播中电离层和大气层改正后剩余误差的影响。

四、GPS 变形监测网观测方案的选择

GPS 变形监测网点位选定后, 观测方案的拟定对整个 GPS 网的精度起到重要的作用, 试验表明, 较好的观测方案有: 多台 GPS 接收机的同步观测方案; 如果实际情况允许, 最好做到每点 1 机进行同步观测; 多期观测应做到每期观测时 GPS 接收机台数不变; 每期观测时应选择最佳卫星分布

且卫星较多的时段,如能够注意到相同或相似分布状态则更好。

多台 GPS 接收机同步观测的方案会产生较多的同步观测环,而同步观测环闭合差很小。对于误差稍大的基线剔除后,网的可靠性仍然很强。比如 10 台接收机同步观测时,会产生 45 条基线和 120 个同步三角形环。某市 GPS 变形监测网,一次观测采用 10 台 GPS 接收机进行同步观测,解出的 45 条同步观测的基线中,剔除了大于 ± 5 mm 误差的基线 9 条,剩余 36 条基线误差绝大部为 1~3 mm,同步环闭合差都在 ± 4 mm 以内。相反,如果 GPS 接收机台数较少时,会产生较多的异步环,而异步环闭合差一般都比较大,剔除产生大误差异步环的基线比较麻烦。多台 GPS 接收机同步观测方案在实现各期观测结果的变形分析中具有较好的可比性,表 2 给出了 4 台、6 台、10 台 GPS 接收机两时段观测结果经统一基准后的差值。其中 4 台接收机中有 2 台双频,2 台单频机;6 台接收机为新购单频机;10 台接收机则有 4 台双频 6 台单频机。

表 2 两时段观测结果比较 mm

接收机数	同步观测点数	时段数	两时段统一基准后结果之差
4	4	2	0,0,2,3
6	6	2	0,1,2,0,0,3
10	10	2	0,1,3,5,2,3,0,4,1,3

注:表中仅列出 GPS 点两时段高程之差;4 台、6 台接收机两时段卫星分布大致相同,即两天的同一时间的观测结果;10 台接收机的两个时段为同一天上、下午卫星分布不同的两个时段的观测结果。

五、提高 GPS 变形监测网精度的措施

综合以上对 GPS 基线网精度的分析,为提高 GPS 变形监测网的精度,应对 GPS 监测网的设计、观测方案以及对观测数据的处理注意以下几个方面的问题。

1. GPS 变形监测网的设计

GPS 变形监测网周围布设 4 个以上稳定的基准点,基准点间以及基准点与变形点之间距离不宜超出 5 km。有条件的地方最好引入高级 GPS 点的 WGS84 坐标作为 GPS 变形监测网的位置基准,提高基线解算的精度。基准点的高程可以二等水准测

定,作为其检查是否稳定的基础数据,也可以第 1 期 GPS 观测解算的大地高作为已知高程数据,定期检测其稳定性。

2. 基准点与变形点的选择

实地选定基准点与变形点时一定要注意避免点附近有雷达站、电台或高大建筑物,避免地面反射的影响。

3. 观测时段的选择

观测时段中,GPS 卫星个数最好在 5 颗以上,卫星空间几何分布均匀,天顶附近及 4 个象限内最好都有卫星分布。用伪距单点定位要求的卫星空间分布几何因子 PDOP < 4,用载波相位单点定位 PDOP < 1,相对定位 RDOP < 0.6。

同步观测时间段应为 2 h 以上,点间距离在 3 km 以内时,也可缩短观测时间到 1~2 h,数据采样率以 10 s 一次为宜。

4. 采用多台 GPS 接收机同步观测的方案

每期观测采用的 GPS 接收机应当是相同的台数,有条件时,最好整个 GPS 网每点一台接收机进行一次同步观测。

5. 各期观测数据的处理

应用随机软件按广播星历进行基线解算。解算时,最好每期观测都引入相同的位置基准。基线向量解算后,应剔除大误差的基线,剔除同步环闭合差超限的有关基线,剔除异步环闭合差较大的有关基线,然后再进行 GPS 基线向量网平差计算。

GPS 基线向量网平差一般先做固定一点的无约束平差。因为各期观测无约束平差后统一了位置基准,剩余的方位和尺度基准误差会使各期平差结果产生系统误差,可以第 1 期平差为已知数据进行拟合或坐标转换处理,消除系统误差后,再进行变形分析,也可以第 1 期平差基准点的结果作为已知值,对以后各期进行约束平差,以比较变形点的位移。

参考文献:

- [1] 徐绍铨,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [2] 张华海,等. GPS 定位技术在地面形变测量中的应用[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2000.
- [3] 刘大杰,等. 全球定位系统(GPS)原理与数据处理[M]. 上海:同济大学出版社,1996.