第28卷第2期 大地测量与地球动力学 Vol. 28 No. 2
2008年4月 JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS Apr., 2008

文章编号:1671-5942(2008)02-0120-03

RTK-GPS 测量建筑物振动的多频率成分分析*

谷 川[1)] 王丽华[1,2)] 万 军[2)]
(1)同济大学测量与国土信息工程系,上海 200092
2)上海达华测绘有限公司,上海 200136)

摘 要 提出利用 RTK-GPS(实时动态全球定位系统)技术观测建筑物多频振动,并采用信号参数识别法分析其多频振动成分。工程实例证实 RTK-GPS 技术能满足建筑物多频振动测量的精度要求,采用该信号参数识别法分析其频率成分是可行的。

关键词 RTK-GPS;建筑物振动;多频成分分析;频谱分析;参数识别
中图分类号:P227 **文献标识码**:A

MULTI-FREQUENCY COMPONENT ANALYSIS OF BUILDING VIBRATION MEASURED WITH RTK-GPS

Gu Chuan[1)], Wang Lihua[1,2)] and Wan Jun[1)]
(1) *Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai* 200092
2) *Shanghai Dahua Surveying & Mapping Co., Ltd, Shanghai* 200136)

Abstract The RTK-GPS(Real Time Kinematic Gloabal Position System) technique which can be used in the building multi-frequency vibration measurement, and a signal parameter identification method for the analysis of building multi-frequency vibration component is proposed. An actual engineering example testifies that RTK-GPS technique can meet the precision needs of building multi-frequency vibration measurement and the proposed method for analyzing its multi-frequency components is feasible.

Key words: RTK-GPS(Real Time Kinematic Gloabal Position System); building vibration; multi-frequency component analysis; spectral analysis; parameter identification

1 引言

随着 RTK-GPS 技术的发展和完善,特别是其精度和采样频率的提高以及软件的改进,将其应用于建筑物实时动态监测和振动特征分析已成为可能。科研人员利用 RTK-GPS 技术对建筑物的动态变形特征测量进行了大量的研究工作[1-7],均取得了很好的效果。

本文介绍了利用 RTK-GPS 技术进行建筑物振动分析的数据采集方法及多频率振动信号参数识别原理和方法,并用一个实例来说明该方法的使用过程和有效性。

2 RTK-GPS 用于建筑物振动数据采集

如图 1 所示,参考站固定在离建筑物一定距离的稳定处,且要求固定站的观测条件要好,以减少多路径效应等误差,提高观测精度。另外,采用两个或

* 收稿日期:2007-10-25
作者简介:谷川,男,1983 年生,博士生,主要研究精密工程测量、工业测量与测量数据处理. E-mail:guchuanhaha@163.com

两个以上参考站也可以提高观测精度。流动站一般设置在建筑物的顶部,主要是考虑到建筑物顶部观测条件较好并且顶部振幅最大,有利于减小测量误差对信号的影响,提高信噪比。GPS 接收机工作模式设置为动态测量模式,采样率根据需要设置,解算采用相位差分方法,以得到较高的测量精度。

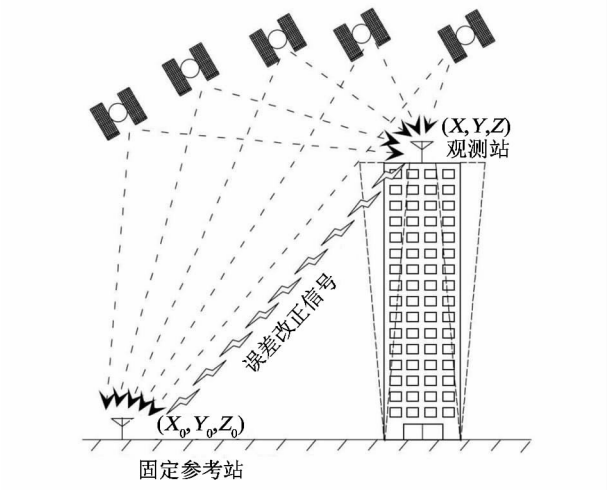


图 1　RTK 数据采集

Fig. 1　RTK data acquisition

3　多频率振动信号参数识别

振动信号多频率成分参数识别分两步进行:

1）确定信号中的主要频率成分

采用如下的算法可确定信号中的主要频率成分:先进行快速傅里叶变换,再根据频谱分析图幅值的大小确定信号中的主要频率成分,由经验估计各自所代表的意义,从而得到主要频率成分的精确值。本文中由于建筑物振动的频率事先无法由经验估知,所以直接采用由频谱分析得到的主频率。另外,由于建筑物的振动频率特征由建筑物的结构等因素决定,对于特定的建筑物来讲,主要振动频率是固定的,所以,可以考虑采用较长时间的数据序列进行频谱分析,以够减小观测误差对频谱分析结果的影响,得到更为准确的主频信息。

2）通过信号的多频率算法得到信号的解析表达式

信号中的主要频率成分确定以后,就可以利用最小二乘的原理通过时域拟合方法,确定出各频率分量幅值的大小。假设信号具有如下形式:

$$\hat{S}(t)=\sum_{i=1}^{n}[a_i\sin(2\pi f_i t)+b_i\cos(2\pi f_i t)] \quad (1)$$

可根据测试信号 $S(k)$、主要频率 $f_i(i=1\sim n,n$ 为信号中含有的主要频率数)、采样频率 f_s,确定各频率成份对应的正弦分量和余弦分量幅值 a_i 和 b_i。对该信号离散化后得到

$$\hat{S}(k)=\sum_{i=1}^{n}[a_i\sin(2\pi f_i t_k)+b_i\cos(2\pi f_i t_k)] \quad (2)$$

式中,$t_k=kT_s=k/f_s$,基于如下约束原理,可实现各频率分量幅值 a_i 和 b_i 的确定。

$$\min_{(a_i,b_i)}\varepsilon^2=\sum_{k=1}^{M}[S(k)-\hat{S}(k)]^2 \quad (3)$$

式中,M 为采样点数量。

根据多元函数极值理论,有如下关系式成立,

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\varepsilon_i^2}{\partial a_i}=0\\[2ex]\dfrac{\partial\varepsilon_i^2}{\partial b_i}=0\end{cases}\quad(i=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

把式(2)代入式(4)得:

$$\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{M}\sin^2(\theta_{1,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{1,k})\sin(\theta_{1,k}) & \cdots\\ \sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{1,k})\cos(\theta_{1,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos^2(\theta_{1,k}) & \cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{1,k})\sin(\theta_{n,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{1,k})\sin(\theta_{n,k}) & \cdots\\ \sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{1,k})\cos(\theta_{n,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{1,k})\cos(\theta_{n,k}) & \cdots\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{n,k})\sin(\theta_{1,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{n,k})\sin(\theta_{1,k})\\ \sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{n,k})\cos(\theta_{1,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{n,k})\cos(\theta_{1,k})\\ \vdots & \vdots\\ \sum_{k=1}^{M}\sin^2(\theta_{n,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos(\theta_{n,k})\sin(\theta_{n,k})\\ \sum_{k=1}^{M}\sin(\theta_{n,k})\cos(\theta_{n,k}) & \sum_{k=1}^{M}\cos^2(\theta_{n,k})\end{bmatrix}_{2n\times 2n}\boldsymbol{X}$$

$$=\begin{bmatrix}\sum_{k=1}^{M}s(k)\sin(\theta_{1,k})\\ \sum_{k=1}^{M}s(k)\cos(\theta_{1,k})\\ \vdots\\ \sum_{k=1}^{M}s(k)\sin(\theta_{n,k})\\ \sum_{k=1}^{M}s(k)\cos(\theta_{n,k})\end{bmatrix}_{2n\times 1} \quad (5)$$

式中,$\theta_{i,k}=2\pi f_i t_k$;$\boldsymbol{X}=[a_1,b_1\cdots a_n,b_n]^{\mathrm{T}}$。

很明显,以上法方程的系数矩阵是实对称矩阵。当信号中的主要频率数为 n 时,对应的多频率识别方程组的阶数应为 $2n$。求解该方程组就可实现信号的多频率成分的识别。用幅值和相位形式表示该信号

$$\hat{S}(t)=\sum_{i=1}^{n}A_i\cos(2\pi f_i t+\theta_i) \quad (6)$$

式中,$A_i=\sqrt{a_i^2+b_i^2}$,$\theta_i=a\tan(a_i/b_i)$。

4 建筑物振动信号的多频率成分参数识别

采用的采样数据长度为 10 s,采样频率为 10 Hz。首先对采样数据进行快速傅里叶变换,得到如图 2 所示的频谱分析图。

从图 3 的频谱分析图可以看到建筑物的振动主要有两个主频率,用 Data Cursor 工具得到这两个主频率的精确值分别为:$f_1 = 0.594\ 1$ Hz, $f_2 = 2.198$ Hz。

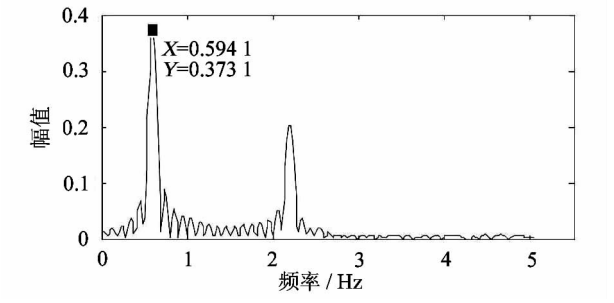


图 2 振动采样数据频谱分析

Fig. 2 Spectral analysis of sampled vibration data

采用文章第 3 部分的方法得到各主频率分量的幅值分别为:$a_1 = -0.069\ 7$ m, $b_1 = 0.360\ 6$ m, $a_2 = 0.133\ 2$ m, $b2 = -0.081\ 9$ m。

进一步计算得到:$A_1 = 0.367\ 3$ m, $\theta_1 = 0.190\ 9$ rad, $A_2 = 0.156\ 3$ m, $\theta_2 = 4.160\ 9$ rad。

实际观测数据与拟合数据之间的比较关系如图 3 所示:

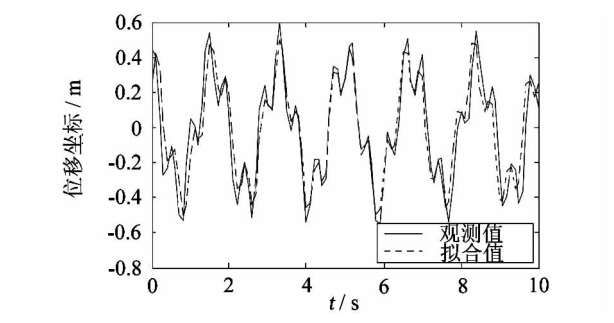


图 3 观测数据和拟合数据之间的比较

Fig. 3 Comparison between observed and fitted data

计算得到,拟合值与观测值之间较差的均方差为 $RMSE = 0.11$ m;拟合值与观测值之间的相关系数 $R = 0.93$,决定系数 $DC = 0.86$,由相关系数和决定系数两个指标可以看出用本文提出的方法进行建筑物振动多频率成分分析是可行的,能够得出接近于真实情况的频率、幅值等振动特征值。

5 结论

采用本文方法进行建筑物振动的多频率成分分析时应注意以下两点:

1)采用快速傅里叶变换进行建筑物振动采样数据的频谱分析时,由于对于特定的建筑物来说其主要频率是固定不变的,故可采用较长时间的采样数据,以尽量克服观测误差的影响,得出比较接近于真实情况的主要频率数据;

2)采用本文的方法进行各主频率分量幅值计算时,由于考虑到建筑物长时间振动受到风力、地面振动等因素的影响比较大,振幅会发生较大的变化,所以采用的采样数据时间不宜过长;但也不宜过短,过短的数据序列会导致法方程系数阵病态甚至秩亏,至少应有最小频率振动的半个周期的数据。

参 考 文 献

1 Çelebi M. GPS in dynamic monitoring of long – period structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20: 477 – 483.

2 Peter Breuer, et al. Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90:223 – 230.

3 Xu L, et al. Time frequency analysis of a suspension bridge based on GPS[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(1): 105 – 116.

4 Tamuraa Y, et al. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90:1 783 – 1 793.

5 Nickitopoulou A, et al. Geodesy monitoring dynamic and quasi – static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1 471 – 1 482.

6 Meng X, et al. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers [J]. Engineering Structures (2007), doi: 10. 1016 / j. engstruct. 2007. 03. 012.

7 戴吾蛟,丁晓利,朱建军. GPS 动态变形测量中的多路径效应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(1):65 – 71

7 Dai Wujiao, Ding Xiaoli and Zhu Jianjun. Study on multipath effect in structure health monitoring using GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(1): 65 – 71. (in Chinese)