

精密 GPS 过江水准在特大桥梁工程中的应用

黄 腾, 华锡生, 岳东杰

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:分析 GPS 定位误差、高程异常拟合的二次模型及提高 GPS 高程精度的技术, 说明良好的二次模型用于短距离外推也能达到较高精度。在润扬长江大桥高程传递中利用 GPS 水准进行高程测量, 并与常规 II 等过江水准成果比较, 最大差异为 2.9 mm, 表明两种方法精度相同。

关键词:相位中心; GPS 高程; 高程异常; 过江水准; 特大桥梁

中图分类号: P228.4

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2001)05-0046-03

利用 GPS 相对定位能同时精确测定地面点的三维坐标, 其精度通常可达到 ± 10 mm 左右, 可满足绝大部分常规测量的需要。但是, 在各种特大型工程中, 对定位精度有更高的要求, 例如在特大型桥梁工程中, 结合现代施工技术, 所建的控制网不仅平面位置精度要求很高, 而且在高程方面, 为使两岸建立统一高程系统, 以满足土建施工、各种构件的安装定位、钢箱梁的安装等工艺的需要, 要求高程中误差不大于 ± 5 mm。

这些特大桥梁工程的高程传递, 常跨越宽 1 km 以上的江面, 观测中视线贴近水面, 受雾气、大气折光的影响严重, 实施常规过江水准难度较大, 作业量繁重。

利用 GPS 定位技术进行过江水准是解决特大型桥梁工程高程传递的理想方法。我们结合润扬长江大桥工程(跨越长江 1.2 km), 研究了精密 GPS 过江高程传递技术, 并同时实施了常规过江水准测量以资进行比较和检核。

1 天线相位中心偏差的研究

1.1 GPS 定位的误差

GPS 定位误差主要来源于以下三个方面:

a. 系统本身的误差, 包括卫星钟差、卫星轨道误差、地球自转影响等。减弱此误差的关键是必须知道观测时刻卫星的精密星历。我国已加入了全球布设的卫星监测网站, 可以获得精密星历。在 GPS 过江精密高程传递的基线解算中, 我们采用精密星历, 确保了观测值的高精度。

b. 信号传播的误差, 包括大气电离层、对流层

的折射影响, 使信号产生相位延迟、频移等。减弱这种误差的较好处理方法是采用差分技术, 通过对不同卫星、不同历元观测值之间的差分处理, 在小范围的控制网基线解算中, 可以有效地减弱这种误差。

c. 观测误差和仪器误差, 包括整周模糊度解算精度及稳定性, 天线相位中心的偏移等。在常规 GPS 定位中, 这类误差常不被人们注意, 而这些误差的减弱, 对进一步提高定位精度有着较大作用。

1.2 整周模糊度解算稳定性试验

用两台 ASHTECH Z₁₂ GPS 定位仪, 在已知高精度短基线上进行连续 2 h 的观测, 接收到 6 颗大于 15° 高度的卫星信号。由于基线很短, 对流层和电离层折射影响大部分抵消, 可不考虑改正, 则整个测段中的误差方程组可以写为

$$V = A_p X_p + A_N X_N - l \quad (1)$$

式中: X_p 为测站的坐标; X_N 为整周模糊度向量。以整周模糊度逼近原理, 分别用不同时段观测值进行处理, 结果如图 1 所示。

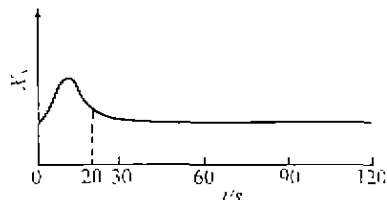


图 1 整周模糊度解算值

由图 1 可知, 定位初期, 由于历元较短, 整周模糊度解算值很不稳定, 精度也低。在 20 min 以后解算值就逐步稳定, 特别是历元 60 min 后, 解算出的整周数十分稳定, 具有很高的精度。由此可知在精密定位

中,观测时间不要少于 1 h, 否则由于整周模糊度的影响,将显著降低定位精度。

1.3 天线相位中心的偏移

接收机天线相位中心通常与天线几何中心不重合,而且相位中心会随卫星信号来源方向发生变化,根据有关资料,天线相位中心偏移的变化可达 10 mm 以上,因此高精度 GPS 定位时,天线相位中心与几何中心的偏移量的大小,以及由于卫星高度角的变化而使相位中心变化的量值是直接影响定位精度的因素。

为确定定位中所用的 ASHTECH Z12 配置的扼流圈天线相位中心偏移的情况,在上述已知基线上进行 4 个历元(每个历元 90 min)的测试,基线两端为强制对中观测墩,距离为 5.0578 m,高差为 0.0672 m。以 1 号及 2 号天线相对测量的测试结果,按每个时段独立平差解算,求出 2 号天线相对于 1 号天线相位的变化值,如图 2 所示。

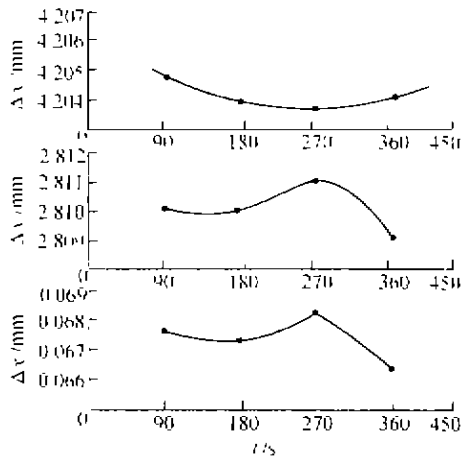


图 2 2 号天线相位中心变化量

测试结果表明,1 号和 2 号天线的相位中心相对稳定,在不同历元观测中,相位中心偏移量最大约 2.5 mm。在 Z 方向的变化量最大,为 2 mm,利用此天线在精密高程定位中测量是适宜的。

2 高程异常的物理数学模型

2.1 高程异常 ζ_i

GPS 测量的高程是地面点 P 沿法线方向到参考椭球体面的距离 H_i ,称为大地高,水准测量的高程是地面点 P 沿垂线方向到似大地水准面的距离 H'_i ,称为正常高。在地面 P 点,此两高程的差值即是该点的高程异常 ζ_i (见图 3):

$$\zeta_i = H_i - H'_i \quad (2)$$

$$m_{\zeta_i}^2 = m_{H_i}^2 + m_{H'_i}^2 \quad (3)$$

地面点正常高的值可用精密水准测量求得,例如以 II 等水准测量,高程中误差不大于 $\pm\sqrt{L}$,对于小范围的高程控制,若两点间距离为 4 km,则高程中

误差可保证在 ± 2 mm 以内,因此,要保证 GPS 高程(大地高)经高程异常改正后为正常高的精度,应在进一步提高大地高的精度及求定高程异常的精度方面采取措施。

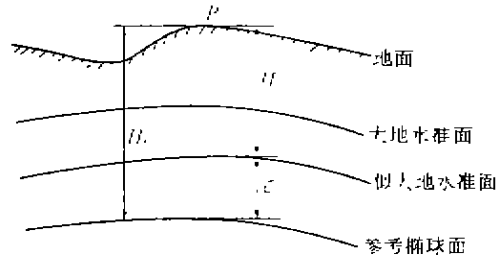


图 3 高程系统关系

2.2 ζ_i 的数学物理模型

由地球重力场理论可知,大地水准面外部的实际重力位 W 可分解为正常重力位 U 和异常位(扰动位) T ,即

$$T = W - U \quad (4)$$

相应于似大地水准面,由布隆斯公式知高程异常 ζ 为

$$\zeta = \frac{T}{\gamma} \quad (5)$$

式中 γ 为正常重力,在一定范围内,大地水准面的变化比较平缓,故扰动位可看作是平面坐标 x, y 的函数 $T = T(x, y)$, 将其展开成

$$T(x, y) = T_0 + \frac{\partial T_0}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T_0}{\partial y} \Delta y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2} \Delta y^2 + \frac{\partial^2 T_0}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \epsilon \quad (6)$$

式中 T_0 为参考点(重心处)的扰动位,根据物理大地测量理论,参考点的垂线偏差和垂线偏差变化率关系为

$$\begin{aligned} \zeta_0 &= \frac{1}{r_0} \frac{\partial T_0}{\partial x}, & \eta_0 &= \frac{1}{r_0} \frac{\partial T_0}{\partial y} \\ \zeta'_0 &= \frac{1}{r_0} \frac{\partial^2 T_0}{\partial x^2}, & \eta'_0 &= \frac{1}{r_0} \frac{\partial^2 T_0}{\partial x \partial y} \\ \theta'_0 &= \frac{1}{r_0} \frac{\partial^2 T_0}{\partial y^2} \end{aligned}$$

在相隔几十千米的小范围内,正常重力的变化可以忽略不计,取 $r_0 = r$, 则

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{T_0}{r} + \zeta_0 \Delta x + \eta_0 \Delta y + \frac{1}{2} \zeta'_0 \Delta x^2 + \frac{1}{2} \eta'_0 \Delta y^2 + \theta'_0 \Delta x \Delta y + \epsilon \end{aligned} \quad (7)$$

若表示为

$$\begin{aligned} \zeta &= a_0 + a_1 \Delta x + a_2 \Delta y + a_3 \Delta x^2 + a_4 \Delta y^2 + a_5 \Delta x \Delta y + \epsilon \end{aligned} \quad (8)$$

则式(8)中的 a_0 即为参考点的高程异常; a_1, a_2 分

别为参考点在 x, y 方向的垂线偏差; $2a_3, 2a_4, a_5$ 是参考点附近垂线偏差变化率。

由 GPS 控制网 N 个点 ($N > 6$), 测得各点的 x_i, y_i, H_i , 以精密水准测定这些点的高程 H_i^s , 求得高程异常 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$, 就可以按最小二乘准则确定此控制范围内高程异常模型式(8)中的系数 a_i , 即

$$a = N^{-1} A^T P \xi \quad (9)$$

由式(7)试算可知, 在较小范围内且高程异常变化平缓地区, 只有当 ξ_0', η_0' 不大于 $0''.2/km$ 且 $\Delta x = \Delta y \leq 1 km$ 时, 式(7)中的二次项才小于 $\pm 2 mm$ 。因此, 在精密 GPS 水准测量中, 例如以 II 等水准为例, 通常不宜以平面模型代替二次模型。

3 润扬长江大桥跨江高程传递

润扬长江大桥桥位区域布置的首级施工控制网见图 4, 全网以 ASHTECH Z12 GPS 三维定位测量, 每时段观测 90 min, 每 20 s 取样一次, 卫星高度角大于 15° , 点位几何图形强度因子 $GDOP \leq 4$, 使用扼流圈天线。此外, 分别于世业洲、南区进行两个环的 II 等水准测量。在 1—2, 4—5, 21—28 四处完成常规的过江 II 等水准测量, 跨越距离 1.2 km 左右。

在实施 GPS 过江高程传递中, 高程异常模型采用式(7)表示, 以世业洲上 8 个点拟合, 确定全桥位区域的高程异常模型, 以此模型归算南区各点的正常高并与常规过江水准及 II 等水准测量的结果相互验证。计算结果见表 1、表 2 和表 3。

表 1 各点高程及高程改正

点号	II 等水准 H_i^s/m	GPS 高程 H_i/m	高程异常 ξ_i/m	GPS 水准高程 $H_i^s(1)/m$	差值/mm $H_i^s - H_i^s(1)$
2	10.1818	31.225	21.0432	10.1832	-1.4
4	10.0815	31.110	21.0285	10.0810	-0.5
6	9.6536	30.709	21.0554	9.6529	+0.7
8	5.3896	26.424	21.0344	5.3887	+0.9
10	4.7728	25.790	21.0172	4.7733	-0.5
21	9.9617	30.989	21.0273	9.9615	+0.2
23	9.7334	30.741	21.0076	9.7334	0.0
25	9.5700	30.621	21.0510	9.5705	-0.5
1	9.3676	30.442	21.0744	9.3683	-0.7
5	9.0030	30.059	21.0560	9.0046	-1.6
7	10.1204	31.206	21.0856	10.1168	+3.6
11	10.2591	31.338	21.0789	10.2607	-1.6

表 2 高程异常模型系数

系数	拟合值	系数	拟合值
a_0	21.02984	a_4	5.6949×10^{-5}
a_1	-8.4787×10^{-3}	a_5	4.8414×10^{-3}
a_2	3.5584×10^{-2}	m/mm	± 0.46
a_3	-9.7436×10^{-4}	相关系数 r	0.99

表 3 两种方法过江高程比较

线路	II 等水准高差 /m	GPS 高程过江高差 /m	偏差 /mm
1—2	0.8142	0.8149	0.7
4—5	-1.0785	-1.0764	-2.1
6—7	0.4668	0.4639	2.9

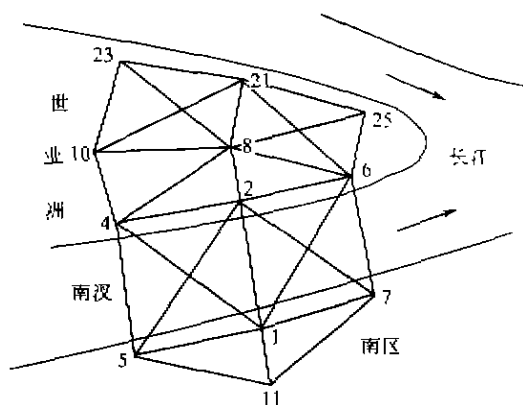


图 4 首级施工控制网布置

4 结 论

a. GPS 过江传递高程与 II 等水准过江高程结果十分接近, 三个过江位置的差异分别为 0.9 mm, 2.1 mm 和 2.9 mm。利用 GPS 进行高精度过江高程传递的关键是获得精确的大地高, 对此, 必须特别注意仪器高的量测和对所使用天线相位中心偏移量的精确率定。

b. 天线相位中心的变化是由于卫星高度角的变化所引起的。不同时段观测中, 因卫星运行而使信号源方向改变产生相位中心变化, 有时会达到较大数值。本仪器使用的扼流圈天线, 经测定, 相位中心变化较小, 故未对测值进行改正。

c. 高精度 GPS 水准高程测量中, 高程异常模型应采用二次模型。良好的二次模型用于外推高程异常能达到较高的精度。

d. 拟合所得的二次模型, 由于各因子间的相关性, 使求出的各系数失去了通常的物理含义。但整个模型在描述区域性的高程异常分布中, 有较好的应用价值。

参考文献:

[1] 刘大杰, 施一民, 过静君, 等. 全球定位系统 (GPS) 的原理与数据处理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.

(收稿日期: 2000-03-23 编辑: 熊水斌)

