

采用 GPS 伪卫星技术提高定位精度的研究

杨 光,何秀凤,华锡生

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 对伪卫星技术的原理、特点作了介绍,并结合小东江大坝监测实例,采用伪卫星技术,提高了 GPS 定位精度。结果表明,伪卫星能够显著增强几何图形结构,提升测量精度,尤其是垂直方向上的精度。

关键词 伪卫星;GPS 精密定位;形变监测

中图分类号 P228.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)03-0276-03

GPS 应用于大坝等大型水工建筑物的精密形变监测中,数据的采集、传送、处理和分析的自动化过程都很容易实现^[1,2],但人们最为关心的是点位的三维定位精度和可靠性,其本质问题就在于 GPS 精度能否满足大坝安全监测的要求。我国颁布的《土石坝安全监测技术规范》中并未对变形监测的各项精度指标作明确规定,文献^[3]认为土石坝坝体表面相对工作基点的变形监测精度通常可依照 $\pm 5.0 \sim \pm 10.0 \text{ mm}$ 施行;而对于混凝土大坝,我国的《混凝土大坝安全监测技术规范》中规定的精度标准是^[4]:位移量中误差径向不超过 $\pm 2.0 \text{ mm}$,切向不超过 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 。由于 GPS 测量在垂直方向上定位精度较差,不能满足某些形变监测的要求。因此从某种程度上讲,GPS 可以提供三维坐标的优越性未能得到充分发挥。GPS 测量是在多种误差源的共同作用下进行的,影响测高精度的原因也是多方面的。如大气电离层和对流层对信号的折射,影响了 GPS 测量定位的垂直分量;受区域性似大地水准面精度的影响,GPS 大地高转换过程中精度受到损失等等。针对 GPS 在测高方面的弱点,很多学者提出了数据处理办法,如采用最优回归分析、高阶曲面拟合、神经网络方法等等来推求高程异常值^[5],以期得到较高的 GPS 测高精度。应当指出,GPS 的高程异常值仅仅是高程系统转换中的一个要素。虽然在处理这个问题上应用了种种新理论、新技术,但是从本质上来讲,这些工作只是一种后期的数据处理。要得到较高的 GPS 测高水平,若不能有效提高前期观测的精度,其效果也是很有限的。尤其应当注意的是,GPS 系统本身受一些先天性因素制约,造成了某些难以克服的弱点。比如 GPS 测量完全依赖于卫星信号的接收,在卫星分布不良或健康状况不佳时,监测系统的稳定性和可靠性就会受到影响。更为严重的是卫星始终保持在天线上方较高的高度角,造成卫星几何图形结构不尽合理,这就从根本上限制了测高的精度。

1 伪卫星定位技术

近年来兴起的伪卫星定位技术为 GPS 应用中的难题指出了一个新的方向。伪卫星概念的提出,最早可以追溯到 20 世纪 70 年代的 GPS 初期预研阶段,当时是用于 GPS 卫星发射上天之前对地面 GPS 用户接收机进行原理验证。20 世纪 80 年代中期,提出了伪卫星星历的数据格式,包括位置、码信息和健康标志等。在近 20 年中,随着伪卫星技术的发展和用户接收机水平的提高,伪卫星定位技术的实现成为了可能。20 世纪 80 年代末,伪卫星技术被用于增强基于 GPS 相位测量的飞机精密进场引导与着陆的实时动态定位,很多学者对此作出了有价值的研究^[6]。近十几年来,人们提出了新的伪卫星概念,并开发了多种伪卫星设备用于室内、地下、导航、火星探测和形变监测等等。

简单地讲,伪卫星就是设置在地面上的 GPS 卫星。伪卫星是一种地面发射器,它可以发射类似于 GPS 的信号来增强 GPS。伪卫星能够提升整个系统的可用性、稳定性、可靠性以及测量精度,甚至在室内、地下等无法接收到 GPS 卫星信号的场合能完全替代 GPS 卫星。通常,伪卫星信号载频选用 GPS 的 L1 频率,用 PRN 码

C/A 来调制.伪卫星每秒发送 11 个 90.91US 的脉冲.这样伪卫星干扰 GPS 信号不超过 10% 的时间.此时接收机的 GPS 平均信号功率损耗不大于 1 dB.

伪卫星信号工作在 GPS 的频率 L1 或 L2 上,伪卫星电文格式和 GPS 的电文格式相同,所以 GPS 用户接收机可以同时接收 GPS 信号和伪卫星信号.伪卫星的观测量既可以是伪距也可以是载波相位.由于伪卫星信号在 GPS 时间中是被精确确定的,所以用户接收机能从伪卫星获得一个附加的伪距测量,这样不仅增大了卫星覆盖面积,更有效地改善了几何图形结构,提高了垂直方向的定位精度.此外,附加的伪距观测量还有利于增强 GPS 模糊度的解算,提高精度.

2 卫星的几何布局与精度因子

GPS 定位中常采用几何精度因子(DOP)来反映点位误差随卫星星座几何位置变化的情况,由定位误差 = 测量误差 × DOP,可以估算出精度.为了便于估算地面观测站的位置精度,往往采用地面用户坐标系中的精度因子.这样 DOP 就可以相应地表达成为各个方向的分量 NDOP(北向)、EDOP(东向)和 VDOP(垂向).

精度因子的数值与所测卫星的几何分布图形有关,那么何种分布比较适宜自然是人们所关心的问题.因为 GDOP、VDOP 等的计算涉及到不定维数矩阵的复杂计算,因此对于几何图形因子的优化选择尚没有相关的严密数学公式.文献[7]曾以物理学上质点质量和惯性矩的原理,用类比的方法,近似得出了 $VDOP \geq [\sqrt{N} \sin^2(\theta/2)]^{-1}$ 的结论,其中 N 为卫星个数, θ 为最低卫星的天顶距.这一估算可作为选星时的一项参考.

根据文献[8],假设由观测站与 4 颗观测卫星所构成的六面体体积为 V ,则精度因子与该六面体体积的倒数成正比,即 $GDOP \propto (1/V)$.理论分析表明,在由观测站至 4 颗卫星的观测方向中,当任意两方向之间的夹角接近 109.5° 时,其六面体的体积为最大.但是在实际观测中,为了减弱大气折射的影响,所测 GPS 卫星的高度角又不可能过低,所以必须在这一条件下,尽可能使所测卫星与观测站所构成的六面体的体积接近最大.通常认为,在高度角满足上述要求的条件下,当 1 颗卫星处于天顶,而其余有 3 颗卫星相距约 120° 时,所构成的图形结构较佳.实际测量中这也可作为选择和评价分布图形的参考.

对于通常的 GPS 测量,在选择卫星时,考虑到大气层传播的影响,一般要求卫星截止角大于 $10^\circ \sim 20^\circ$.而当采用伪卫星时,由于其是布设于地面之上的,并且其信号的传播与电离层无关,因此高度角理论上可以拓展到 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 以内任意值.通过利用这种低仰角卫星,采用 GPS 和伪卫星组合,能够有效地改善几何图形结构,提高垂直方向的定位精度.这也就是利用伪卫星提高定位精度的理论依据.

3 小东江大坝 GPS 伪卫星组合精度分析

较差的几何分布将引起不良的几何精度因子,尤其对垂直几何因子的影响较大.但这种因地形不利而遮蔽卫星信号的情况在水利水电工程中恰恰是普遍存在的.在这些区域,GPS 监测的稳定性、可靠性就会大大降低.要提高监测效果,一个有效的手段就是引入伪卫星的组合观测.

小东江坝区重峦叠嶂、四周山体陡峭,整个坝体位于 V 形峡谷之间,监测面积大,控制点多且地形条件差.2002 年 1 月对小东江大坝进行了 GPS 实地监测,观测数据表明,有部分测点的效果很不理想.尤其是其中的一个监测点解算误差极大,究其原因,是该监测点贴近山体,整个东南方向完全被峭壁遮挡,导致了不良的 DOP 值,并最终影响到 GPS 解算的效果.

为了方便起见,选取了实测数据中具有代表性的一个历元.该历元共有 5 颗有效卫星,分别是 PRN1,高度角 53° ,方位角 240° ;PRN3,高度角 65° ,方位角 38° ;PRN13,高度角 40° ,方位角 290° ;PRN22,高度角 30° ,方位角 54° ;PRN31,高度角 71° ,方位角 222° .图 1 中阴影区即为 GPS 盲区,该处监测点从方位角 $60^\circ \sim 210^\circ$ 范围之内的 GPS 信号完全被阻挡.

在原 GPS 观测的基础上,计算了增设 1~4 颗伪卫星后,GPS 与伪卫星组合观测时 DOP 的变化情况,见图 1.方案 1 在原 GPS 观测的基础上增设了一颗方位角为 120° 伪卫星①;方案 2 对方案 1 再增设一颗方位角为 160° 伪卫星②;方案 3 对方案 2 再增设一颗方位角为 300° 伪卫星③;方案 4 对方案

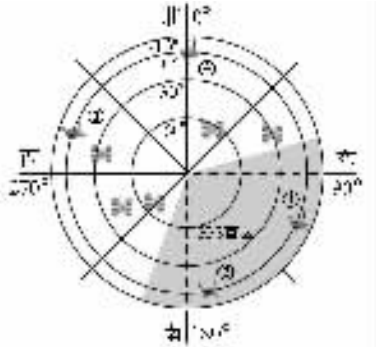


图 1 小东江 GPS 和伪卫星俯视图
Fig.1 Vertical view of GPS and pseudolites observation stations in Xiaodongjiang dam region

案3再增设一颗方位角为 0° 伪卫星④.表1~4中列出了该点在纯GPS观测时的实测DOP值,然后分别计算了伪卫星高度角 F 在 $15^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间变化时的不同DOP值,以作对比分析.

方案1~4的结果表明,合适地加设伪卫星后,可以显著降低GPS观测的几何精度因子,特别是VDOP.显然,伪卫星的介入能够有效地增强几何图形结构,提升测量精度,尤其是垂直方向上的测量精度.但是也应当注意到,伪卫星的增加达到一定程度之后,其对于测量精度的提高已经相当有限.小东江大坝GPS伪卫星组合观测方案中,在综合考虑监测精度效果和费用的情况下,这4个方案中应以方案3为最优.当然,针对其它不同的监测系统,还应综合考虑工程的实际情况,以及伪卫星的信号交叠问题,经过空间搜索计算后在优化分析的基础上决定伪卫星的个数和布设位置.

表1 方案1的DOP值
Table 1 DOP values of scheme 1

分量	单纯	伪卫星高度角 F					
	GPS	15°	10°	5°	0°	-5°	-10°
PDOP	4.089	3.088	3.017	2.958	2.910	2.870	2.837
NDOP	1.860	1.575	1.595	1.613	1.630	1.645	1.659
EDOP	1.945	1.929	1.934	1.937	1.939	1.941	1.942
VDOP	3.080	1.826	1.679	1.548	1.431	1.328	1.236

表3 方案3的DOP值
Table 3 DOP values of scheme 3

分量	单纯	伪卫星高度角 F					
	GPS	15°	10°	5°	0°	-5°	-10°
PDOP	4.089	1.734	1.593	1.485	1.404	1.345	1.305
NDOP	1.860	0.711	0.700	0.693	0.691	0.693	0.699
EDOP	1.945	0.777	0.764	0.757	0.754	0.756	0.762
VDOP	3.080	1.378	1.209	1.073	0.962	0.871	0.795

表2 方案2的DOP值
Table 2 DOP values of scheme 2

分量	单纯	伪卫星高度角 F					
	GPS	15°	10°	5°	0°	-5°	-10°
PDOP	4.089	2.232	2.124	2.042	1.982	1.940	1.911
NDOP	1.860	0.886	0.876	0.870	0.868	0.872	0.880
EDOP	1.945	1.422	1.421	1.423	1.428	1.434	1.443
VDOP	3.080	1.474	1.313	1.179	1.067	0.972	0.892

表4 方案4的DOP值
Table 4 DOP values of scheme 4

分量	单纯	伪卫星高度角 F					
	GPS	15°	10°	5°	0°	-5°	-10°
PDOP	4.089	1.621	1.487	1.385	1.308	1.252	1.214
NDOP	1.860	0.593	0.585	0.580	0.576	0.582	0.589
EDOP	1.945	0.766	0.754	0.747	0.744	0.745	0.751
VDOP	3.080	1.301	1.140	1.011	0.906	0.821	0.750

参考文献:

[1] 杨光,何秀凤,侯新华,等. GPS多天线大坝形变监测系统研究[J]. 测绘通报,2003(8):33—35.
[2] 杨光,何秀凤,胡鹏,等. 浦东海塘监控管理信息系统[J]. 水力发电,2003,29(9):62—64.
[3] 孙太之,阮宝民,夏春芬,等.《土石坝安全监测技术规范》中的几个问题[J]. 大坝观测与土工测试,1999,23(2):14—16.
[4] 熊福文. 大坝GPS整体变形监测研究[J]. 上海地质,2001(4):59—61.
[5] 余学祥,吕伟才. GPS网正常高的计算及其精度评价[J]. 勘察科学技术,1998(2):50—54.
[6] COBB H Stewart. GPS pseudolites theory, design and applications[D]. Stanford University, 1997.
[7] 邓强,黄顺吉. 基于伪卫星的提高GPS垂直定位精度的研究[J]. 电子学报,1997,25(3):70—73.
[8] 周忠谟,易杰军,周琪. GPS卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1997. 119—120.

Improving the precision of GPS by use of pseudolite technique

YANG Guang, HE Xiu-feng, HUA Xi-sheng

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: An introduction is given to the theory and characteristics of the pseudolite technique. The combination of the technique with GPS in the monitoring of the Xiaodongjiang Dam shows that the pseudolite technique greatly intensifies the structures of geometric figures and improves the precision of positioning, especially in the vertical direction.

Key words: pseudolite; GPS; precise positioning; deformation monitoring