

基于 BDS PPP 技术的超高层建筑变形监测

王炜栋^{1,2}, 王明孝³

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;

3. 陆军研究院科技创新研究中心, 江苏 无锡 214100)

摘 要: 超高层建筑变形监测是后续超高层建筑维护与修缮的重要内容。目前我国北斗卫星导航系统(BDS)已被广泛应用于建筑物的变形监测, 本文利用 BDS 精密单点定位技术(PPP), 根据高频超高层建筑 BDS 变形监测数据, 以静态网解算三维坐标为基准, 分析超高层建筑复杂环境下 BDS 数据质量、PPP 定位精度以及超高层变形趋势。研究表明, 在监测时间段内, BDS 卫星数多于 GPS, 空间几何分布精度略低于 GPS, 观测时间达 1 h 以上开始收敛, 水平向定位精度可以达到 1 cm, 竖直向定位精度可以达到 2 cm, 能满足超高层建筑变形监测的精度要求, 可为今后的超高层建筑变形监测提供一种新的技术手段。

关键词: 超高层建筑; 变形监测; 北斗 PPP; 精度

中图分类号: P228.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)06-0058-05

0 引 言

在经济与科学技术快速发展的今天, 我国的超高层建筑呈现蓬勃发展的趋势。超高层建筑相比于其他高层建筑可以节省空间, 但是相比于其他建筑具有更明显的动态变形, 受风荷载、日照作用、温度、地震等因素的影响更加明显。随着测绘新技术的发展, 全球卫星导航系统(GNSS)技术可以精确地获取监测点的三维坐标, 并且能对建筑物实现连续变形监测。它高精度、高效、全天候和不受天气影响的优点更适合工程实际的应用。相比于实时动态载波相位差分(RTK)技术, 精密单点定位(PPP)技术只需要一台接收机, 不需要参考站, 只需要根据 IGS 提供的精密星历以及钟差等产品, 即可获取监测点的高精度三维坐标更具有不受距离限制, 操作简单, 成本较低的优点。我国北斗卫星导航系统(BDS)能提供高精度导航与定位服务, 因此将 BDS PPP 定位技术应用于建筑物的变形监测将是今后发展的必然趋势。目前 PPP 技术主要被应用于滑坡变形监测, 毕航权^[1]改进了一种 PPP 的数学模型, 并验证了 PPP 技术在滑坡变形监测中应用的

可行性; 王利等^[2]证明 PPP 技术在滑坡变形监测中精度可以达到厘米级; 李黎等^[3]证明动态 PPP 不能满足毫米级变形监测, 2 h 以上的静态 PPP 可以满足毫米级变形监测。本文采用 BDS/GPS 双模接收机, 利用 PPP 技术对国内某超高层建筑进行变形监测分析为今后超高层建筑变形监测提供一种新的监测方法。

1 PPP 技术

PPP 技术只需要利用一台 GNSS 接收机, 根据精密星历、高精度卫星轨道和钟差产品, 通过参数估计, 可实现高精度定位^[4]。

1.1 观测方程

在 GNSS 测量中, 主要有两种观测量, 伪距观测量和载波相位观测量。其中伪距观测量精度较低, 载波相位观测量精度较高。二者观测方程表示如下:

$$P = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + I_r^s(t) + T_r^s(t) + \delta m_r^s(t) + c[\delta \tau_r(t) - \delta \tau^s(t - \tau_r^s)] + c[d_r(t) + d^s(t - \tau_r^s)] + \epsilon_r^s(t), \quad (1)$$

收稿日期: 2019-06-22

通信作者: 王炜栋 E-mail: 6318975595@qq.com

$$\varphi = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) - I_r^s(t) + T_r^s(t) + \delta m_r^s(t) + c[\delta \tau_r(t) - \delta \tau^s(t - \tau_r^s)] + \lambda b_r^s + \varepsilon_r^s(t). \quad (2)$$

式中: P 为伪距观测值; φ 为载波相位观测值; t 为观测时间; c 为光速; t_r 为信号被接收机 r 接收的时间; t^s 为信号从卫星 s 发射的时间; τ_r^s 为信号从卫星 s 到接收机 r 的传播时间; ε_r^s 为码测量误差; $\delta \tau$ 为信号从卫星天线到接收机天线的传播时间; d_r 为接收机端的硬件码延迟; d^s 为卫星段的硬件码延迟; ρ 为卫星到接收机的几何距离; I_r^s 为电离层延迟; T_r^s 为对流层延迟; δm_r^s 为对路径延迟; N 为载波相位整周模糊度; ε 为相位测量误差; b_r^s 为包含卫星和接收机端初始相位和硬件延迟的模糊度项, 表示为

$$b_r^s = f[\delta \tau_r(t) + \delta \tau^s(t - \tau_r^s)] + N_r^s + [\phi_r(t_0) - \phi^s(t^s)]. \quad (3)$$

1.2 函数模型

UofC 模型是 PPP 定位中常用的函数模型, 表达式如下:

$$P_{IF,i} = \rho + c(\delta \tau_r - \delta \tau^s) + T + \delta m + \frac{\lambda_i b_i}{2} + \varepsilon_{P_{IF}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{IF} = \rho + c(\delta \tau_r - \delta \tau^s) + T + \lambda_{IF} b_{IF} + \delta m + \frac{\lambda_i b_i}{2} + \varepsilon_{\Phi_{IF}}. \quad (5)$$

式中的符号表示量与式(1)和(2)相同。

1.3 参数随机模型

在 PPP 定位中, 卡尔曼滤波参数估计模型是常用的参数估计方法, 其过程如下^[5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \Phi_{k+1} \mathbf{X}_k + \mathbf{w}_k, \mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k), \\ \mathbf{L}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \mathbf{v}_{k+1} \sim N(0, \mathbf{R}_{k+1}). \end{aligned} \quad (6)$$

(7)

式中: k 表示观测历元时刻; $\mathbf{X}_k$ 表示状态向量; Φ_{k+1} 为转移矩阵; $\mathbf{w}_k$ 为动态噪声; $\mathbf{Q}_k$ 为 $\mathbf{w}_k$ 的协方差阵; $\mathbf{L}_{k+1}$ 为观测向量; $\mathbf{H}_{k+1}$ 为系数阵; $\mathbf{v}_{k+1}$ 为观测噪声; $\mathbf{R}_{k+1}$ 为 $\mathbf{v}_{k+1}$ 的协方差阵。

将式(6)和(7)进行线性化, 进一步得到:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{w}_k, \quad (8)$$

$$\mathbf{L}_{k+1} = \tilde{\mathbf{L}}_k + \mathbf{H}_{k+1}(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k) + \mathbf{v}_k. \quad (9)$$

利用式(8)和(9)进行滤波估计, 过程如下:

第一步定权:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^-. \quad (10)$$

第二步进行改正:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{L}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_k^-), \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^-. \quad (12)$$

第三步进行预测:

$$\mathbf{X}_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{X}}_k, \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \Phi_{k+1,k} \mathbf{P}_k \Phi_{k+1,k}^T + \mathbf{Q}_k. \quad (14)$$

式中, $-$ 表示预测, 滤波实际是不断的“预测—修正的过程”。卡尔曼滤波在实际应用中要根据实际环境选择合适的参数才能发挥其最佳性能。

2 数据质量分析

GNSS 定位性能、精度以及可靠性很大程度上取决于 GNSS 观测数据质量, 因此在进行数据处理之前需要进行数据质量评估。GNSS 数据的质量常规的评估指标主要有路径效应、信噪比(SNR)、卫星可见数和位置精度因子(PDOP)值等几个方面^[6-7]。

本文对国内某超高层建筑进行变形监测采样的是 BDS/GPS 双模接收机, 可以同时接收到 BDS 和 GPS 观测数据, 首先对 BDS 与 GPS 数据质量进行评估。

2.1 SNR 分析

SNR 是信号强度噪声的比值, 是评估 GNSS 数据质量的一项重要指标, 主要用来评估数据质量好坏, SNR 越高, 证明数据质量越好。

如图 1、2 所示, BDS 和 GPS 的 SNR 都大于 30 dB-Hz, 能达到 GNSS 数据质量评估 SNR 的最小值。由图可以看出, BDS 的 SNR 最大值可以达到 49 dB-Hz, 而 GPS 的 SNR 最大值可以达到 52 dB-Hz。

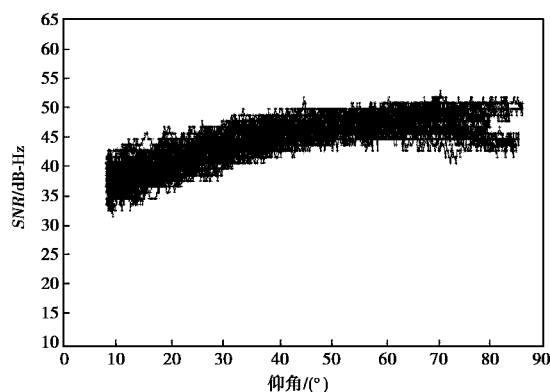


图 1 GPS 信噪比

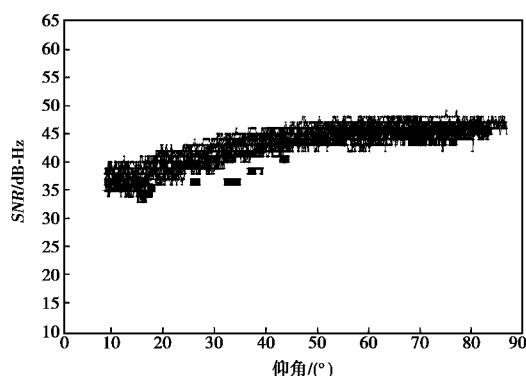


图2 BDS 信噪比

2.2 多路径分析

在 GNSS 测量中,信号在传播过程中会受到传播路径上各种物质的折射,因此导致接收机收到了不同折射信号的叠加,从而导致观测值偏离真值,观测值与真实值之间存在误差,这种误差即为多路径误差,由于多路径的信号传播所引起的干涉时延效应称为多路径效应。

如图 3、4 所示,BDS 和 GPS 多路径误差都在 2 m 之内,但是对比 BDS 和 GPS 多路径误差可以发现,在 BDS 观测数据中存在明显的系统偏差^[8-10],而在 GPS 观测数据中未发现这种系统偏差。

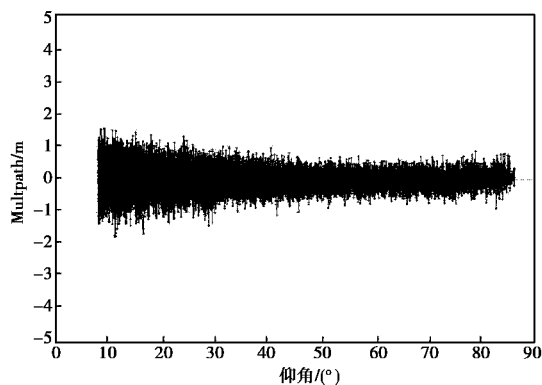


图3 GPS 多路径

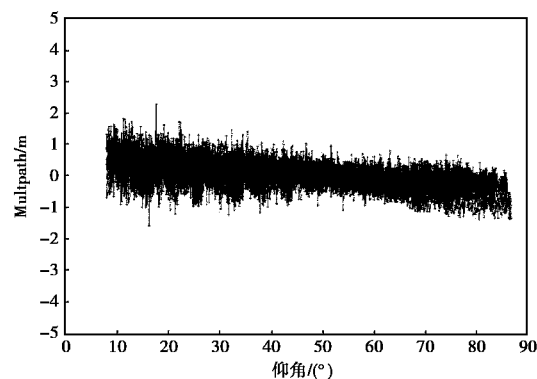


图4 BDS 多路径

2.3 卫星数以及精度因子分析

卫星可见数是指在监测点接收机在监测时间段内可以接收到的卫星数. PDOP 是卫星分布的空间几何强度因子,一般卫星分布越好时,PDOP 值越小,一般小于 3 为比较理想状态。

如图 5、6 所示,BDS 和 GPS 卫星数都大于 6 颗,而在监测时间到 12 h 时 BDS 卫星数增多,多于 GPS 卫星数,因为监测区域位于我国,因此 BDS 卫星数多于 GPS 卫星数. BDS 和 GPS 的 PDOP 都要小于 3,卫星分布状态理想。

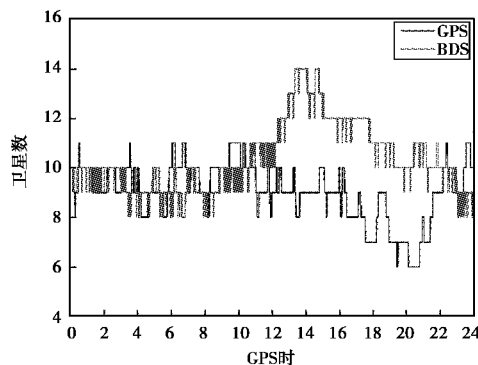


图5 卫星可见数

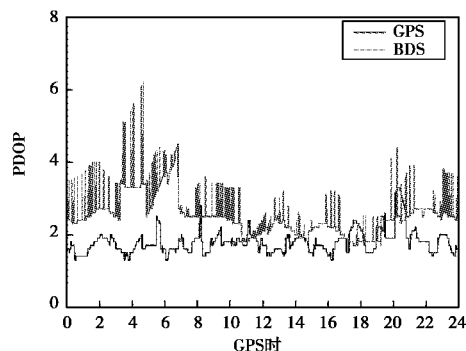


图6 几何精度因子 PDOP

3 实例分析

本文所进行的数据分析是基于国内某超高层建筑变形监测工程实例,监测时间是 2017 年,监测时长为 24 h,采样隔为 10 s,截止高度角为 15°,接收机为华测 1758 接收机.而监测点布设则是在超高层建筑楼顶四个方位固定四台接收机,以便对超高层建筑的整体现象进行监测分析.本文选取开始监测之后第 13—15 h 共三个小时时长的数据进行分析,而监测点则选取西侧点位(D1)和北侧点位(D2)两个方向的监测定位进行分析,只对 BDS 数据进行处理。

在对 BDS PPP 数据进行处理分析之前,先对此次 PPP 定位精度进行分析.由于此次采用的接收机为华测接收机,利用华测公司自带的软件对四个监测点进行静态基线解算,基线长度为 26 km,基准点则采用北京房山的 CORS 站,进行网平差解算,得到四个点的静态精密坐标. PPP 计算则利用目前最常用的软件 RTKLIB,PPP 计算坐标则选取最后一个历元坐标作为 PPP 的最终结果.二者的差值则作为点位中误差,如表 1 所示;统计两个监测点三个方向的 RMS 值如表 2 所示.

表 1 监测点三个方向中误差

点位	静态解算结果 /m	PPP 计算结果/m	误差 /mm
D1	-2 174 431.275	-2 174 431.285	10
	4 382 680.181	4 382 680.172	9
	4 078 738.426	4 078 738.407	19
D2	-2 174 440.749	-2 174 440.738	11
	4 382 696.521	4 382 696.511	10
	4 078 711.89	4 078 711.87	20

表 2 RMS 统计表

监测点	E	N	U
D1	0.011 7	0.015 5	0.020 7
D2	0.012 8	0.013 0	0.021 4

如表 1、2 所示,在收敛之后水平精度可以达到 1 cm,竖直精度可以达到 2 cm.

接下来对收敛之后连续 3 h 的监测数据进行分析,主要分析监测点坐标三个方向的形变信息,具体如图 7、8 所示.

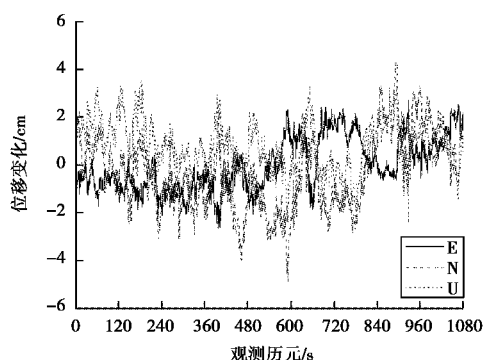


图 7 D1 点变形情况

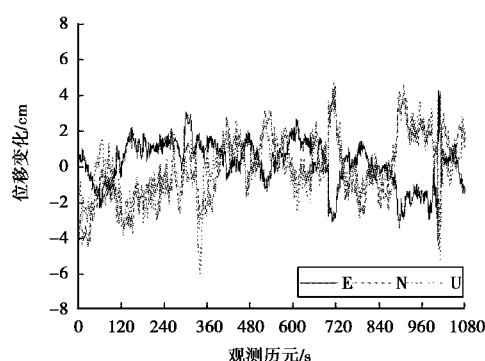


图 8 D2 点变形情况

图 7、8 示出了经过卡尔曼滤波后 2 个监测点的位移变化情况,从图上可以看出,超高层建筑的最大位移为 6 cm,N 方向和 U 方向的形变趋势一致,而 E 方向的变形比另外两个方向的变形小,超高层建筑变形呈周期性变化.

4 结 论

本文利用 BDS PPP 技术,以国内某超高层建筑实测数据为依托,先对 BDS 数据质量进行分析,然后分析超高层建筑复杂环境下 BDS PPP 定位精度及变形趋势,得出以下结论:

1)BDS 观测数据质量良好,但是在北斗二号(BDS-2)伪距观测数据中存在系统偏差;

2)在超高层建筑复杂环境下,BDS PPP 水平定位能达到 1 cm,垂直精度可达到 2 cm,能满足超高层建筑变形监测的精度要求,能完整测量出超高层建筑的整体变形情况,为今后的超高层建筑变形监测提供了一种可靠的技术手段.

参考文献

- [1] 毕航权. 基于多系统 PPP 的边坡监测技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [2] 王利,张勤,黄观文,等. GPS PPP 技术用于滑坡监测的试验与结果分析[J]. 岩土力学,2014,35(7):2118-2124.
- [3] 李黎,龙四春,王潜心,等. 基于精密单点定位技术的矿山变形监测分析[J]. 测绘科学,2014,39(6):70-73,111.
- [4] 张小红,李星星,郭斐,等. GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2008,33(8):783-787.

- [5] 关伟,单伶俐,肖倩.卡尔曼滤波在道路动态响应数据处理中的应用研究[J].自动化与仪表,2019,34(1):53-57.
- [6] 余文坤,戴吾蛟,杨哲.基于TEQC的GNSS数据质量分析及预处理软件的设计与实现[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):81-85.
- [7] 布金伟,左小清,常军,等.GNSS多星定位数据的质量分析[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2017,42(6):24-36.
- [8] 刘明亮.北斗数据质量及定位精度分析[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [9] 刘青锋,郭邦满,华学勇.北斗二代双频数据质量分析[J].测绘与空间地理信息,2018,41(7):122-125.
- [10] 白征东,吴刚祥,任常.北斗观测数据的质量检查与分析[J].测绘通报,2014(6):10-13.

作者简介

王炜栋 (1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为摄影测量与遥感、工程测量.

王明孝 (1964—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为摄影测量与遥感、卫星导航定位、三维建模等.

Deformation monitoring of super high-rise buildings based on BDS PPP

WANG Yidong^{1,2}, WANG Mingxiao³

(1. School of Surveying and Geospatial, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province National Geographic Monitoring Engineering Laboratory, Lanzhou 730070, China;

3. Army Research Institute of Science and Technology Innovation Research Center, Wuxi 214100, China)

Abstract: Deformation monitoring of Super high-rise buildings is an important part of the subsequent health assessment and safety assessment of super high-rise bulidings. At present, BDS Navigation Satellite System(BDS) has been widely used in building deformation monitoring. Based on BDS precise point positioning technology, this paper analyzes the deformation trend of three high-level monitoring points based on measurements of a super high-rise building in China. Results show that when the monitoring time reaches 1h, the data starts to converge, the positioning accuracy can reach centimeter level, and the deformation trend of super high-rise buildings can be monitored, which provides a new technical means for future deformation monitoring of super high-rise buildings.

Keywords: super high-rise; deformation monitoring; BeiDou Precise Point positioning; accuracy