

# Android 手机传感器的桥梁振动检测试验

刘志平, 朱丹彤, 杨磊, 杨丁亮

中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

**摘要** 针对 Android 智能手机传感器默认采样模式存在的采样率设置固化、欠采样和过采样问题, 开发了能够自定义采样率和采样精度, 具有采样历元、时间间隔和数据等同步记录功能的手机传感器信号采集软件。模拟加速度信号的功率谱分析和位移积分重构研究表明, L-S 谱分析法和频域位移积分法能够有效处理含噪声和非均匀采样的手机加速度信号。利用谷歌 Nexus 5 (NX 5)、小米 3 (Mi 3) 两个 Android 手机和 SPAN-IGM-A1 惯性组合导航系统进行徐州汉桥加速度信号采集和振动检测对比试验, 试验结果有效验证了便携式、低成本 Android 智能手机进行桥梁振动检测的可行性。

**关键词** Android 手机传感器; 振动检测; 非均匀时序; 功率谱分析; 频域积分

以 Android 智能手机为代表的移动终端技术, 由于其计算能力和所装备的内置多种传感器性能不断提高, 近年来在室内定位<sup>[1]</sup>、用户行为识别<sup>[2]</sup>及情景推理等方面开展了深入研究。当前, 智能手机正成为“人一物一机”三元世界相互沟通和融合的门户, 已经初步具备普适感知与应用的能力<sup>[3]</sup>。因此, 将智能手机理解为无缝感知、计算和通信的移动设备, 期望其在桥梁振动检测<sup>[4-5]</sup>、管道损伤检测<sup>[6]</sup>、水电机组振动<sup>[7]</sup>、地铁环境振动<sup>[8]</sup>等工程领域将得到拓展应用。

智能手机作为一种低价普及化、便携式移动终端, 其内置加速度传感器能够获得高频加速度信号, 可望为上述工程领域涉及的振动信号或频率检测提供时间序列数据。本文以智能手机加速度传感器为研究对象, 以振动信号功率谱分析<sup>[9-10]</sup>为研究方法, 进行 Android 手机传感器的振动检测试验研究。首先, 针对目前 Android 手机传感器信号采集存在的采样率和采样精度设置问题, 开发自定义采样率和采样精度的 Android 手机传感器信号采集软件。其次, 针对加速度信号的不等时间间隔问题, 分析 Lomb-Scargle 傅里叶变换 (L-S 变换) 与快速傅里叶变换 (FFT 变换) 的优劣, 比较加速度时域积分和频域积分的差异。以谷歌 Nexus 5 (NX 5)、小米 3 (Mi 3) 智能手机和 SPAN-IGM-A1 惯性组合导航系统分别采集徐州汉桥振动条件下的加速度数据, 结合功率谱分析与位移积分进行振动频率提取并对结果进行分析。

## 1 振动信号检测分析

### 1.1 Android 手机传感器信号采集

随着智能手机的发展与普及, 传感器技术在智能手机上的应用得到了极大发展。手机传感器的种类很多, 常见的有加速度计、磁力计、方向传感器、陀螺仪等<sup>[1]</sup>。本文以 Android 智能手机为研究对象, 开发基于智能手机的传感器信息读取和数据采集软件。该软件主要由传感器硬件信息、数据实时显示、数据采集 3 个部分组成, 结构如图 1 所示。其中, 硬件信息包括传感器名称、生产厂家、分辨率等信息, 数据实时显示则可动态地绘制传感器时间序列, 数据采集包括了标准采集模式和自定义采集模式。

现有手机传感器的采样率主要分为 4 种<sup>[11]</sup>: NORMAL (2×10<sup>5</sup> μs)、UI (6×10<sup>4</sup> μs)、GAME (2×10<sup>4</sup> μs)、FASTEST (0 μs, 实践中达不到连续采样)。然而, 上述 4 种默认模式不能对采样率进行自定义设置, 难以满足特殊的振动检测需求。此外, 上述 4 种默认模式在实际数据采集时不提供逐历元记录或采样时间间隔, 且存在较为严重的过采样和欠采样情况。因此, 本文开发采集软件除了具有 4 种默认采样率的标准采集模式, 还设计了自定义采集模式 (自定义采样率、采样精度、手机的自振动设置并记录数据历元), 界面如图 2 所示。主要包括惯性传感器 (加速度计、陀螺仪、磁力计) 和非惯性传感器 (气压计、设备温度计、环境温度计) 两类, 通过勾选相应复

收稿日期: 2016-12-29; 修回日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41204011, 41504032); 2016 年国家重点研发计划项目 (2016YFC0803103)

作者简介: 刘志平, 副教授, 研究方向为测量数据融合、导航位置服务、大地测量反演, 电子邮箱: zhpliu@cumt.edu.cn

引用格式: 刘志平, 朱丹彤, 杨磊, 等. Android 手机传感器的桥梁振动检测试验[J]. 科技导报, 2017, 35(10): 80-86; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.011

选框选择传感器,自定义最高采样率参见表1。

传感器数据采集具体内容包括:传感器数值、传感器精度值、数据采集时间与时间间隔。其中,传感器数值有效位保留到小数点后5位,传感器精度保留到小数点后1位时间时间间隔保留到小数点后6位(精确到 $\mu\text{s}$ )。数据存储按照传感器类型设置特定的后缀,例如加速计采集数据名以acce为后缀、磁力计以magn为后缀、陀螺仪以gyro为后缀名等。

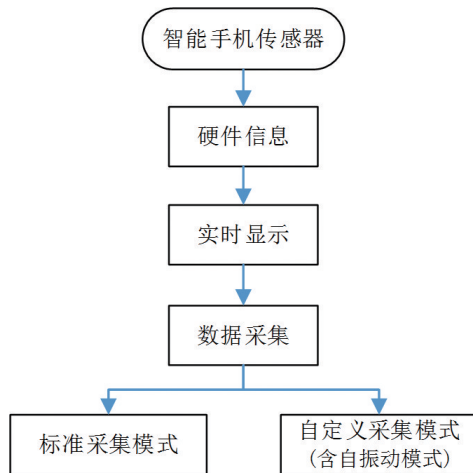


图1 手机传感器信号采集软件结构  
Fig. 1 Framework of smartphone sensor signal acquisition software



图1 手机传感器信号采集软件结构  
Fig. 1 Framework of smartphone sensor signal acquisition software

表1 本文所用智能手机的自定义最高采样率  
Table 1 Maximum sampling rate in custom sampling mode

智能手机	最高采样率/Hz		
	加速度计	陀螺仪	磁力计
Mi 3	100	100	100
NX 5	200	200	60

## 1.2 加速度振动信号检测分析方法

### 1.2.1 傅里叶功率谱分析

设某一离散时域振动信号为 $x(n)$ ,其归一化功率谱函数 $P(\omega)$ 为

$$P(\omega) = \frac{1}{N\sigma^2} |X(\omega)|^2 = \frac{1}{N\sigma^2} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (1)$$

式中, $\omega=2\pi f$ , $X(\omega)$ 为 $x(n)$ 的频谱函数; $\sigma^2$ 为 $x(n)$ 的方差; $f$ 为采样频率, $n$ 为采样点序号, $N$ 为信号总采样数。

利用式(1)可将时域的原始信号 $x(n)$ 分解一系列的谐波分量,从而获得原始信号的频率结构。需要指出的是,上述功率谱算法是基于FFT变换,要求信号为均匀时间序列。然而,实测振动信号往往是非均匀时间序列(如数据缺失),若仍然采用FFT变换则易产生虚假信号,会导致不可靠的功率谱估计结果。鉴于此,利用上节介绍的Android手机传感器信号采集软件(自定义采集模式)实时记录数据历元(即各历元数据采样时间),对采样时间间隔的非均匀性进行统计分析,并采用L-S变换进行功率谱分析。该变换方法适用于非均匀时序振动检测,可有效地消除因不等时间间隔导致的虚假信号。L-S法的归一化功率谱 $P_\lambda(f)$ 为<sup>[12-13]</sup>

$$P_\lambda(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[ \sum \Delta X_i \cos 2\pi f(t-\tau) \right]^2}{\sum \cos^2 2\pi f(t-\tau)} + \frac{\left[ \sum \Delta X_i \sin 2\pi f(t-\tau) \right]^2}{\sum \sin^2 2\pi f(t-\tau)} \right\} \quad (2)$$

式中, $\Delta X_i = X_i - \bar{X}$ , $X_i$ , $\bar{X}$ , $\sigma^2$ 分别为零均值时序、原时序、均值和方差; $f$ , $\tau$ 分别表示频率和相位。

### 1.2.2 时域积分法

设含观测噪声 $\varepsilon_a$ 的加速度信号为 $a(t)=a_0(t)+\varepsilon_a$ ,则通过时域积分获得的速度信号和位移信号可表示为<sup>[10,14]</sup>

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt = v_0 + v'(t) + \varepsilon_v \quad (3)$$

$$s(t) = \int_0^t v(t)dt = s_0 + v_0 t + s'(t) + \varepsilon_s \quad (4)$$

式中, $v_0$ 为振动信号的初始速度; $v'(t)$ 为 $a(t)$ 的原函数; $s_0$ 为振动信号的初始位移; $s'(t)$ 为 $v(t)$ 的原函数; $\varepsilon_v$ , $\varepsilon_s$ 分别为速度积分和位移积分误差项。

从式(3)和式(4)可看出,时域积分是对测得的加速度信号进行二次积分得到位移信号的方法,由于实测的加速度信号可能包含直流分量(趋势项)和观测噪声。因此,在对实测加速度信号进行时域积分时,应先去除趋势项。

### 1.2.3 频域积分法

频域积分利用傅里叶正、逆变换对加速度信号进行处理,积分在频域内以傅里叶分量系数的代换形式表示,可直接以频域内正弦、余弦的积分互换关系避开时域积分对微小观测噪声的累积放大作用,处理过程为先通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号,从而使积分运算转变为除法运算,再通过傅里叶逆变换得到时域内的位移信号。其基本原理如下<sup>[10,15]</sup>。

傅里叶变换的积分性质为

$$F\left[\int_0^{\infty} x(t)dt\right] = \frac{1}{j\omega} F[x(t)] \quad (5)$$

式中,  $x(t)$  为样本信号;  $F[\cdot]$  表示傅里叶变换。

设加速度信号为  $\{a_n\}$ , 对其进行傅里叶变换

$$A(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (6)$$

根据傅里叶变换积分性质式(5), 可得二次积分(频域位移)

$$S(n) = -\frac{A}{\omega^2} = -\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{(j2\pi k\Delta f)^2} H(k) a_n e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (7)$$

$$H(k) = \begin{cases} 1 & f_d \leq k\Delta f \leq f_u \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $H(k)$  为滤波器;  $\Delta f$  为频率分辨率;  $f_d$  为下限截止频率;  $f_u$  为上限截止频率。

对式(7)分别做傅里叶逆变换即可得到时域位移信号。可见, 频域积分直接以频域内正弦、余弦的积分互换为基础, 避免了观测噪声的累积放大, 使得计算结果更加准确。但式(7)表明, 对于低频信号而言( $k \rightarrow 0$ ), 其相对应的傅里叶分量的系数  $1/(j2\pi k\Delta f)^2$  趋向于无穷大, 导致低频信号中的误差对频域积分的整体精度影响较大, 即频域积分法具有低频敏感性。因此, 利用加速度传感器采集信号时, 考虑测得的信号在低频区间中存在观测误差, 应根据工程经验或实际信号频率结构选取截止频率, 以获得正确的频域法积分结果。

## 2 仿真及试验结果分析

### 2.1 仿真信号分析

为比较 FFT 与 L-S 两种谱分析方法处理非均匀时间序列的优劣, 以及时域积分、频域积分的信号重构能力, 本节采用模拟信号进行对比研究, 模拟的加速度信号和位移信号为

$$a(t) = -a(2\pi f_1)^2 \cos(2\pi f_1 t) - b(2\pi f_2)^2 \cos(2\pi f_2 t) \quad (9)$$

$$x(t) = a \cos(2\pi f_1 t) + b \cos(2\pi f_2 t) \quad (10)$$

式中, 振幅  $a, b$  均为 10 mm, 主频率  $f_1, f_2$  分别为 5、20 Hz。

首先模拟均匀时序, 信号采样频率 80 Hz, 采样时间 60 s。考虑到实际测量误差, 在加速度信号中添加 1% 水平的高斯白噪声。为模拟不等时间间隔的非均匀时序, 利用均匀随机分布产生一定数量的时序数据序号(由数据缺失比例控制, 分别取 0%、5% 和 25% 这 3 种不同情况), 将相应序号的时序数据删除, 即得均匀或非均匀时间序列。对模拟的时间序列分别利用 L-S 法(频率计算分辨率为 0.05 Hz)和 FFT 法进行功率谱估计。图 3 表示缺失比例  $\Delta$  分别取 0%、5% 和 25% 的加速度 L-S 和 FFT 功率谱估计结果。

从图 3 可看出, L-S 法与 FFT 法有不同的特点。在处理均匀时序(缺失比例为 0)时, L-S 法与 FFT 法所得结果完全一致, 均能反映真实的频率结构。但对于非均匀时间序列(缺失比例为 5% 和 25%), 两者所得功率谱有较大差异。FFT 功率谱出现虚假谱峰, 且缺失比例越大, 主频率谱峰不确定度越大, 虚假谱峰越显著, 频率结构越失真。当缺失比例为 0.25

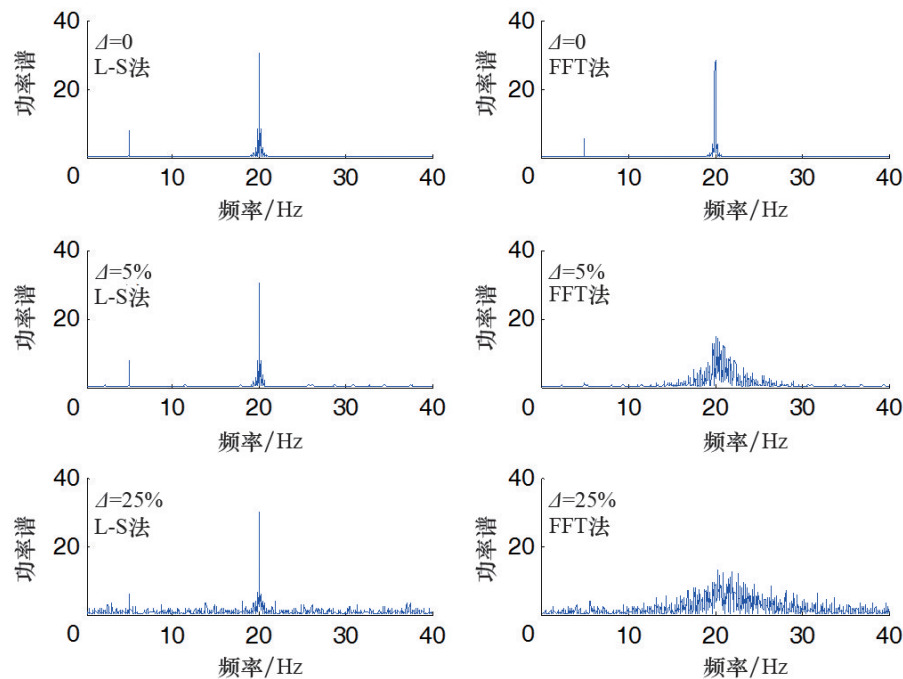


图3 不同时序的L-S与FFT功率谱

Fig. 3 Both L-S and FFT Spectrum analyses for different time series

时,FFT功率谱已无法正确识别信号频率结构;而L-S法功率谱依然能较好地反映了真实频率结构。因此,在非均匀时间序列的谱分析应用中,L-S法优于FFT法。

为比较时域积分、频域积分的信号重构能力,对模拟加速度信号(均匀时序)分别进行时域和频域积分,将所得积分位移与真实位移求差,计算结果如图4所示。从图4可看出,时域积分与频域积分的结果有明显差别,时域积分法所求位

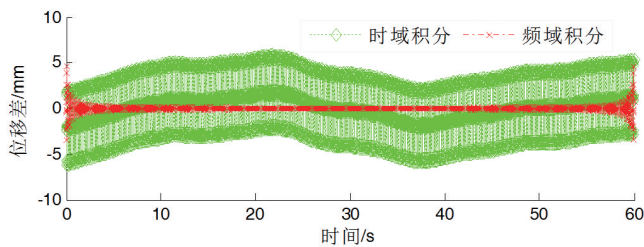


图4 时域-频域积分位移与真值之差

Fig. 4 True errors of both time-domain and frequency-domain integration displacement

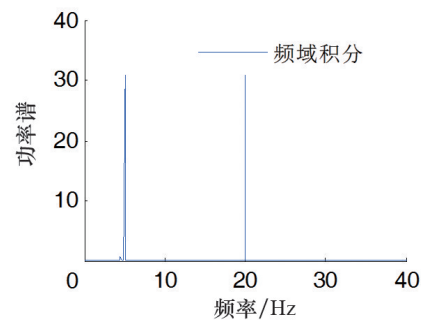
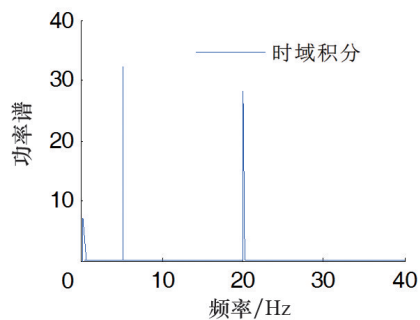


图5 时域、频域积分位移的功率谱

Fig. 5 L-S Spectrum analyses for both time-domain and frequency-domain integration

## 2.2 徐州汉桥振动检测试验

为验证智能手机传感器对桥梁振动检测的可行性,本节采用手机加速度计传感器(零偏稳定性约为2 mg)和SPAN-IGM-A1 惯性组合导航系统(加速度计零偏稳定性为0.1 mg),设计以下试验方案进行加速度数据的采集(智能手机与惯性组合导航系统均采用三轴加速度计,但顾及振动信号主要在桥平面法线方向或竖直方向,因此下文仅处理竖直方向的加速度时间序列)。具体设计方案如下。

方案A:室外振动环境下,分别选用NX 5和Mi 3智能手机放置在徐州汉桥北端东侧桥头堡水泥桥面,同步进行桥梁振动检测试验(两手机沿路线距离约4 m,开始时间为早上约8:00),利用本文软件采集桥梁振动的加速度信号,采样频率为50 Hz,采集时间为10 min。对实测加速度信号采样时间间隔的非均匀性进行统计分析,并采用L-S法对原始的加速度信号和频域法积分位移信号进行谱估计,所得结果如图6和图7所示。此外,同时采用SPAN-IGM-A1 惯性组合导航

移产生较为明显“时移”现象,且误差随着时间累积导致逐渐偏离真实位移,其均方根误差为2.91 mm。而频域积分法所求位移除开始时间与真实位移相差较大以外,其余时间与真实位移均能保持较高的一致性,其均方根误差为0.26 mm。故频域积分法能够获得更加有效的位移信号。

为进一步比较时域积分法和频域积分法重构信号的效果,分别对时域和频域积分位移进行功率谱估计,以对比积分前后的信号功率谱变化,结果见图5。由图5可得,就主频率位置来看,5和20 Hz均出现明显的波峰,两者基本一致;但是,由于误差在低频段的放大作用,导致时域积分法所求位移在0.05 Hz处出现波峰,破坏了原有加速度信号的频率结构,而频域位移通过设置低频截止频率有效地降低了低频误差的影响。此外,与图3相比,主频率(5 Hz)的功率值显著增大,分析认为是由于二次积分对低频段能量的放大作用所致。因此,利用频域积分方法所求位移更接近真实位移,且对频率结构的表达更为准确,故下文采用频域积分法进行位移信号重构。

系统开展振动检测对比实验,惯性系统安置距离Mi 3智能手机位置约20 cm,采样频率200 Hz,采样时间10 min,采用L-S法对惯性组合导航系统所采集加速度信号和频域积分位移信号进行谱估计,所得结果如图8所示。

方案B:室内无振动环境下,选用Mi 3手机,利用本文软件分别设置手机静止、手机内置振子振动状态,采集相应的加速度信号,采样频率为80 Hz,采集时间为10 min。采用L-S法对静止和内置振子振动加速度信号进行谱估计,结果如图9所示。

由图6可以看出,50 Hz采样率的标准时间间隔为20 ms,但实际采样间隔的区间统计结果显示:NX 5智能手机采样时间间隔在 $[0, 15 \text{ ms})$ , $[15, 25 \text{ ms})$ , $[25 \text{ ms}, +\infty)$ 3个区间的比例分别为19%、68%和13%;Mi 3智能手机采样时间间隔在3个区间的比例分别占10%、86%和4%。由此可知,智能手机采集的加速度信号不严格满足50 Hz采样率要求,无法采用FFT法进行谱估计。进一步计算可得,NX 5智能手机采样时间间

隔最小值 1 ms、最大值 159 ms、均值 19.9 ms; Mi 3 智能手机采样时间间隔最小值 1 ms、最大值 169 ms、均值 19.7 ms, 均为非均匀时间序列但基本满足所设置的 50 Hz 采样率要求。因此采用 L-S 谱估计法进行频率结构检测。

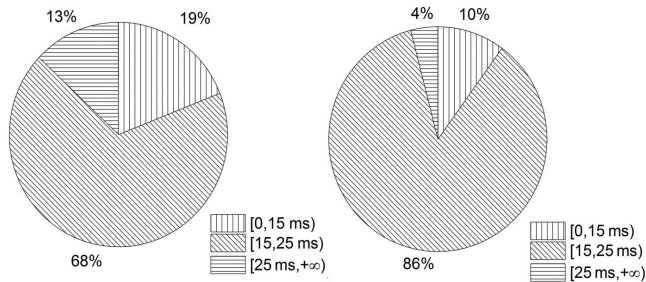


图6 采样时间间隔区间统计结果(采样率 50 Hz)

Fig. 6 Statistical results of sampling time interval (50 Hz sampling rate)

从图7可以看出, NX 5 和 Mi 3 两手机加速度信号分别在 7.5、8.5 Hz 处和 7.5、9.2 Hz 出现明显的主频率谱峰, 同时在 1.3、5.3、10.5、14.5、17.5 Hz 处出现功率较小的弱谱峰, 其功率约为最大功率的 11%~28%, 表明两手机谱分析的频率结构基本一致。由于桥梁自振频率一般为 1 Hz 以下<sup>[4]</sup>, 表明上述主频率谱峰应为车辆荷载引起的桥梁环境振动响应信号。从图8频谱分析可知, 高精度惯性组合系统所得的加速度信号除在 7.5、8.9 Hz 处有较大功率谱峰外(与手机主频率谱峰一致), 在 5.3、12.4、14.5、15.5 Hz 处均出现功率略小的弱谱峰, 约为最大功率的 30%~44%, 远高于智能手机弱谱峰功率值。

对比图7和图8可得, 限于普通智能手机加速度计精度水平, 目前可以准确地检测出车辆荷载条件下的桥梁环境振动响应信号(高频响应信号功率较大), 而难以检测出桥梁低频自振信号(低频自振功率低)。值得关注的是, 随着智能手机内置传感器精度水平的不断提升, 其桥梁振动检测能力将可望逼近高精度惯性导航系统, 从而极大提高桥梁振动检测便携性并有效降低成本。此外, 无论智能手机还是高精度惯性系统, 积分前后的原始加速度信号和频域积分位移的主频率结构完全一致, 表明采用频域位移积分法可恢复桥梁振动主频信号。需指出的是, 由于频域积分法采用中高通滤波(6~20 Hz)且低频段高于高频段能量, 易导致加速度信号经频域位移积分后主频功率呈增大特征, 同时下限截止频率附近(6.5 Hz)出现放大的虚假谱峰。

为进一步合理揭示车辆荷载为方案 A 桥梁振动信号功率谱的振动源, 利用方案 B 获得手机静止和手机内置振子自振的加速度信号功率谱特征, 结果如图9所示。从图9可看出, 静止状态和振动状态下加速度信号的频率结构具有明显的不同: 手机静止时, 功率谱没有明显的主频率谱峰, 整个功率谱表现为平稳序列; 手机自振时, 功率谱显示在 25~33 Hz (Mi 3 智能手机振子的频率) 的频段内能量较为集中, 且具有显著的主频率(29.3 Hz)谱峰。因此, 比较图7、图8和图9可得, 车辆荷载、手机静止和自振情况下具有完全不同的信号频率结构, 利用智能手机和 L-S 功率谱分析可以进行桥梁振动的高频响应信号检测。必须指出的是, 随着智能手机内置加速度等传感器的硬件质量不断提升, 可以期望检测低频信号特征。

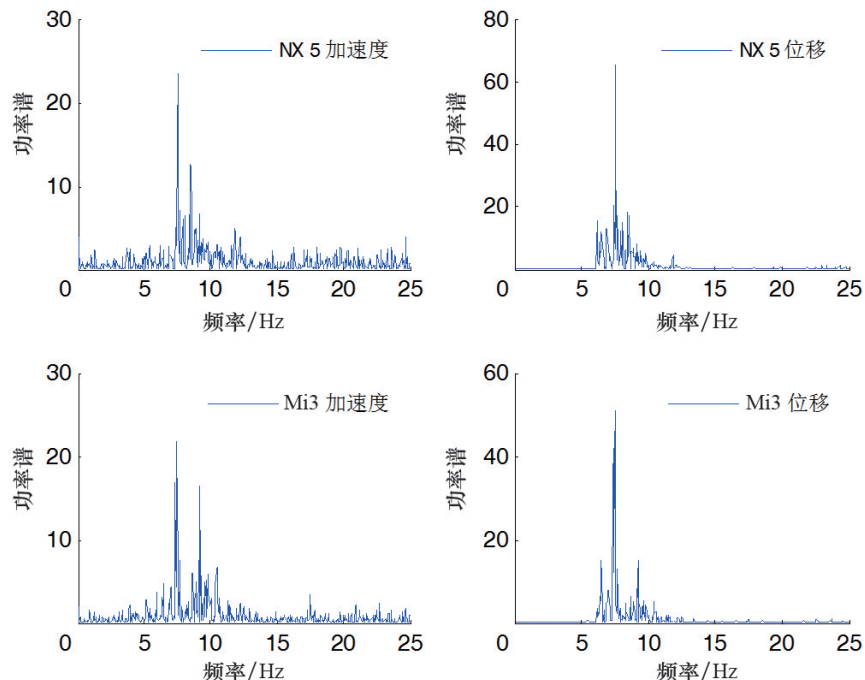


图7 智能手机加速度信号和积分位移 L-S 法功率谱

Fig. 7 L-S spectrum analyses for acceleration signal and frequency-domain integration displacement by using smart phone

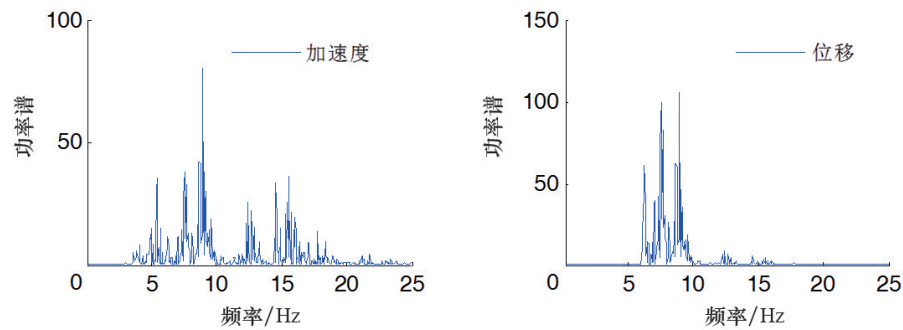


图8 惯性组合系统加速度信号和积分位移L-S法功率谱

Fig. 8 L-S spectrum analyses for acceleration signal and frequency-domain integration displacement by using SPAN-IGM-A1

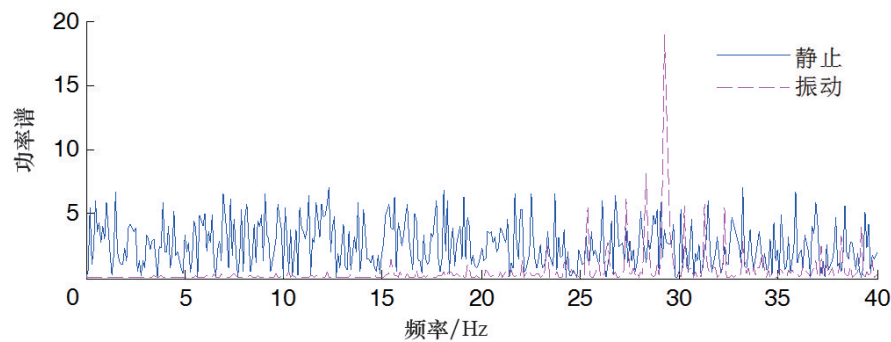


图9 智能手机静止和振动状态的L-S法功率谱

Fig. 9 L-S spectrum analysis for acceleration signal by using smart phone under stationary and vibration state

### 3 结论

1) 针对目前 Android 手机传感器信号默认采集模式不能记录采样时间间隔以及存在的过采样和欠采样等问题,开发了基于智能手机的传感器信号采集软件。利用该软件可以对采样率和采样精度进行自定义设置,而且同步记录传感器数据以及记录采集历元时间和时间间隔( $\mu\text{s}$ 级),满足非均匀时序 L-S 频谱或功率谱分析的需要。

2) 利用仿真的加速度信号分析比较了 FFT 与 L-S 功率谱分析法、时间域与频率域加速度二次积分方法,结果表明采用 L-S 功率谱分析法和频域积分法能正确地处理带有噪声的非均匀时间序列。基于,利用 NX 5、Mi 3 智能手机和高精度惯性导航系统开展的徐州市汉桥振动检测试验表明,Android 智能手机加速度信号能够检测桥梁荷载下的高频振动响应信号,但桥梁低频自振信号的正确识别则有待手机加速度传感器硬件质量的提高。

**致谢:**SPAN-IGM-A1 惯性组合导航系统加速度信号采集得到了张秋昭、蒋晨的帮助。

#### 参考文献(References)

[1] 刘志平,余前勇.多传感器融合的手机室内三维定位试验[J].山东科

技大学学报(自然科学版),2015,34(6):90-95.

Liu Zhiping, Yu Qianrong. Experiments on 3D indoor localization of smart phones[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(6): 90-95.

[2] Shoaib M, Bosch S, Incel O D, et al. A survey of online activity recognition using mobile phones[J]. Sensors, 2015, 15(1): 2059.

[3] 陈龙彪,李石坚,潘纲.智能手机:普适感知与应用[J].计算机学报,2015,38(2):423-438.

Chen Longbiao, Li Shijian, Pan Gang. Smartphone: Pervasive sensing and applications[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(2): 423-438.

[4] 郑旭峰,肖沙里,谭霞,等.压电传感技术在桥梁振动检测中的研究与应用[J].压电与声光,2003,25(1):72-74.

Zheng Xufeng, Xiao Shali, Tan Xia, et al. Research and application of piezoelectric bridge vibration detection[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25(1): 72-74.

[5] 乔燕,孙传智,缪长青.基于GPS的大跨悬索桥动态特性监测及分析[J].测绘通报,2012(3):1-4.

Qiao Yan, Sun Chuazhi, Miao Changqing. Monitoring dynamic characteristics of long-span suspension bridge based on GPS technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(3): 1-4.

[6] 李洪升,陶恒亮,郭杏林.基于频率变化平方比的压力管道损伤定位方法[J].大连理工大学学报,2002,42(4):400-403.

Li Hong, Tao Hengliang, Guo Xinglin. Damage locating method in stress ducting by frequency change square ratio[J]. Journal of Dalian

- University Of Technology, 2002, 42(4): 400-403.
- [7] 朱文龙, 周建中, 肖剑, 等. 独立分量分析-经验模态分解特性提取在水电机组振动信号中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(29): 95-101.
- Zhu Wenlong, Zhou Jianzhong, Xiao Jian, et al. An ICA-EMD feature extraction method and its application to vibration signals of hydroelectric generating units[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 95-101.
- [8] 袁扬, 刘维宁, 王文斌. 地铁交通引起环境振动传递特性试验研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(4): 100-104.
- Yuan Yang, Liu Weining, Wang Wenbin. Experiments on environmental vibration propagation characteristics induced by metro traffic[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4): 100-104.
- [9] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1908-1915.
- Li Shunming, Guo Haidong, Li Dianrong. Review of vibration signal processing methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1908-1915.
- [10] 王济. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
- Wang Ji. Application of MATLAB in vibration signal processing[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2006.
- [11] 李神送, 温嘉铭, 刘学锋. Android手机上传感器信息的实时获取与可视化[J]. 电子测量技术, 2015(6): 104-107.
- Li Shensong, Wen Jiaming, Liu Xuefeng. Real-time access and visualization of sensor information on Android phone[J]. Electronic Measurement Technology, 2015(6): 104-107.
- [12] Scargle J D. Studies in astronomical time series analysis. II. statistical aspect of spectral analysis of unevenly spaced data[J]. Astrophysical Journal, 1983, 263(2): 835-853.
- [13] 徐斌, 杨涛, 谭保华, 等. 基于Lomb-Scargle算法的周期信号探测的模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(6): 702-705.
- Xu Bin, Yang Tao, Tan Baohua, et al. The simulate study of signal detection based on Lomb-Scargle algorithm[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(6): 702-705.
- [14] 陈为真, 汪秉文, 胡晓娅. 基于时域积分的加速度信号处理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 1-4.
- Chen Weizhen, Wang Bingwen, Hu Xiaoya. Acceleration signal processing by numerical integration[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(1): 1-4.
- [15] 方新磊, 郝伟, 陈宏. 基于频域滤波的加速度信号处理[J]. 仪表技术与传感器, 2012(4): 94-96.
- Fang Xinlei, Hao Wei, Chen Hong. Acceleration signal processing based on frequency domain filtering[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(4): 94-96.

## Experiments on bridge vibration detection using Android smartphone sensors

LIU Zhiping, ZHU Dantong, YANG Lei, YANG Dingliang

School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract** In view of the fixed sampling rate setting, the problems of under sampling and over sampling in the default sampling mode of Android smartphone sensors are discussed in this paper, and a smartphone sensor signal acquisition software with a custom sampling rate and sampling precision is developed, which can synchronously record the data of the sampling epoch, the time interval and the sensor values. Then, both two power spectrum analysis methods and two displacement signal reconstruction methods of analog acceleration signals are compared and analyzed, and the results show that the L-S method and the frequency-domain integral method can effectively process the non-uniform sampling signal of smartphone sensors with noise. At the end, the acceleration signals of Xuzhou Han Bridge are collected from both smartphones (NX 5 and Mi 3) and a high precision inertial integrated navigation system (SPAN-IGM-A1) used for comparison experiments, and the bridge vibration detection and analysis results verify that the portable and low-cost Android smartphone can be used to conduct the bridge vibration detection.

**Keywords** Android smartphone sensors; vibration detection; non-uniform time series; power spectrum analysis; frequency-domain integral  
(责任编辑 刘志远)