

基于无线传感器网络的地震信号特征提取方法研究*

祁浩^{1)†} 王福豹¹⁾ 邓宏²⁾

1) (西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

2) (西安元智系统技术有限责任公司, 西安 710077)

(2012年10月20日收到; 2012年12月10日收到修改稿)

为解决野外古墓葬安防网络中高采样率会缩短无线传感器网络寿命的问题, 提出了使用功率谱二次处理对地震信号进行特征提取的方法. 并通过三类地面活动数据采集进行对比识别实验, 分析了低采样率条件下地震信号特征提取方法的性能. 结果表明, 使用功率谱二次分析的特征提取方法能够降低网络通信能耗, 延长网络寿命, 提高系统目标识别的准确性. 该方法已应用于秦始皇兵马俑野外文物安防系统, 经实践检验, 收到了良好的效果.

关键词: 地震信号, 特征提取, 功率谱二次处理, 无线传感器网络

PACS: 43.60.Hj, 05.60.-k, 43.60.D

DOI: 10.7498/aps.62.104301

1 引言

野外古墓葬安防一直是文物保护工作中的薄弱环节之一. 尽管近年来我国的经济实力和科技水平有了飞速的发展, 但文物保护的科技手段仍然相对落后, 特别是野外古墓葬安防工作. 据统计, 半数以上的古墓葬处于偏远地区, 人迹罕至, 安防工作任务重, 难度大. 从文物犯罪的案件率来看, 田野古墓葬仍然是文物犯罪侵害的首要对象, 盗掘古遗址、古墓葬仍然是威胁文物安全的首要因素.

地下墓葬属于我国古墓葬独有的埋葬特点, 其他历史古国如古埃及等均采用地上墓葬方式(典型的墓葬如金字塔). 因此国外并无研发专门针对野外古墓葬安防的系统和设备. 目前国内的野外古墓葬安防系统的监测对象以地面震动信号(简称地震信号)为主: 在野外环境下, 无论是人员活动、挖掘盗洞或是机动车行驶必定会在附近区域引起幅度大小不一的地震波. 从物理学角度来看, 地面目标激励下产生的地震波信号主要与地质条件、目标的运动状态以及目标间的距离相关^[1]. 震源处的震动会引起地面在其平衡位置附近产生微弱的

运动并以波的形式向四周传播. 在地面附近进行竖向激震时, 会产生 P 波、S 波和瑞利波^[2]. P 波与 S 波均为体波, 其传播速度较快, 瑞利波为表面波, 传播速度较慢, 是 P 波与折射的 S 波的不均匀平面的干涉的结果^[3]. 而在稍远离震源处时, P 波和 S 波的幅值和强度与瑞利波相比几乎可以忽略不计, 因此传感器采集到的地震信号以瑞利波为主. 通过监测地震波并对其进行实时分析和处理, 判断地面活动目标的类型和数量等信息, 能够对地面目标的活动方式进行估计和判断, 进而判断其是否对文物产生危害.

通常意义上, 地震信号是典型的非平稳信号, 常规的特征提取方法有过零检测法^[3]、经验模态分解法^[4]、频谱分析法^[5]等. 引起地面震动的物体活动具有很强的周期性: 人类活动时, 双脚轮流蹬踏地面引起地面震动, 可以看作是一组脉冲信号, 信号周期随行进速度的快慢而发生变化, 人类朝向传感器运动时, 幅值会增大, 反之则会减小; 机动车行驶时产生的地震波是连续式地震波, 主要取决于车辆悬挂系统自振、发动机及传动系统振动以及在车辆行驶对起伏地面的激励等^[6]. 在此类情况下, 地震信号中存在着一一定的准周期性信号分量,

* 国家科技支撑计划(批准号: 2010BAK67B09, 2012BAK14B01)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: qihao.nwpu@gmail.com

地震信号与声波信号具有类似的特征,可以借鉴声波信号分析的特征提取算法.目前针对声波信号提出的具有代表性的算法有双谱分析^[7]、流行学习法^[8]、光谱监测法^[9]、功率谱二次分析法^[10]等.

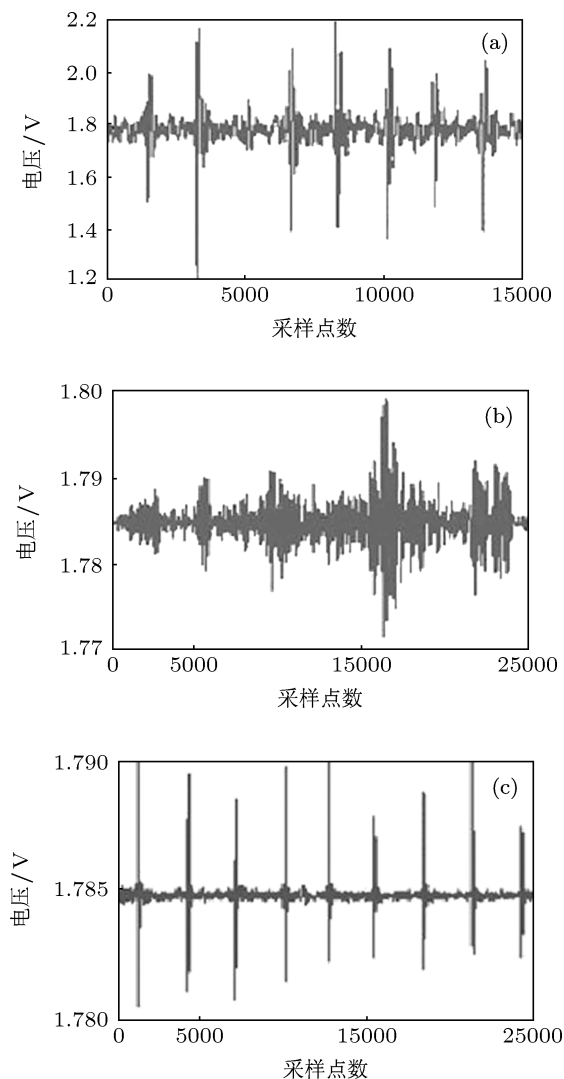


图1 高频率采样的地震信号 (a) 走动信号; (b) 车辆行驶信号; (c) 挖掘信号

使用无线传感器作为监测设备的野外古墓葬安防系统的优点是设备不易损坏、无需市电、系统可扩展性强、可大规模部署、部署速度快、后期维护工作量小等.而缺点是硬件设备通常采用蓄电池或锂电池工作,其计算处理能力、通信能力和储存能力不高.研究无线传感器网络条件下的野外古墓葬安防系统,不仅能够降低文物保护成本、提高我国文物保护技术水平,同时可以防止文物遭到破坏和盗窃,具有很好的社会意义和技术价值.但语音信号的采样率较地震信号采样率高,若将未修改的语音特征提取算法应用于无线传感器网络,会

使传感器节点因为频繁发送数据而缩短网络寿命.而降低采样率会使得运动物体的信号特征通常隐藏于信号中难以提取.因此,如何在降低采样频率的条件下实现对地震信号的特征提取,提高地面活动目标识别的概率,是本文需要解决的问题.

高频率采样的地震波形信号如图1所示^[4],低频率采样的地震波形信号如图2所示.

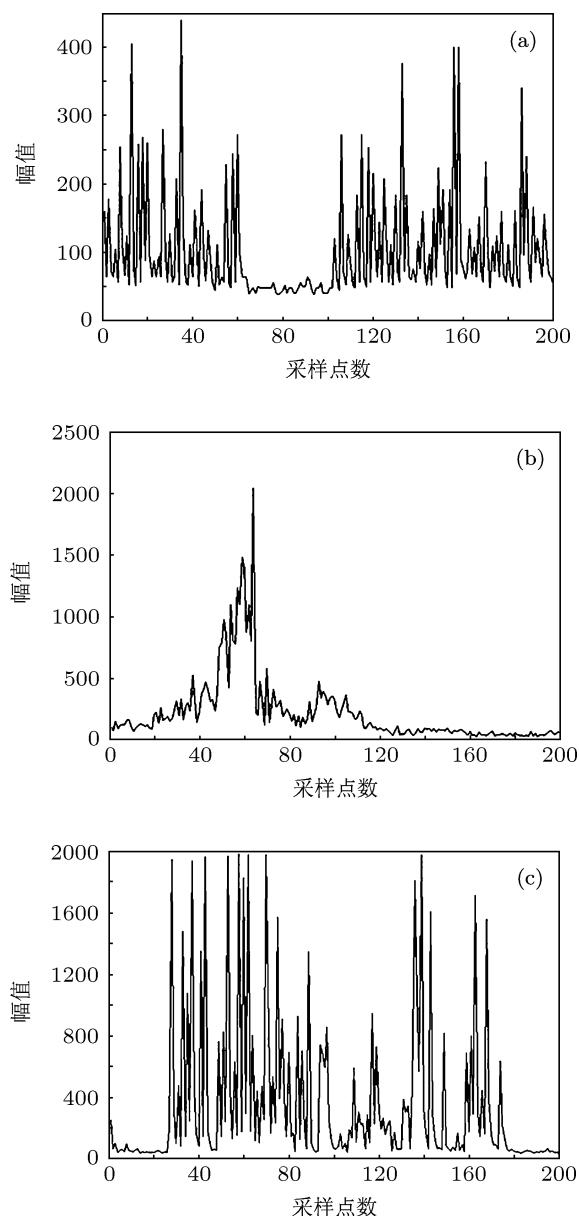


图2 低频率采样的地震信号 (a) 走路信号; (b) 车辆行驶信号; (c) 挖掘信号

由图1和图2的对比可以看出,降低采样频率后,人类活动和挖掘信号峰值出现的间隔变小,即频率变大;机动车辆信号变化较大的原因是其固有频率高于采样频率,信号仅能够以类似信号包络的方式将高频率采样信号体现出来,其峰值出现的频

率变小. 因此, 传统的过零检测法和频谱分析法不适用于低速率条件下的地震信号分析.

功率谱二次处理的语音信号特征提取方法具有复杂度低、准确度好、计算数据量小等特点, 具体方法介绍如下.

2 语音信号的功率谱二次分析方法^[11]

语音信号分析的主要目的在于检测信号中是否有浊音(即嗓音)成分存在. 假设信号 $u(n)$ 表示语音信号, 其自相关函数为 $R_u(k)$, 其信号功率谱分别为 $S_u(f)$. 由于浊音是具有特定的频率的信号, 因此可以假设其相关函数是一个近似周期性函数, 即

$$R_u(k + T_u) = R_u(k). \quad (1)$$

由于语音信号是不可确知的, 可以使用维纳滤波器来估计. 该滤波器使用如下的传递函数对信号进行估计:

$$H_u(f) = \frac{S_u(f)}{S_u(f) + N_0/2}, \quad (2)$$

其中 $S_u = C_u(f, T) \cdot G_u(f)$ 是信号功率谱密度 $S_u(f)$ 的加权梳状滤波器形式, 其意义是自相关函数的傅里叶变换. $G(f)$ 是权重, $C(f, T)$ 则是信号经梳状滤波器滤波后的输出结果, 梳状滤波器的时域形式为

$$v(M, m) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} z(n - mT), \quad (3)$$

式中 $z(n)$ 是输入梳状滤波器的波形, m 是信号在时域上呈现的周期性的周期数目, T 为浊音的固有频率. 其浊音的功率谱二次处理结果为

$$\hat{S}_u(e) = \left| \left\{ \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} R_u(e - mT) \right\} \right|^2. \quad (4)$$

3 改进后功率谱二次处理的地震信号特征提取算法

由(4)式可以发现, 由于人类活动、机动车行驶和挖掘活动的峰值周期各不相同, 可以通过信号的功率谱二次分析的结果对其进行分类. 同时, 由于挖掘活动位置相对固定, 产生地震波的幅值波动较小, 而人类活动和机动车行驶的地震波形具有弱-强-弱的特点, 在对地震信号进行特征提取时应当同时考虑到频率和功率谱两种特征. 而语音的功率谱二次分析方法仅能对功率谱进行分析, 无法

兼顾到频率特性. 而常用的小波分析方法^[12-17] 则由于算法复杂度高、硬件实现难度高等原因会增加设备功耗, 缩短系统工作时间. 基于上述原因提出了针对地震信号的功率谱二次分析算法, 该算法是在对功率谱二次处理基音检测算法改进而来: 对采样得到的含有噪声的地震信号 $y(n)$ 加窗后进行离散傅里叶变换, 得到

$$Y'(k) = \sum_{n=1}^N y(n) \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}(n-1)(k-1)}, \quad (5)$$

对其再进行一次傅里叶变换后得到(6)式

$$\begin{aligned} Y''(k) &= \sum_{n=1}^N Y'(k) \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \\ &= \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^N y(j) \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}(m-1)(n-1)} \right) \\ &\quad \times e^{-i \cdot \frac{2\pi}{N}(n-1)(k-1)} \\ &= k \cdot \sum_{n=1}^N y^2(n) \cdot \sum_{m=1}^N \cos \left(\frac{2\pi}{N}(m+k-2)(m-1) \right), \quad (6) \end{aligned}$$

其中 N 为观察窗口长度, $\sum_{n=1}^N y^2(n)$ 为信号的自相关函数, 即原始信号的功率谱. 由(6)式可以看出, 原始的时域信号经过两次傅里叶变换仍然为时域信号, 但是其信号中已经带入了信号的功率谱和频率的量纲. 新的信号为一组功率谱信号串, 并且其幅值与信号的频率相关.

对 $Y''(k)$ 进行低通滤波除去高频部分信息, 再对结果的功率谱密度进行分析得到信号的功率谱二次处理信号 $S''(e^{j\omega})$:

$$\begin{aligned} S''(e^{j\omega}) &= \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-j\omega n} \right|^2 \\ &= \frac{1}{2\pi N} \left| \sum_{n=1}^N Y''(n) \cdot L(n) \cdot e^{-j\omega n} \right|^2, \quad (7) \end{aligned}$$

(7)式中 $L(n)$ 为低通滤波器传递函数.

图3和图4分别为典型的人员活动信号及其一次功率谱处理结果.

从图4中可以看出, 受外界噪声和采样率影响, 一次功率谱处理后的信号中并没有明显的峰值, 说明采集到的震动信号的能量分布较为均衡, 无法从一次功率谱信号中判断目标类型. 图5中, 地震信号进行二次谱处理后, 最终输出的二次谱中含有直流分量, 这是由于其中的二次功率谱中包含

$\sum_{n=1}^N y^2(n)$ 的原因. 该分量在频率较低的能量值较高, 但随着二次归一化频率的逐渐增加, 其能量值逐渐降低, 说明其能量值主要集中在低频及直流部分. 同时, 二次谱的低频部分本身还有很明显的周期性, 即除零点外, 信号的幅值会在间隔若干个点后出现

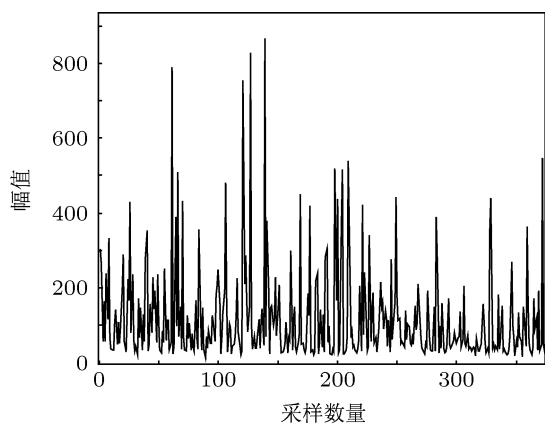


图3 人类活动地震信号

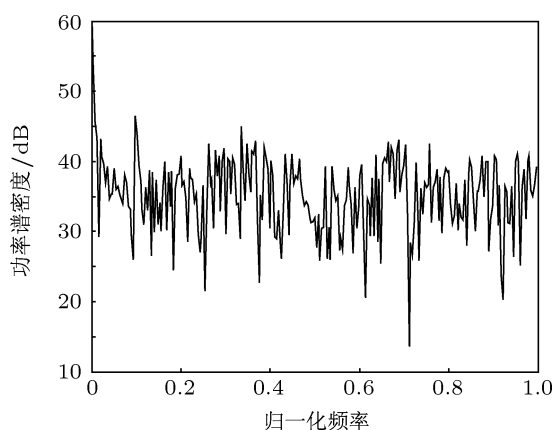


图4 功率谱一次分析结果

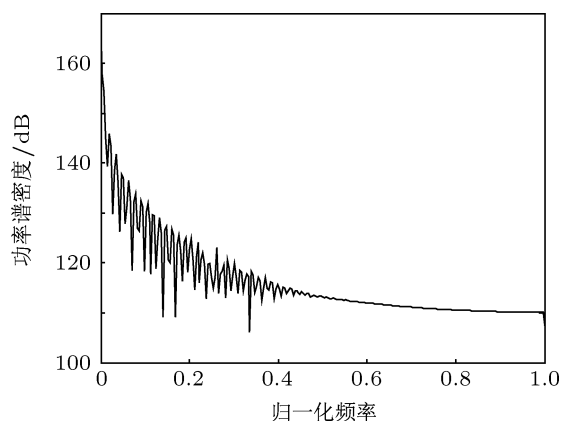


图5 功率谱二次分析结果

一个局部反向峰值, 这是因为信号中包含频率分量, 即 $\sum_{m=1}^N \cos\left(\frac{2\pi}{N}(m+k-2)(m-1)\right)$ 的原因. 而高斯白噪声在二次处理后则不会有这些明显的特征.

综上所述, 基于功率谱二次处理的地震信号特征提取方法步骤如下:

1) 设采样频率为 S , 长度为 N 的观察窗, 当实时监测值大于某一阈值时, 可以认为是有目标在监测区域内活动, 开始记录地震信号, 直至采样数据满足观察窗长度为止;

2) 对归一化后的原始信号做初次傅里叶变换, 并将其作为输入进行第二次傅里叶变换, 得到 $Y''(k)$;

3) 取 $Y''(k)$ 的模值, 即求得地震信号的二次谱 $S''(f)$;

4) 通过计算得到二次谱的直流分量, 并计算信号震荡的频率;

5) 计算归一化频率下的二次谱密度的包络信号;

6) 根据直流分量的大小、二次谱密度的包络信号趋势以及震荡的频率对地面活动目标进行模式分类.

需要说明的是, 步骤 2) 中对信号进行归一化处理是为了预防信号中出现奇异样本数据, 即相对于其他采集样本特别大或特别小的样本数据.

4 实验及分析

4.1 实验过程

实验场地选择在秦始皇兵马俑博物馆内一处野外环境. 所有传感器节点沿公路一侧直线部署, 距离公路 1 m 左右. 可能产生地震波的活动物体包括人员行走、机动车和挖掘活动. 传感器节点将采集到的数据通过无线网络送至网关, 并通过网关将数据传送至后台服务器, 通过模式分类对地面活动目标进行监测和分类, 必要的时候采取预警等措施通知工作人员. 具体实验参数如表 1 所示.

4.2 采样频率 S 的选择

由 (6) 和 (7) 式可见, 信号处理结果只受观察窗长度 N 的直接影响. 由于基于功率谱二次处理算法的应用前提是信号中具有准周期成分, 随着采样速率不断降低, 采样信号中的准周期成分也会不断减

少. 采样信号几乎不存在准周期成分时, 算法将失去应用的前提条件, 其特征提取结果和识别方法也失去理论意义, 因此不能忽视 S 对实验结果的影响. 以机动车为例, 不同采样频率下的地震信号波形如图 6 所示. 可以看出, 当采样率低于 5 sps 时, 信号中几乎不存在准周期成分, 因此信号无法进行特征提取. 采样速率过低时, 采样时间变长, 实时性较差. 从实验结果角度考虑, S 为 10 sps 时效果最好, 因此试验选择采样频率 S 为 10 sps.

表 1 实验参数

项目	参数	项目	参数
传感器节点数量	5 个	通信频率	433 MHz
覆盖区域范围	20 m × 20 m	数据包长度	50 Bytes
网络拓扑结构	Star	地质条件	夯土
无线通信速率	< 19200 bps	土壤含水率	18%—29%
土壤温度	20°C—29°C	车辆行驶速度	15—20 km/h
人员行走速度	0.7—1 m/s	传感器监测范围	< 20 m
挖掘频率	2—3 次/s		

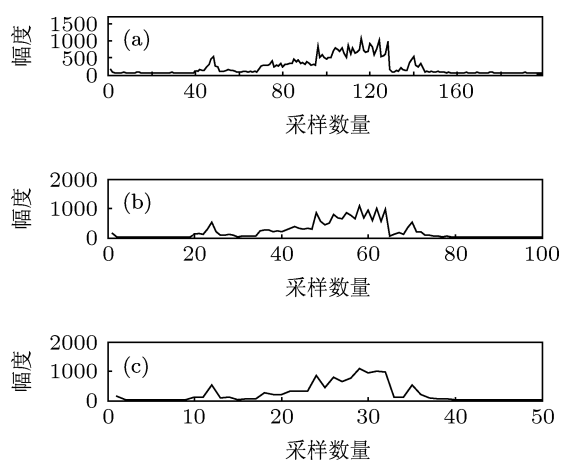


图 6 不同采样频率条件下机动车地震信号 (a) $S = 10$ sps; (b) $S = 5$ sps; (c) $S = 2$ sps

4.3 观察窗口长度 N 的选择

观察窗口的长度决定着信号特征提取和模式分类结果的好坏: 若采样频率低而观察窗口长, 则数据采集时间长, 降低了系统的实时性; 若采样频率高而观察窗口短, 采集数量少, 降低了系统的识别概率. 因此观察窗口的长度需要与采样频率一起综合考虑: 车辆质量大、行驶速度较快, 经过传感器监测范围所需时间约为 5—6 s, 其采样数量约为

25—60 个; 人员活动速度较慢, 经过传感器监测范围所需时间约为 20—40 s, 采样数量约为 100—400 个; 挖掘活动一直在传感器节点的监测范围之内, 因此其采样数量可为任意值. 从信号完整性角度考虑, 观察窗口的长度 $N \geq 100$.

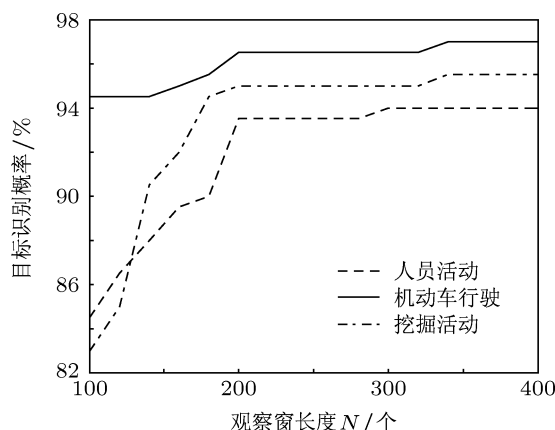


图 7 各观察窗长度的实验结果

由图 7 可以看出, 观察窗口长度 $100 < N < 200$ 时, 机动车行驶的识别概率较高, 而其余两种信号的识别概率较低. 这是由于观察窗口内机动车信号完整性好, 信号特征明显, 而人员活动和挖掘活动信号完整性差, 信号特征不够明显. $N > 200$ 时三种信号的识别概率提高幅度不大, 而采样时间变长导致系统实时性不好. 综上所述, 实验选择观察窗口长度 $N = 200$.

4.4 数据采集结果分析

采样频率 $S = 10$ sps, $N = 200$ 时, 三类活动引起的地震波形及信号功率谱二次分析图形如图 8 所示. 从图 8 和图 9 能够看出, 人类活动与挖掘盗洞引起的地震信号特征相似, 都呈现出较为规律的波动, 这主要是由于人类活动时脚步蹬踏地面引起的地面震动与挖掘盗洞时敲击洛阳铲引起的脉冲式地面震动的频率相近. 所不同的是, 挖掘盗洞时由于引起震动的位置相对固定, 其信号幅值波动较小. 机动车辆引起的地震信号则有明显不同, 如图 10 所示, 由于机动车辆行驶速度较快, 单次活动时传感器监测到的有效数据较人类活动及挖掘盗洞少, 如前所述, 其震动信号多为连续式地面震动.

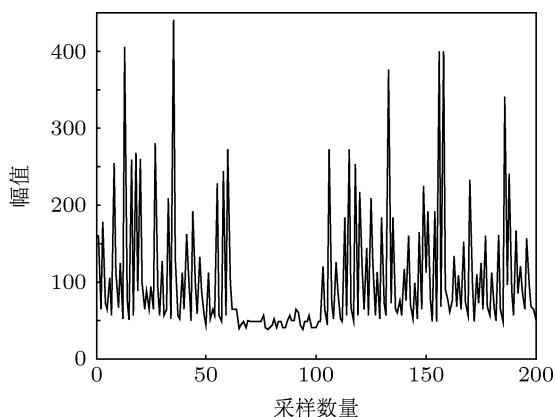


图8 $S = 10$ sps 时人类活动(走路)地震信号

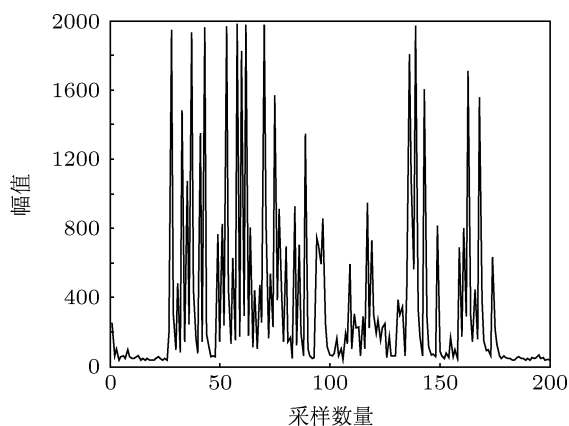


图9 $S = 10$ sps 时挖掘盗洞地震信号

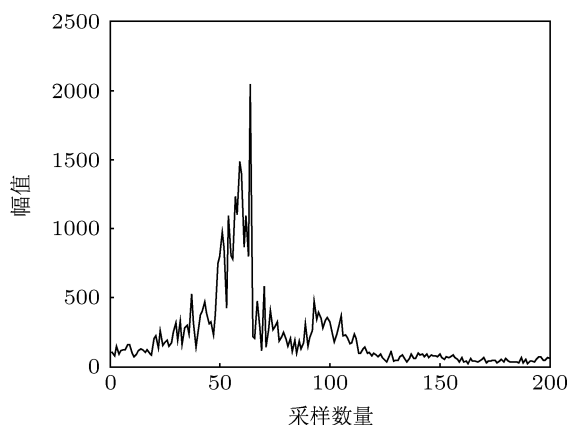


图10 $S = 10$ sps 时机动车地震信号

图 11 为经过二次功率谱处理后的三类信号, 可以看出三类信号的二次功率谱密度相差不大, 信号波形上具有相同点也有不同点: 如第 3 部分所述, 功率谱二次处理后的信号会在相对固定的间隔后出现一个反向峰值. 人员活动和机动车行驶原始信

号的波动较大, 经过功率谱二次处理后的反向尖峰较为明显. 而挖掘活动地震信号幅值的波动较小, 经过功率谱二次处理后的反向峰值大小和周期性相对其他两类信号而言不够明显. 而人员活动和挖掘信号的局部反向峰值出现的频率比车辆行驶信号低, 说明车辆行驶信号中原始震动频率较高, 人员和挖掘活动的原始震动信号低, 这也与常规知识相符. 具体信号特征见表 2.

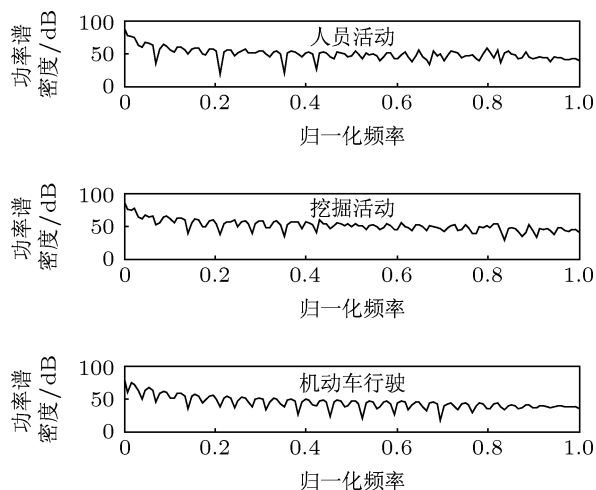


图 11 二次功率谱处理后信号

表 2 三类信号特征

目标类别	人员活动	挖掘活动	机动车辆
峰值大小	明显	不明显	明显
峰值频率	小	小	大
峰值周期性	明显	不明显	明显

4.5 模式分类结果

为提高目标识别的精确性, 课题采用经典 BP 神经网络对目标进行识别, 每一类活动均采集 300 组数据, 每组数据的采样数据长度为 150, 其中 100 组数据训练神经网络, 剩余 200 组数据作为样本来验证特征提取算法性能. 实验数据及识别率统计如表 3 所示. 与采用文献 [4] 算法的实验结果相比较, 结果表明了该地震波特征提取算法能够明显提高地面活动目标的能力.

表 3 相关算法性能比较

目标种类	实验次数	文献 [4] 识别概率/%	本算法识别概率/%
人类活动	200	92.0	93.5
机动车	200	95.0	96.5
挖掘盗洞	200	94.5	95.0

表4 网络性能结果

	文献 [4]	本算法
采样频率	200 sps	10 sps
数据包长度	1000 Bytes	50 Bytes
所需通信速率	8000 bps	400 bps
数据量/24 h	691.2 Mbit	34.56 Mbit
通信能耗/24 h	20736 J	1306.9 J
工作时长/h	50.7 h	673.3 h
系统响应时间/s	1 s	20 s

4.6 网络性能结果

网络的性能结果如表4所示. 对比算法使用每秒钟采样200次的传感器节点作为数据源, 本算法使用每秒钟采样10次的传感器节点作为数据源. 两个传感器均采用4400 mAh, 3.6 VDC的锂电池供电. 发送能耗按30 μ J/bit计算^[18]. 可以看到, 低采样率的传感器节点的通信能耗仅是高采样率能耗的1/20. 而考虑到计算能耗、接收能耗和待机电耗

等因素, 节点的实际寿命延长至13倍左右.

5 结论

本文提出了基于信号功率谱二次处理的地震信号特征提取算法. 将经典的语音特征处理算法根据地震信号的特点进行有针对性的改进, 通过对信号的功率谱进行二次处理, 实现了对信号功率谱及频率的同时检测. 结果表明, 本算法在降低了信号采样率的前提下延长了网络工作时间、提高了地面活动目标识别的准确性. 同时, 该算法易于实现, 计算速度较快. 本算法已经应用于秦始皇兵马俑博物馆的田野文物安防系统中, 经实践检验收到了良好的效果. 今后的工作将是如何提高算法的实时性, 缩短数据采集时间, 提高安防系统的响应速度.

感谢重庆邮电大学张天琪教授的讨论和秦始皇兵马俑博物馆赵昆老师、王亮老师对课题的支持.

- [1] Lan J H, Li H, Zhou Z Y 2001 *Journal of Vibration and Shock* **20** 42 (in Chinese) [蓝金辉, 李虹, 周兆英 2001 震动与冲击 **20** 42]
- [2] Lin W, Chen X, Ye F Y 2003 *South China Journal of Seismology* **23** 74 (in Chinese) [林伟, 陈杏, 叶繁英 2003 华南地震 **23** 74]
- [3] He Q D 1988 *The Theory of Elastic Wave* (Beijing: Geological Publishing House) p75 (in Chinese) [何樵登 1988 地震波理论 (北京: 地质出版社) 第75页]
- [4] Shi Y B, Liu J, Wang L 2007 *Chinese Journal of Sensors and Actuators* **20** 874 (in Chinese) [石云波, 刘俊, 王玲 2007 传感技术学报 **20** 874]
- [5] Sun J D, Jin S J, Sun J 2009 *Acta Petrolei Sin.* **30** 465 (in Chinese) [孙洁娣, 靳世久, 孙健 2009 石油学报 **30** 465]
- [6] Nie W R, Zhu J N, Hou Y 2000 *Journal of Detection & Control* **22** 19 (in Chinese) [聂伟荣, 朱继南, 侯尧 2000 探测与控制学报 **22** 19]
- [7] Zhang Z M, Li G T, Li K J 2001 *Fire Control & Command Control* **26** 48 (in Chinese) [张中民, 李贵涛, 李科杰 2001 火力与指挥控制 **26** 48]
- [8] Zhu J N, Hou Y, Nie W R 2000 *Journal of Ballistics* **12** 26 (in Chinese) [朱继南, 侯尧, 聂伟荣 2000 弹道学报 **12** 26]
- [9] Liu H, Yang J A, Wang Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074302 (in Chinese) [刘辉, 杨俊安, 王一 2011 物理学报 **60** 074302]
- [10] Qiao X G, Ding F, Jia Z A, Fu H W, Ying X D, Zhou R, Song J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074221 (in Chinese) [乔学光, 丁峰, 贾振安, 傅海威, 营旭东, 周锐, 宋娟 2011 物理学报 **60** 074221]
- [11] Zhang T Q, Zhang Z, Lin X L, Quan J G 2006 *Computer Engineering* **32** 1 (in Chinese) [张天琪, 张站, 林孝廉, 权进国 2006 计算机工程 **32** 1]
- [12] Yin T N, Huai X L 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1004
- [13] Deng K, Zhang L, Luo M K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030506
- [14] Gao G R, Liu Y P, Pan Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 139701 (in Chinese) [高国荣, 刘艳萍, 潘琼 2012 物理学报 **61** 139701]
- [15] He Y G, Zhao W S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 843 (in Chinese) [何怡刚, 赵文山 2009 物理学报 **58** 843]
- [16] Deng Y, Shi W K, Liu Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 759 (in Chinese) [邓勇, 施文康, 刘琪 2002 物理学报 **51** 759]
- [17] Wu X L, Chen M S, Sha W 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1000
- [18] Zhao H G, Shi H S, Tang H Y 2009 *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* Xi'an, May 25-27, 2009 p3940

A novel approach to research on feature extraction of seismic wave signal based on wireless sensor networks*

Qi Hao^{1)†} Wang Fu-Bao¹⁾ Deng Hong²⁾

1) (*School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*Microwise System Company Limited, Xi'an 710077, China*)

(Received 20 October 2012; revised manuscript received 10 December 2012)

Abstract

In order to solve the problems of high sampling rate which could shorten the lifetime of wireless sensor networks in wild relics security system, the power spectrum reprocessing is applied to the feature extraction of seismic wave signal. This method is used to solve the target recognition problem, and three data sets are used to verify its effectiveness. The result shows that the power spectrum reprocessing can reduce the communication consumption and prolong the lifetime of networks. This method can also increase the accuracy of target classification. This method, indicating its good performance, had been applied to wild relics security system of Museum of the Terra-cotta Warriors and Horses of Qin Shihuang.

Keywords: seismic wave signal, feature extraction, power spectrum reprocessing, wireless sensor networks

PACS: 43.60.Hj, 05.60.-k, 43.60.D

DOI: 10.7498/aps.62.104301

* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2010BAK67B09, 2012BAK14B01).

† Corresponding author. E-mail: qihao.nwpu@gmail.com