

GPS 用于监测高层建筑物动态特征的模拟研究^{*}

罗志才¹ 陈永奇² 刘焱雄³

(1 武汉测绘科技大学地学测量工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)
(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系 香港九龙红磡)
(3 武汉测绘科技大学 GPS 研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要 设计了若干个振动实验以模拟高层建筑物在外力作用下的动态特征, 并采用动态 GPS 技术对此进行监测。实验数据的谱分析结果表明, 利用 GPS 观测数据至少可以精确地鉴别出高层建筑物的低频动态特征, 如相对位移和频率。该技术对于大型构筑物的安全监测将具有重要的实用价值。
关键词 动态 GPS 技术; 动态特征; 高层建筑物; 谱分析
分类号 P228.42

大型构筑物(如高层建筑物、大坝和桥梁等)动态特征的监测对其安全运营、维护及设计至关重要, 尤其要实时或准实时监测大型构筑物受地震、台风和洪水等外界因素作用下的动态特征, 如高层建筑物摆动的幅度(相对位移)和频率。高层建筑物的变形监测一般用加速度传感器、全站仪和激光准直等传统观测方法观测, 而大坝外观变形监测主要采用正倒锤线、弦矢导线、边角网和精密水准等常规方法。所有这些传统观测技术因受其能力所限, 在连续性、实时性和自动化程度等方面已不能满足大型构筑物动态监测的要求。近年来, 随着 GPS 硬件和软件技术的发展, 特别是高采样频率(如 10Hz 甚至 20Hz)GPS 接收机的出现以及 GPS 数据处理方法的改进和完善等, 为 GPS 技术应用于实时或准实时监测大型构筑物的动态特征提供了可能。GPS 定位技术已成功地应用于建立了隔河岩大坝外观变形自动化监测系统, 监测点水平分量和垂直分量的精度分别为 1.0mm 和 1.5mm (1~2h 解)^[1]。GPS 技术还分别应用于实时监测桥梁和深圳帝王大厦的动态特征^[2,3], 初步展示了 GPS 技术在监测大型构筑物动态特征方面的应用前景。目前, GPS 定位技术在这一领域的应用研究已成为热点之一。

本文以高层建筑物动态特征的监测为例, 首先设计了若干个振动实验以模拟高层建筑物受地震和台风等外界因素作用下的动态特征, 采用动

态 GPS 技术对此进行监测。然后对 GPS 观测数据进行处理与分析, 并与设计参数作比较, 旨在全面科学地评价采用动态 GPS 技术监测高层建筑物动态特征的能力及可行性。

1 高层建筑物动态特征的模拟与监测

1.1 实验设备

该实验所采用的设备包括: ①两台 NovAtel-Outrider-DL-RT2 双频 GPS 接收机, 其中一台作为固定站, 另一台为流动站, 其最高采样频率为 10Hz; ②振动设备如图 1 所示, 其中图 1(a)用于振动频率为 1Hz 以上的振动实验, 图 1(b)用于振动频率为 1Hz 以下的振动实验。此设备用于提供振幅约 100mm 和频率为 0.2Hz~5Hz 的简谐振动环境, 并为评价 GPS 观测结果提供精确的频率基准和位移基准。

1.2 动态特征的模拟

一般来说, 在外力(如台风、地震和车载等)作用下, 高层建筑物的摆动和大型桥梁的振动具有简谐性质, 并且随着外力的变化其摆动(或振动)的幅度和频率也在变化, 因此, 动态特征的模拟主要考虑以下两种情况。

1)高层建筑物的摆动或大型桥梁的振动满足简谐运动方程, 但摆动(或振动)过程中其振幅

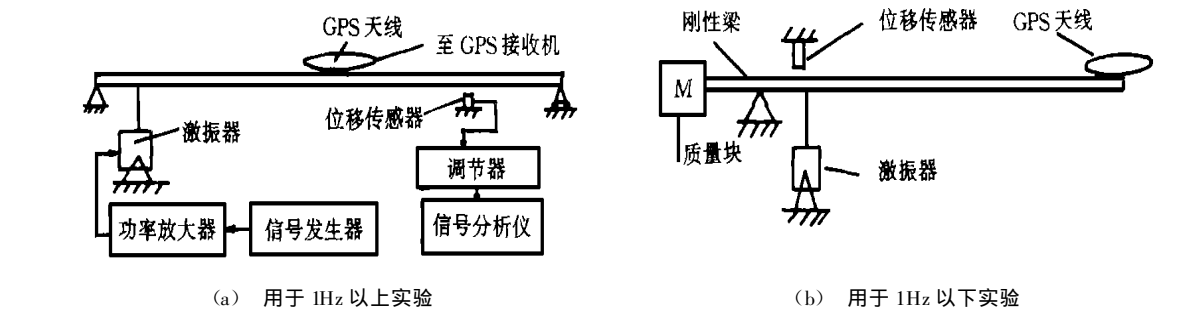


图 1 GPS 振动实验装置

Fig. 1 Vibrating Unit for GPS Test with Frequency

和频率有突变。简谐运动方程为:

$$y = A\sin(2\pi ft + \varphi_0) \tag{1}$$

式中, A 为振幅; f 为频率; y 为位移量; φ_0 为初相位; t 为时间。

2) 高层建筑物的摆动或大型桥梁的振动频率保持不变, 而振幅成指数衰减。运动方程为:

$$y = Ae^{-\alpha(t-\tau)}\sin(2\pi f(t-\tau)) \tag{2}$$

式中, α 为衰减系数; τ 为初始时刻; 其他各量的含义同式(1)。

为了比较全面地评价动态 GPS 技术监测高层建筑物动态特征的能力, 在水平方向和垂直方向上分别设计了一系列振动实验, 表 1 仅给出了其中有代表性的 4 组振动实验的设计参数。

1.3 动态特征的监测

如图 1 所示, GPS 流动站的天线固定在刚性金属梁的一端, 或者固定在弹性金属梁中间的适当位置, 而 GPS 固定站与之相距 10m 左右, 并采用动态 GPS 相对定位技术对上述模拟的动态特征进行监测。在整个 GPS 数据采集过程中, 每个振动状态采集数据的时间约为十几 min, 采样频率为 10Hz, 设置卫星最低高度角为 10° , 最少卫星数为 5。此外, 为了尽可能减小外界环境(如风和障碍物等)对振动设备和 GPS 测量的干扰, 实验场地选择在南京航空航天大学某 6 层教学楼的楼顶开阔平台上。受振动设备工作条件的限制, 整个实验只能在晴天或阴天进行。

表 1 各振动状态的谱分析结果

Tab. 1 Spectral Analysis Results of Various Vibrating Status

振动状态		振 幅			频 率		
		已知值/mm	估计值/mm	相对误差/%	已知值/Hz	估计值/Hz	相对误差
水平振动	状态一	80.0	78.5	1.9	0.20	0.199 9	5.0×10^{-4}
		49.8	48.8	2.0	0.40	0.399 7	7.5×10^{-4}
	状态二	100.0	97.4	2.6	1.062	1.062 9	8.5×10^{-4}
垂直振动	状态一	49.0	47.9	2.2	0.20	0.199 9	5.0×10^{-4}
		79.3	77.4	2.4	0.40	0.399 7	7.5×10^{-4}
	状态二	80.0	77.5	3.1	1.287	1.278 5	6.6×10^{-3}

2 数据处理与分析

2.1 数据处理方法

实验数据的处理包括: ①GPS 基线解算, 采用 NovAtel 公司提供的数据后处理软件 Soft-surv1.5 对 GPS 原始观测数据进行分析 and 处理, 解算出流动站每个历元相对于固定站的坐标变化(简称 GPS 相对位移), 即得到 GPS 流动站相对坐标变化的时间序列数据。为清楚起见, 图 2(左边部分)给出了某一小段时间相对位移的变化过程曲线。②对上述相对位移的时间序列数据作谱分析, 估计 GPS 观测结果中所隐含的周期信号的

特征, 并将估计结果与振动设备所提供的标准结果进行比较, 以便评价采用动态 GPS 技术监测高层建筑物动态特征的能力及可行性。

本文应用自回归模型作谱分析, 以下简称 AR 谱分析。设 x_n 为相对位移的时间序列数据, 则 AR 模型定义为: $x_n = \sum_{i=1}^p a_i x_{n-i} + e_i$, 其中, a_i 为 AR 模型的系数, 可由 x_n 根据 Yule-Walker 方程导出; p 为 AR 模型的阶数, 由 FPE 和 AIC 准则确定^[4]; e_i 代表白噪声。

AR 谱分析一般可通过 Burg 算法和 Marple 算法来实现。研究表明, Marple 算法比 Burg 算法能得到更加精确的频率估计^[3], 因此本文采用

Marple 算法。图 2(右边部分)为分析各振动状态所得到的频谱特性曲线图。

2.2 结果分析

图 2(a)、2(e)分别表示水平振动和垂直振动过程中振幅和频率有突变时相对位移的变化过程曲线;图 2(c)、2(g)分别表示水平振动和垂直振

动过程中频率保持不变而振幅成指数衰减时相对位移的变化过程曲线。这些图清楚地反映了振动过程中振幅和频率的变化情况,直观上表明,动态 GPS 技术能监测到这种动态变化特征。需要说明的是,因数据采集过程中风的影响较大,而振动设备是一个开环系统,不能补偿外界的影响,并且

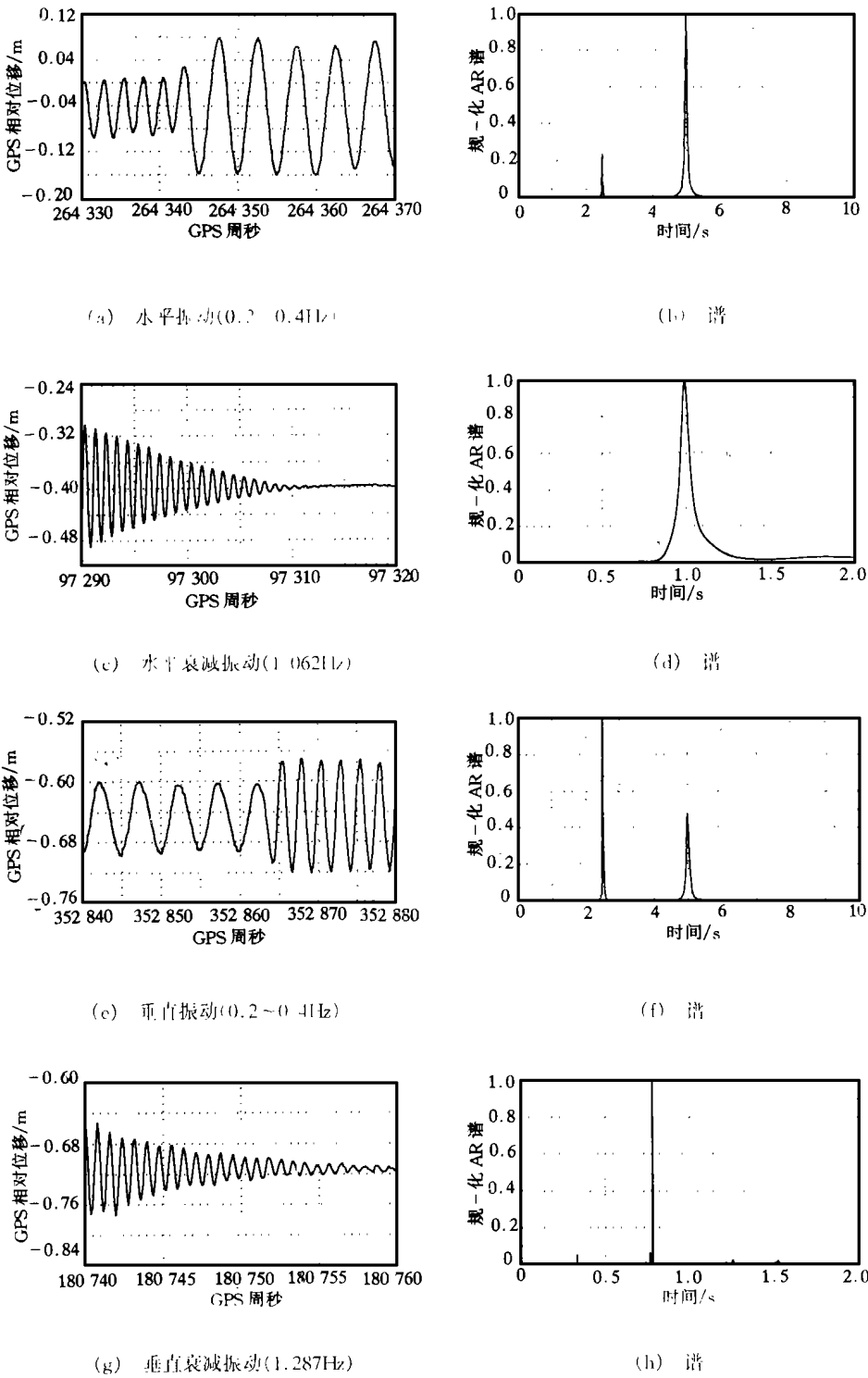


图 2 各振动状态由 GPS 观测得到的相对位移随时间的变化曲线及其频谱曲线
Fig.2 Relative Displacements from GPS and Corresponding Normalized Auto-regressive Spectra for Various Vibrating Status

振动设备本身还存在误差,因此,实验过程中振动设备提供的振幅实际上是不够稳定的,表 1 给出的是平均值。图 2(a)、2(e)的结果与这一实际情况很吻合,直观上也说明了动态 GPS 技术能监测到这种微小变化。

表 1 列出了各振动状态的谱分析结果和统计比较结果,表中已知值代表振动设备提供的结果;估计值是由 GPS 观测结果分析得到的。从表 1 可以看出,利用 GPS 观测结果均可以较准确地提取各振动状态的动态特征,并且对于相同的采样频率,由 GPS 观测结果提取振幅和频率的误差随着振动频率的提高存在增大的趋势。这说明,如果要精确地反映大型构筑物的动态变化特征,则应尽可能采用具有高采样频率的 GPS 接收机。

3 结论与建议

高层建筑物摆动的频率受其结构、使用材料、高度、环境温度变化和风压等外界因素的影响,一般在 0.1Hz ~ 10Hz 之间变化。从本文的实验分析结果可以看出,目前采用动态 GPS 技术至少可以较准确地监测高层建筑物的低频动态特征。随着 GPS 接收机采样频率的提高,今后还可以监测高层建筑物更高频率的动态特征。动态 GPS 技术的这一能力同样适用于其他类似大型构筑物的动态变形监测。本文的研究结果为动态 GPS 技术在这些领域的应用提供了科学依据。

高层建筑物的实际运动比较复杂, GPS 测量的外部环境一般不是很理想,因此,从实际应用角度考虑,特提出以下几点供参考。

(1)为提高 GPS 观测结果的精度和可靠性,除在高层建筑物的关键点位上安置 GPS 接收机外,至少应设置两个 GPS 固定站(或基准站)。

(2)研究减小多路径误差的方法和措施,这项误差在高层建筑物的动态变形监测中较为明显。

(3)尽可能采用具有高采样频率的 GPS 接收机,以便更好地反映高层建筑物动态变形的细节。

(4)将高层建筑物的动态变形监测与其结构设计结合起来,为高层建筑物的设计提供科学依据。

(5)进一步改进和完善 GPS 接收机的抗干扰技术及数据处理软件。

在上述基础上,最终建立高层建筑物动态变形自动化监测与预警系统,该系统应具有 GPS 数据采集、数据传输、数据处理与分析、预警等功能。

致谢:本次实验设计的振动设备由南京航空航天大学振动工程研究所提供,NovAtel-Outrider-DL-RT2 双频 GPS 接收机由香港佳能测量师行陈德祥先生提供,在此深表感谢!

参 考 文 献

- 1 徐绍铨,李征航,柳太康,等. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的建立. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(增刊): 1 ~ 4
- 2 Ashkenazi V, Dodson A H, Moore T, et al. Monitoring the Movements of Bridges by GPS. In: Proceedings of ION GPS 97, 1997. 1 165 ~ 1 172
- 3 Guo J J, Ge S J. Research of Displacement and Frequency of Tall Building under Wind Load Using GPS. In: Proceedings of ION GPS 97, 1997. 1 385 ~ 1 388
- 4 Akaike H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In: Petrov B N, Csaki F eds. 2nd International Symposium Information Theory. Budapest: Akademi Kiado, 1973. 267 ~ 281
- 5 Zheng D W, Luo S F. Contribution of Time Series Analysis to Data Processing of Astronomical Observations in China. Statistica Sinica, 1992, 2(2): 605 ~ 618

罗志才,男,33岁,博士,教授,现从事物理大地测量及GPS应用研究。代表成果:卫星重力梯度边值问题的理论和方法。

E-mail: zcluo @hp01. wtusm. edu. cn

Application of GPS in the Simulation Study of Dynamic Characteristics of Tall Buildings

LUO Zhicai¹ CHEN Yongqi² LIU Yanxiong³

(1 School of Geo-science and Surveying Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

(3 GPS Research Center, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract Dynamic characteristics including relative displacements and vibrating frequencies, which are key to assessing drift and stress conditions of large structures such as tall buildings,

long-span suspension and cable-stayed bridges and tall chimneys, are difficult to measure directly, especially under the condition of earthquakes and strong winds or typhoons. In general, laser collimator, total station and accelerometers are the most common instruments used to monitor the response of structural systems, but can not work properly during earthquakes and strong winds or typhoons, and in most cases do not take place in real-time or near real-time yet. Until recently, there are no efficient or feasible methods to measure displacements during an earthquake or severe wind. Therefore there is a great need for developing new method or technology to monitor the dynamic characteristics of large structures precisely in real-time or near real-time during very bad conditions.

Fortunately, recent advances in Global Positioning System (GPS) technology allow reliable monitoring of above-mentioned long-period structures. GPS units with a capability of resolving motion at the centimeter or sub-centimeter level with sampling frequency 10Hz or even 20Hz are now available from several manufacturers. This provides a great opportunity to monitor long-period structures reliably. To the authors' best knowledge, the capability of identifying vibration characteristics from GPS observations has not been widely verified. For the scientific justification and feasibility of using kinematic GPS technology to identify the dynamic characteristics of tall buildings, some vibrating experiments are designed to simulate the movements of tall buildings in the paper, especially under the condition of earthquakes and strong winds or typhoons. The experimental equipment consists of: ① NovAtel-Outrider-DL-RT2 dual frequency GPS receivers with sampling frequency of 10Hz; ② vibrating unit, which is composed of power amplifier, signal generator, signal analyzer, regulator, exciter, displacement sensor, mass block and rigid beam or elastic beam, and which can supply simple harmonic vibration environment or damped simple harmonic vibration environment, and corresponding precise basis of vibrating frequency and amplitude. The intrinsic frequency supplied by vibrating unit is jointly determined by the mass of GPS antenna, the material and geometrical dimensions (length, width and height) of rigid or elastic beam. The paper also discusses in detail how GPS data are recorded, processed and analyzed. With post-process version of NovAtel's Softsurv software and auto-regressive (AR) spectral analysis method, relative displacements and corresponding vibrating frequencies can be derived from GPS observations. The results indicate that clear and accurate dynamic characteristics such as relative displacements and at least low frequencies can be identified by kinematic GPS technology. Moreover, with future advances in GPS technology and improvements in sampling capability, it will be possible to monitor short-period structures as well. This capability can be very useful to be used for the health monitoring purposes of large structures such as tall buildings and long-span or cable-stayed bridges. Considering the practical purposes, some suggestion is also given in the paper. Requisite procedures and software should be developed to permanently deploy GPS units on tall buildings, and to assess and mitigate the natural hazards such as typhoon, flood and earthquake affecting the structures, and methodologies on how the findings can be incorporated into useful practical design procedures.

Key words kinematic GPS technology; dynamic characteristic; tall buildings; spectral analysis

LUO Zhicai, male 33, Ph. D. professor. His major research orientations are physical Geodesy and application of GPS technology. His typical achievement is the theory and methodology of satellite gravity gradiometry boundary value problem.

Email: zcluo@hp01.wtusm.edu.cn