

地震废墟中人体心脏电场信号的提取

鲁霞, 王绪本, 高嵩

(成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:基于人体心脏电场信号的生命探测仪是目前最先进的生命探测仪,其困难之处在于从地震废墟中提取微弱的心脏电场信号。本文主要分析地震废墟中可能出现的对人体电场有干扰的信号情况,提出如何接收废墟中微弱的超低频心脏电场信号,并根据人体心脏电场的特征设计特殊滤波器滤除干扰信号,只保留因人体心脏跳动而产生的 360 度扩展的超低频非均匀电场。

关键词:地震废墟; 心脏电场; 信号提取; 离散小波变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)01-0025-05

Extraction of Human Cardiac Electric Signal from the Earthquake Ruins

LU Xia, WANG Xu-ben, GAO Song

(College of Information and Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The life detector based on the signal of cardiac electric field is now the most advanced life detector, but the difficulty is how to extract the weak signal of cardiac electric field effectively from earthquake ruins. In this paper the signal interference situation in earthquake disaster ruins that maybe affect human electric field is analyzed and the method of receiving weak ultra-low frequency electric filed signals in the ruins is put forward. According to the characteristics of human cardiac electric field, a special filters is designed for filtering off interference signals. Only the expansion 360° ultra-low-frequency non-uniform electric field which produced by beating human heart can be left.

Key words: Earthquake ruin; Cardiac electric field; Signal extraction; Discrete wavelet transform

0 引言

目前所知的生命探测仪有音频式、视频式、音视频结合式、红外热成像式、雷达式、电磁感应式等。低频电磁人体生命探测仪属于非接触式生命探测仪器,无需发送信号,可直接接收电磁场信号,并利用生物医学技术通过人体心跳产生的低频电磁波来探测人体存在与否,具有探测距离远、准确性高、适用性好、便携性强等优点,可广泛用于地质灾害、消防、军事等领域。5·12 汶川大地震后生命探测仪在灾后紧急救援中发挥了巨大作用,使我们更加认识到了研究有效的生命探测仪在抗灾减灾、救助生命中的意义。本文针对人体心脏电场的特征,分析地震废墟中可能存在的各种干扰信号,提出采用小波滤

波技术去噪,提取人体心脏电场信号的方法。

1 地震废墟中的电场情况分析

1.1 地震废墟中的电场组成

地球从空间到地下无不充满着不断变化的电磁场,在频域上可能以单频形式存在,也可能以频段形式存在,还可能以全频带方式存在;在时域上可能是瞬间存在,也可能是按某种强弱变化规律存在一段时间,还可能以恒定或不恒定能量持续存在。

地震之后地震电磁辐射等信号会对人体心脏电场信号产生极大干扰,使得各种通信设备被中断,人体心脏产生的超低频电场也淹没在各种复杂的信号

收稿日期:2009-07-14

基金项目:四川省自然科学基金项目(07ZS006)

作者简介:鲁霞(1984-),女(汉族),四川广安人,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理。

中。其中对生命探测的信号频带造成干扰的信号主要包括四个部分：一是工业化电磁干扰(如高压输电线、广播电视塔,无线基站、雷达、手机、家电等),落在有效频段内的有 50 Hz 干扰;二是地电场干扰,包括因雷电引起的苏曼谐振,其频率在 3~30 Hz 之间,太阳活动的粒子流和电磁辐射产生低于 1 Hz 的电场信号,空气放电等;三是地震电磁辐射的超低频段;四是现场工作人员和其他人员以及废墟中其它动物的心脏电场干扰。

1.2 人体心脏电场的特征

所有生命现象都伴随有生物电。生物电来源于细胞的功能,在不受外界刺激的静息状态下,实验测得活细胞的细胞外部带正电,内部带负电。若取膜外电势为零,则膜内侧存在约为 -90~-70 mV 的静息电势。生理学上称神经、肌肉和腺体等组织为可兴奋组织,当细胞作出主动反应时,细胞膜对离子的通透性发生突变,细胞内部电势突变为正电势,约为 20~30 mV,随后在不到 1 ms 的时间内恢复,这样就产生了有一定规律的电势场。心脏电场就是由心脏跳动膜内外电位变化产生。由文献[4]可知,心肌细胞所产生的电场与人体其他部位相比是最强的,因此利用心脏跳动产生电场来检测废墟中人的存在与否是有明显优势的。

基于电场的生命探测仪是感应人体心脏跳动发出的 30 Hz 以下超低频电场信号。众所周知,电场与磁场是分不开的,随时间变化的心脏电场信号与磁场信号相互转化,在地下扩散传播。根据趋肤效应,电磁波穿透深度 P 表示场的振幅衰减为地面值的 $1/e$ 时电磁波所传播的距离,即 $e^{-\frac{2\pi P}{\lambda}} = e^{-1}$, $\sigma = 1/\rho$ 为地下介质的导电率, T 为信号的周期。由公式 $P = \frac{1}{2\pi} \lambda = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10\rho T}$ km 可知,介质的导电性越好,信号频率越高,场衰减越快。实际中常用的穿透深度公式为 $z_{\text{eff}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$ m。根据心脏电场的频率(30 Hz 以下),考虑到灾害现场废墟的复杂情况,介质的电阻率可取 1~100 Ω /m,经过计算穿透深度大致为几十米到几公里,理论上平均穿透深度为 1 km 左右。电场信号能够穿透钢筋混凝土墙、钢板、木板、水等介质传播到地面,振幅值也能达到仪器的探测要求。

2 心脏电场信号接收

灾害发生后,人体被废墟掩埋,身体虚弱,呼吸

和心跳都比正常状态微弱。而且人体心脏产生的超低频非均匀电场信号在传播过程中受到钢筋、混凝土、墙、钢板、木板、水等的阻挡和其他信号的干扰,会不断衰减。所以选择电场传感器的要求非常高,应综合考虑用途和传感器的特性。由于人体心脏产生的电场是低能量的超低频信号具有极强的穿透力,尽管受到介质的阻挡,衰减相对于其他高中频信号缓慢得多,所以用高灵敏度的超低频电场传感器来接收信号是可行的。采用电场传感器可直接接收信号,不需要发送额外的信号源,是生命探测仪优点之一。

电场传感器的测量原理是任何置于电场中导体,都会在其导体上感应出电压,并导出外场和感应电压的关系^[9]。

两导体为两相互平行的圆板导体天线,与两板相连为一差分放大器,其输入端电容为 C ,电阻为 R ,设两平板间的距离为 d ,空间导电率为 σ ,平板面积为 S (图 1)。 C 上的电荷随时间变化量为

$$\frac{dQ}{dT} = [C/(C + C_0)](\sigma ES - \sigma C_0 Q/\epsilon_0 C - Q/CR) \tag{1}$$

式中第 1 项为外面流向平行板的传导电流;第 2 项为两平板间的传导电流;第 3 项为差分放大器输入电阻 R 上的电流; ϵ_0 为介电常数。平板间的等效电阻为

$$r = V/I = \epsilon_0/C_0\sigma \tag{2}$$

平行板天线电容为 $C_0 = \epsilon_0 S/d$,代入式(2)可得

$$Q/CR = V/R \tag{3}$$

将式(2)、(3)代入式(1)可得

$$dV/dt + [(r + R)/(C + C_0)]V/rR = Ed/[(C + C_0)r] \tag{4}$$

当 $t=0^+$ 时

$$V = [R/(r + R)]Ed + \{[C_0/(C + C_0)] - [R/(r + R)]\}d(E - E_0)\exp(-t/\tau) \tag{5}$$

其中 $\tau = rR(C_0 + C)/(r + R)$ 。

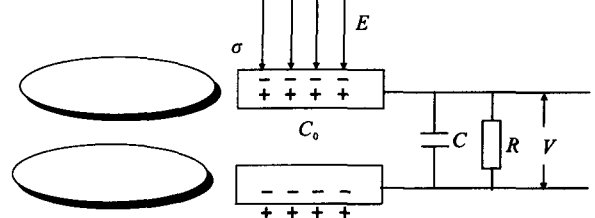


图 1 测量原理

Fig. 1 Measuring principle.

在实际应用中,两平行板的电容远远大于差放的输入电容,电阻远远小于差放的输入电阻, $E \approx V/d$, 电场强度与测试电压成正比。用频率可调的正弦波作测试,逐点改变频率,探测得到幅值随频率变化关系如图 2。从幅频特性曲线可以看出,此方法适用于实现超低频信号测量。若平行导体板天线直径为 30 cm,可实现带宽为 0.05 Hz~2 MHz 范围内的电场测量,本实验小场强测量可到 0.3 V/m。若要改变测量的频率与场强大小,可以调节天线的直径和两平行板间距来实现。人的心脏跳动时会产生 1~2 mV 的电压,改变该传感器参数可以接收到心脏跳动产生的电场信号。

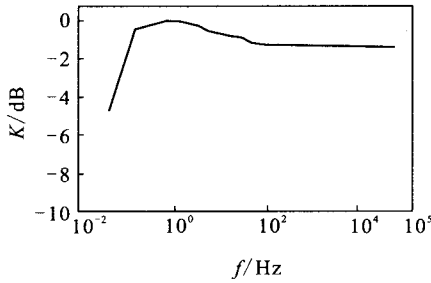


图 2 幅频特性

Fig. 2 Characteristic of amplitude-frequency.

3 心脏电场信号的小波滤波

由于人体在废墟中所处情况非常复杂多变,信号微弱,接收到信号后应先通过适当放大后再进行滤波。滤波器的设计是研究的重点与难点,需要根据可能存在的干扰信号的分析来设计。根据分析,接收信号采用的是超低频传感器,而且我们需要的人体心脏电场的信号也处于超低频段,高中频段的信号在接收时已经受到抑制,所以高频对于低频非均匀人体电场的影响相对较小。低频信号的分析滤波是重点。根据接收的随机信号的特征本文采用比较先进的小波变换技术进行滤波。

小波变换适用于对非平稳瞬时信号进行时间-频率分析,可用于信噪分离及弱信号提取,提高信号的信噪比。小波基函数和尺度函数是小波变换里面重要的两个函数,母小波可以获取信号的时间信息,尺度函数可以获取信号的频率特性。小波基函数

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi((x-b)/a) \quad (6)$$

式中 b 为平移因子; a 为缩放因子。尺度函数为 $\varphi(x)$,不同的尺度函数生成不同的小波,例如:haar 小波, Daubechies 小波, Mexicanhat 小波, Symlets 小波等。小波变换:

$$W_{\frac{1}{2}}^k f(x) = f^* \psi_{\frac{1}{2}}^k(x) = 2^{-k} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi((x-t)/2^k) dt \quad (7)$$

小波对接收滤波原理步骤如下^[9]:

(1) 对含噪声心脏电场信号进行取样。因为连续小波变换的计算量非常惊人。对尺度因子进行取样。对于连续信号 $y=f(t)$,选择适当的 $j=J$,使得 2^J 大于信号的 Nyquist 抽样率。令

$$a_k^j = f(k/2^j), f_j(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k^j \varphi(2^j x - k) \quad (8)$$

式中 2^j 为采样频率; J 取 3~6; y 代表废墟中的带有各种干扰的瞬变信号; $f_j(x)$ 是采样后待处理的时间信号。

(2) 分解心脏电场信号:

$$f_j(x) = w_{j-1} + \dots + w_{j-1} + f_{j-1} + \dots w_0 + f_0 \quad (9)$$

其中

$$w_{j-1} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} b_l^{j-1} \psi(2^{j-1} x - l), f_{j-1} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} a_l^{j-1} \varphi(2^{j-1} x - l) \quad (10)$$

系数 $b_l^{j-1} = DH(a^j)_k$ 为精细系数,对信号进行不同尺度变换,可以看清信号中是否含有人体心脏电场; $a_l^{j-1} = DL(a^j)_k$ 为粗略系数,用于观察所接收信号大致波形变化、频率等,以便确定频率是否是人体心脏电场频率; $\psi(2^{j-1} x - l)$ 为小波基函数; $\varphi(2^{j-1} x - l)$ 为尺度函数; l 为平移尺度; x 为时间。

(3) 心脏电场信号的处理。对信号的滤波关键就在这一步。根据对理想低噪信号的小波分解与实际采集信号进行对比,选取不同的阈值对信号进行滤波,对分解出来的不同频率信号进行分析处理

$$f_j(x) = \sum_{j=0}^{J-1} w_j + f_0 = \sum_{j=0}^{J-1} \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} b_k^j \psi(2^j x - k) \right) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k^0 \varphi(x - k) \quad (11)$$

修改小波系数 b_k^j 可达到信号滤波目的。若滤除高频,则超过某阈值的 b_k^j 应设为 0;滤除低频,则对 a_k^j 系数进行变化,对 50 Hz 的工频干扰进行陷波等。

(4) 心脏电场信号的重构。经过处理之后的信号为人体心脏跳动产生的电场分解信号,对此信号进行重构,用于极化电介质材料,指示人体方位。

$$f_j = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k^j \varphi(2^j x - k), a^j = L \cup a^{j-1} + H \cup b^{j-1} \quad (12)$$

当 $j = 1$ 时, a_k^1 由 a_k^0 和 b_k^0 得到, $j = 2$ 时 a_k^2 由 b_k^1 和 a_k^1 得到, 当 $j = J$ 时, a_k^J 表示经处理后 $x = k/2^J$ 的近似值, 也是处理后的心脏电场信号。

提取出来的信号经过进一步放大用于极化介电材料。根据介电电泳技术介绍, 介电材料的悬浮液中的中性微粒在不均匀电场作用下产生定向运动, 可利用这种定向运动来确定场源即地下人体的位置。对于地面工作人员和其他人的心脏的影响的消除, 可以通过生物介电材料极化方向来区别接收时的角度上不同。而且他们的电场是以空气为介质传播, 与被废墟掩埋人体的传播介质不同, 可以根据衰减规律和电场强度的值不同来区分。

对理论心电信号(图 3)进行加噪, 利用 Matlab 的小波工具箱进行对信号进行分解(图 4)。选择 Symlets 小波 3 级分解, 采用硬阈值去噪, 处理后的信号如图 5。

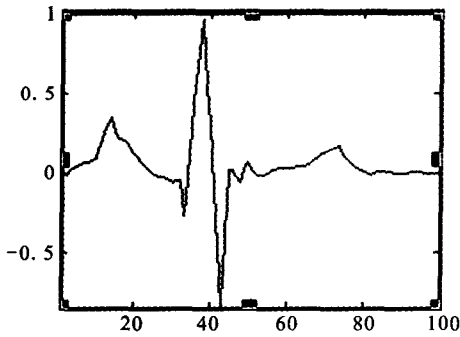


图3 理论心电信号
Fig. 3 The theory ECG.

4 结语

本文通过对人体心脏电场的特征以及灾害现场可能存在的电场干扰信号的分析, 明确了人体心脏电场是低于 30 Hz 的超低频信号, 解决干扰问题重点放在解决雷电、全球化工频、空气放电、地震电磁辐射、现场非掩埋人员(工作人员和灾害受伤者等)心脏电场等频率与心脏电场相差不大的干扰上。采用超低频电场传感器接收超低频信号, 设计出的探测器在低频段幅频特性响应好, 而且可以根据实际测量需要调节频率和场强大小。利用小波滤波对信号进行多尺度分析, 将人体心脏跳动所产生的超低频非均匀电场信号提取出来, 为极化介电质材料指明人体在废墟中所处位置做准备。

【参考文献】

[1] 罗福龙. 地震勘探中的电磁干扰[J]. 石油仪器, 2004, 18(2): 1-5.

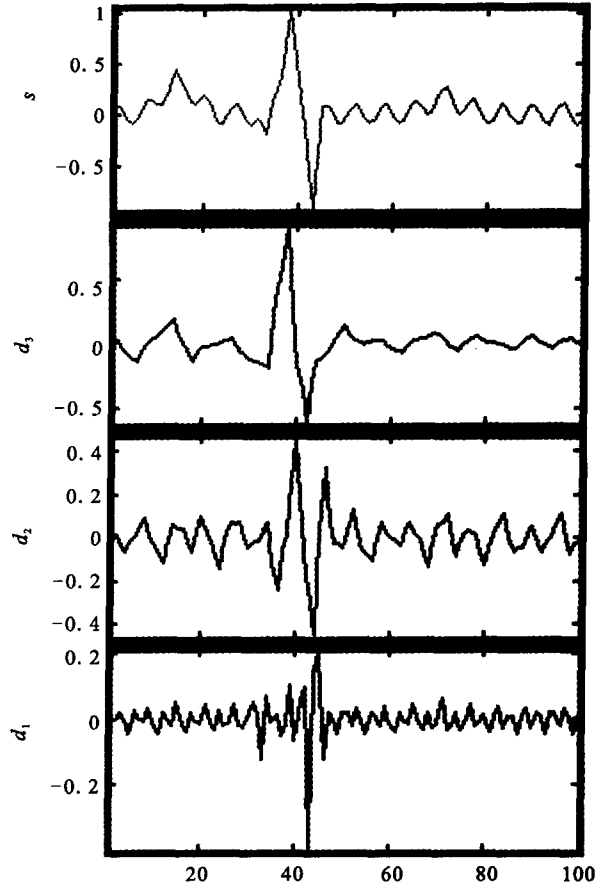


图4 含噪信号及其小波分解

Fig. 4 Noisy signals and wavelet decomposition.

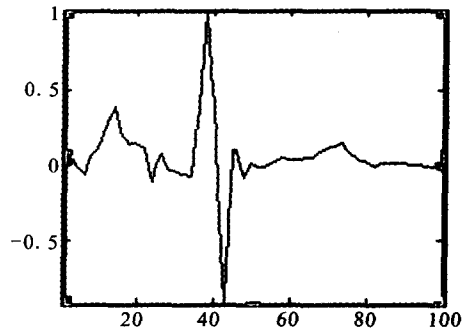


图5 去噪后信号

Fig. 5 The denoised signals.

[2] 张德齐. 地震电磁辐射前兆判据探讨[J]. 地震学刊, 1992, 92(4): 1-7.
 [3] 姜永权, 郑义, 龚世生, 等. 地震电磁辐射数字化观测方法及异常信号分析[J]. 华南地震, 1999, 19(1): 67-71.
 [4] 何为, 刘俐, 杨浩. 一种处理人体骨骼肌肉层各向异性导电性的数值方法[J]. 生物数学学报, 1999, 14(4): 463-469.
 [5] Tysler M, Turzova M, Tinova M, et al. Forward modeling of the cardiac electric field[J]. Engineering in Medicine and Biology Society, 1996, 4: 1433-1434.
 [6] 马乃祥, 周佩白. 电磁场仿真技术[J]. 华东电力, 2000, 28(1):

45-48.

[7] 祝敏, 周晏, 贺亦成, 等. 极低频电场传感器的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(4): 289-291.

[8] 李培军, 金慧然, 等. 基于独立成分分析的超低频电磁探测信号滤波[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, (4): 45-51.

[9] 国胜, 康健, 译. 小波与傅里叶分析基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 166-167.

[10] 赵国良, 杨俊, 孙坤. 心电信号的小波变换降噪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(5): 631-634.

[11] 张勇, 王介生. 基于多分辨率分析的心电图信号去噪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 32-34.



读者来信

尊敬的编辑:

我在阅读贵刊的 2007 年 9 月出版的第 29 卷, 第 3 期中高立新、刘芳、赵蒙生等发表的“用 sPn 震相计算震源深度的初步分析与应用”一文时, 发现该文中的 5 式有误。经过我的反复推导, 物理量与图中、文中一致的情况下, 应为下式:

$$\Delta t = \frac{h_1 \cdot v_3}{v_{S2} \cdot \sqrt{v_3^2 - v_{S2}^2}} + \frac{H_1 \cdot v_3}{v_{S1} \cdot \sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}} + \frac{H_1 \cdot v_3}{v_1 \cdot \sqrt{v_3^2 - v_1^2}} + \frac{h_1 \cdot v_3}{v_2 \cdot \sqrt{v_3^2 - v_2^2}} - \frac{1}{v_3} \left(\frac{h_1 \cdot v_2}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} + \frac{H_1 \cdot v_1}{\sqrt{v_3^2 - v_1^2}} + \frac{h_1 \cdot v_{S2}}{\sqrt{v_3^2 - v_{S2}^2}} + \frac{H_1 \cdot v_{S1}}{\sqrt{v_3^2 - v_{S1}^2}} \right)$$

文中 5 式与上式下划线处不符。

上述意见正确与否? 请作者与编辑指正。或者请发来推导与我的推导过程相互验证。

此致

敬礼

四川省地震局西昌地震中心台
王登伟
2010 年 03 月 10 日

编辑部答复:

经查证, 王登伟先生指正的错误属编辑部校对造成, 与原稿作者无关。在此对王登伟先生认真负责的态度深表感谢!

《西北地震学报》编辑部