

doi:10.13301/j.cnki.ct.2021.06.023

地震波信号频谱分析方法对比研究

陈 毅¹, 晋成名², 赵之举¹

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003)

摘 要: 基于川藏铁路某隧道采集的地震波信号, 结合 MATLAB 信号处理工具, 采用 FFT 分析法、CHIRP-Z 变换分析法和 PSD 分析法分别对地震波信号频谱特征进行分析, 根据分析结果研究这 3 种常用频谱分析方法的特征。研究表明, CHIRP-Z 变换分析法对于地震波信号频谱分析效果最好, 精确度最高; PSD 分析法次之; FFT 分析法效果最差。

关键词: 地震; 频谱分析; FFT; CHIRP-Z 变换; PSD

中图分类号: P631.4; TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-8725(2021)06-086-03

Comparative Study on Spectral Analysis Method of Earthquake Wave Signal

CHEN Yi¹, JIN Cheng-ming², ZHAO Zhi-ju¹

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China; 2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Based on the seismic wave signal collected from a tunnel of Sichuan Tibet railway, combined with MATLAB signal processing tools, FFT analysis method, CHIRP-Z transformation analysis method and PSD analysis method are used to analyze the spectrum characteristics of seismic wave signal, and then according to the analysis results, studied characteristics of these three common spectrum analysis methods. The results show that the CHIRP-Z transform analysis method has the best effect and the highest accuracy for seismic wave signal spectrum analysis; PSD analysis method takes the second place; FFT analysis method has the worst effect.

Key words: earthquake; spectral analysis; FFT; CHIRP-Z transform; PSD

0 引言

为满足当前社会发展需求, 国内外开展了大量工程建设, 建设过程常面临许多工程问题, 及其影响施工进度与安全, 其中, 地震灾害及震动破坏便是不可避免的工程问题之一。因此, 为了更好地解决这一工程问题, 国内外大量学者对地震灾害或震动破坏过程产生的地震波信号进行了大量的分析研究。

地震波信号是一种非平稳非线性信号, 最有效的分析手段是对信号频谱进行时频分析, 将地震波时域信号转化为频域信号, 同时保留时间和频率信息。当前, 随着地震波频谱分析方法的不断改进与发展, 在很多工程领域都得到了很好的应用与验证, 如王梅等利用重力仪与宽频带地震仪地震波信号进行异常判定; 赵明生等利用地震波信号频谱分析方法进行爆破震动识别与应用研究; 范文华等以芦山 7.0 级地震为例比较分析重力仪与地震计记录的地震波信号频谱特征; 胡敏等研究了地震波信号频谱分析技术在储层分析中的应用。鉴于此, 本文利用川藏铁路某隧道采集的地震波信号, 结合 MATLAB 信号处理工具, 采用快速傅里叶变换(FFT)分析法、线性调频 Z 变换(CHIRP-Z)分析法和功率谱密度(PSD)分析法分别对地震波信号频谱进行对比分析研究, 为地震灾害、震动破坏或爆破等涉及地震波信号分析

的工程领域问题提供有效的理论基础与参考依据。

1 信号频谱分析方法简介

1.1 FFT 分析法

快速傅里叶变换(FFT)是离散傅里叶变换(DFT)的一种快速算法, 主要是通过对地震波信号频谱进行分析, 计算出其幅值谱、相位谱和功率谱, 有助于更好了解地震波信号的特性。采用 FFT 分析法分析地震波信号频谱过程如下:

若有一长度为 n 的离散时间信号 $x(n)$ ($0 \leq n \leq N_0-1$), 需进行频谱分析, 则先扩充有限序列 $x(n)$ 长度为 N , 表达式

$$x(n) = \begin{cases} x(n), & 0 \leq n \leq N_0-1 \\ 0, & N_0 < n \leq N-1 \end{cases} \quad (1)$$

再利用式(2)计算频谱, 所求的有限长序列 $x(n)$ 快速傅里叶变换频谱值

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (0 \leq k \leq N-1) \quad (2)$$

其中, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 。

1.2 CHIRP-Z 分析法

CHIRP-Z 分析法是一种沿螺旋线轨迹采样, 利用 FFT 快速实现的变换方法, 它是利用了傅里叶变换和卷积的性质, 计算某个频率段的傅里叶频谱, 其计算方法如下:

已知 N 点有限长序列 $x(n)(0 \leq n \leq N-1)$, 其 Z 变换为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n} \quad (3)$$

沿 z 平面上的一段螺旋线作等分角抽样, 抽样点

$$z_k = A W^{-k} \quad (k=0, 1 \dots M-1) \quad (4)$$

其中, 采样轨迹的起始点 $A = A_0 e^{j\varphi_0}$, 其大小由它的半径 A_0 及相角 θ_0 确定; 螺旋线参数 $W = W_0 e^{j\varphi_0}$

式中 M ——要分析的复频谱点数;
 W_0 ——螺旋线伸展率;
 φ_0 ——采样点间的角度之间的间隔。

则采样点处 CHIRP-Z 变换

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk}, \quad (k=0, 1 \dots M-1) \quad (5)$$

1.3 PSD 分析法

PSD 分析法是一种信号功率谱密度估计方法, 其计算过程是先取信号序列的离散傅里叶变换, 然后取其幅频特性的平方除以序列长度 N , 即所求序列 $x(n)$ 的 PSD 估计值

$$\hat{P}_{xx}(w) = \frac{1}{N} |X(e^{jw})|^2 \quad (6)$$

式中 $X(e^{jw})$ ——序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换。

2 信号波形处理

2.1 数据来源及处理工具

本次分析数据来源于川藏铁路某隧道监测数据, 鉴于篇幅限制, 选取 3 种典型的地震波信号进行处理及对比分析, 并用 CHTO、COCO 和 PALK 分别代表这 3 种不同波形信号。

本文采用 FFT 分析法、CHIRP-Z 变换法和 PSD 分析法对选取地震波信号进行频谱分析, 借助 MATLAB 信号处理工具, 编辑程序语言作为地震波信号频谱分析依据, 进而实现成图分析, 再通过对不同方法频谱分析结果图特征, 研究不同频谱分析方法在地震波信号频谱分析中的效果。

2.2 重采样及归一化

由于观测数据采样间隔 0.5 s, 模拟数据时间步长 0.2 s, 为了能够科学地对比, 必须以观测数据为基准对模拟数据进行重采样处理。具体 MATLAB 程序语句如下:

```
iris_z_deci=round(data_N/s0411s1_N);
[deci_Q,deci_P]=numden(sym(iris_z_deci));
iris_z_Q=double(vpa(deci_Q));
iris_z_P=double(vpa(deci_P));
data_Z=resample(data_Z,iris_z_P,iris_z_Q)。
```

因为模拟数据和观测数据的幅值存在差异, 为突出对比效果, 可分别对模拟数据和观测数据进行归一化处理。具体 MATLAB 程序语句如下:

```
ds_z=s0411s1_fz./max(abs(s0411s1_fz));
diris_z=data_Z./max(abs(data_Z))。
```

2.3 波形图对比

图 1~图 3 是数据 COCO、CHTO 和 PALK 波形图, 图中横坐标代表时间, 纵坐标代表幅值。由图可以看出, COCO 信号前期有 1 个明显的波形, 后期波形不明显, 可能有持续的噪音; CHTO 信号波形峰值变化不大; PALK 信号波形峰值逐渐减小。

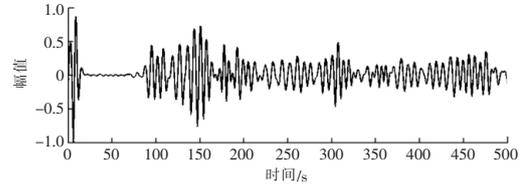


图 1 COCO 波形归一化

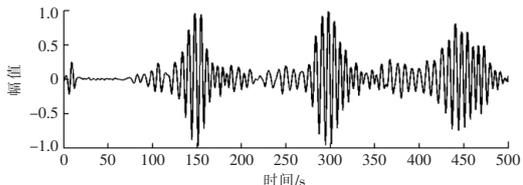


图 2 CHTO 波形归一化

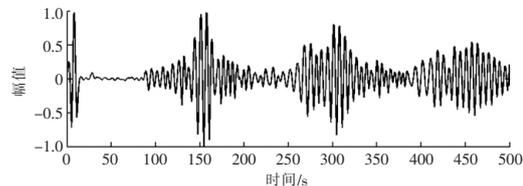


图 3 PALK 波形归一化

3 信号频谱分析

图 4~图 6 为 CHTO 波形分别进行 FFT 分析、CHIRP-Z 变换和 PSD 分析处理后的频谱图, 图中横坐标代表频率, 纵坐标代表频谱幅值归一化, 实线表示观测数据进行分析处理后的频谱分析结果, 虚线表示数据正演结果。

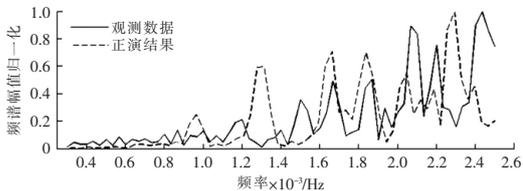


图 4 CHTO 波形 FFT 分析频谱图

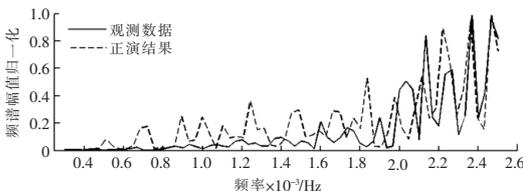


图 5 CHTO 波形 CHIRP-Z 变换频谱图

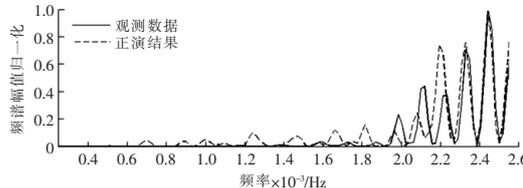


图 6 CHTO 波形 PSD 分析频谱图

图7~图9为COCO波形分别进行FFT分析、CHIRP-Z变换和PSD分析处理后的频谱图,图中横坐标代表频率,纵坐标代表频谱幅值归一化,实线表示观测数据进行分析处理后的频谱分析结果,虚线表示数据正演结果。

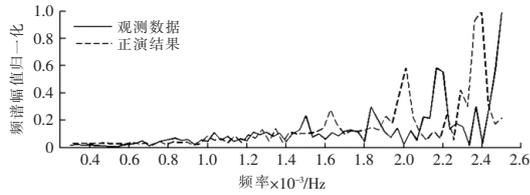


图7 COCO波形FFT分析频谱图

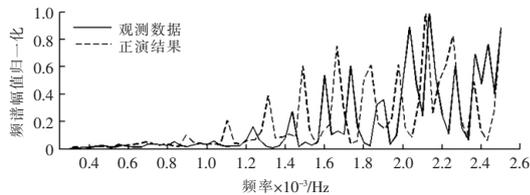


图8 COCO波形CHIRP-Z变换频谱图

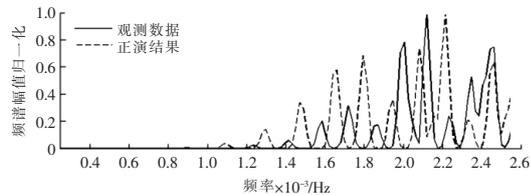


图9 COCO波形PSD分析频谱图

图10~图12为PALK波形分别进行FFT分析、CHIRP-Z变换和PSD分析处理后的频谱图,图中横坐标代表频率,纵坐标代表频谱幅值归一化,实线表示观测数据进行分析处理后的频谱分析结果,虚线表示数据正演结果。

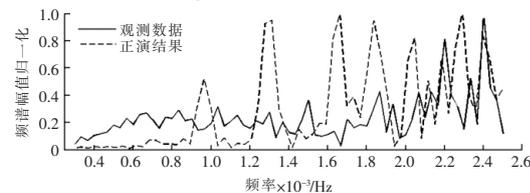


图10 PALK波形FFT分析频谱图

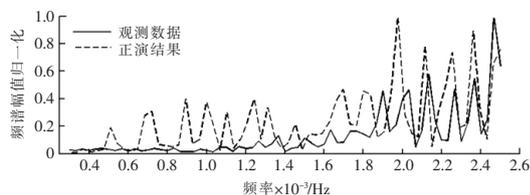


图11 PALK波形CHIRP-Z变换频谱图

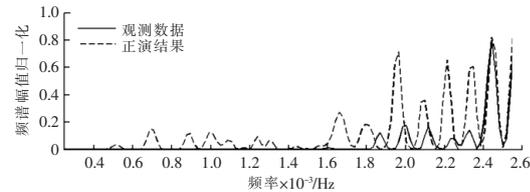


图12 PALK波形PSD分析频谱图

综上,根据以上3种波形频谱分析结果图可以看出,用CHIRP-Z变换分析法对地震波信号频谱进行分析,其观测结果与模拟结果的波峰与波谷基本上可以重合,能明显对应;用PSD分析法对地震波

信号频谱进行分析,其观测结果与模拟结果的波峰与波谷对应排列前期显示不明显,后期能很好地重合;用FFT分析法对地震波信号频谱进行分析,其观测结果与模拟结果的波峰与波谷对应排列杂乱无章,只有少部分能明显重合在一起,其重合率最差。

4 结语

本文通过对地震波信号频谱分析常用方法进行研究,得出结论:CHIRP-Z变换分析方法对于地震波信号的频谱分析效果最好,精确度最高,PSD分析法效果次之,FFT分析法效果最差。另外,若是地震波信号数据量大,需重点研究分析信号后期的频谱时,PSD分析法比CHIRP-Z变换分析法频谱分析效果更好。

本文研究的几种频谱分析方法都是一般情况下适用,若是在特定环境下则应根据实际情况选取更好的分析方法,如CHIRP-Z变换法的优点是易处理频率分辨率;FFT分析法不适用于处理非单位圆上的抽样值的计算;PSD分析法的优点是应用DFT的快速算法来进行估值。同时,本文研究的地震波频谱分析方法为常用的几种信号频谱分析方法,然而实际中还有很多方法可用于地震波信号频谱分析,期待研究者们继续作更深层次的研究。

参考文献:

- [1]魏来,刘马群,李奎. 信号分析方法及其在地震波处理中的应用[J]. 洛阳大学学报,2007(4):69-73.
- [2]李建康,吕高贵,郑立辉. 基于复杂度方法的地震波信号频谱特性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学,2007(4):58-63.
- [3]王梅,季爱东,徐长朋,等. 重力仪与宽频带地震仪地震波信号分析及在异常判定中的应用[J]. 地震学报,2015,37(3):473-481.
- [4]赵明生,朴志友,梁开水,等. 爆破地震波时频域分析方法及应用[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2011,30(4):22-28.
- [5]张帆. 地震波时频谱分析及其在爆破识别中的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2006.
- [6]孙新建,曾亚平,苏振妍. AR模型在爆破震动信号频谱分析中的应用[J]. 爆破,2016,33(1):40-44.
- [7]宗琦,汪海波,徐颖,等. 基于HHT方法的煤矿巷道掘进爆破地震波信号分析[J]. 振动与冲击,2013,32(15):116-120.
- [8]范文华,申重阳,谈洪波,等. 重力仪与地震计记录的地震波信号频谱特征比较——以芦山7.0地震为例[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(4):411-415.
- [9]胡敏. 地震信号时频谱分析技术在储层分析中的应用[J]. 内江科技,2015,36(6):31-32.
- [10]许伟涛. 快速傅立叶变换算法研究与设计[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [11]于状. FFT在谱分析中的简单应用举例[J]. 信息记录材料,2020,21(5):186-188.
- [12]武晓春. 实序列的FFT算法及应用[J]. 自动化与仪器仪表,2010(5):81-82.
- [13]王志洋. Chirp信号参数估计方法的研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [14]魏鑫,张平. 周期图法功率谱估计中的窗函数分析[J]. 现代电子技术,2005,28(3):14-15.
- [15]井敏英,郭佳林,李大伟,等. 连续时间信号频谱分析研究及MATLAB实现[J]. 江西通信科技,2010(4):23-25.

作者简介:陈毅(1993-),贵州遵义人,助理工程师,硕士,研究方向:地质工程,电子信箱:1061026822@qq.com.

责任编辑:李富文 收稿日期:2020-12-07