地震信号的时-频分析 *

许康生
(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对单频正弦波和实际地震信号的对比分析, 表明时频分析应用于地震信号处理是有效的和可靠的, 尤其是在希望获得频率成分随时间变化的规律时有普通傅里叶变换所不具有的优点.

主题词: 正弦波; 傅里叶变换; 地震信号; 时-频分析
中图分类号: P315.3^{+}1 文献标识码: B 文章编号: 1000－0844(2000)04－0479－04

0 引言

对于地震的认识和研究大体可分为 3 个环节: 一是如何获得全面、可靠、真实的地震记录, 即如何获得信息, 这是地震观测技术所追求的目标, 如模拟地震仪向数字地震仪的发展就使获取地震信息的频带更宽、动态范围更大、分辨率更高, 也就是说取得的信息内容更丰富全面. 二是如何对地震信息进行分析处理, 更深入更有效地提取有用信息. 三是如何对结果进行地震学和地球物理学方面的解释, 得出结论. 本文的工作主要侧重于第 2 个环节.

自 1807 年法国工程师 Fourier 提出傅氏变换以来, 随着数学和计算技术, 特别是计算机技术的迅速发展, 傅氏分析成为各学科进行信号分析的重要手段和工具, 其数学描述为

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\mathrm{e}^{-j\omega t}\mathrm{d}t \tag{1}$$

逆变换为

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)\mathrm{e}^{j\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{2}$$

傅氏变换的数学意义是使得微分、积分、卷积等运算经傅氏变换简化为一般代数运算, 其物理意义在于通过变换将时域和频域联系在一起, 在时域内隐藏的现象和特征在频域内突现出来, 所以, 傅氏变换在包括地震学在内的各学科得到广泛的应用至今, 尤其对于平稳信号的分析处理[1, 2]. 由式(1)、(2)可知, 信号时域内是时间的函数, 在频域内是频率的函数. 当希望知道随时间的推移, 信号频率成分的变化规律和特征时, 傅里叶变换就表现出它的局限性, 因为频域内某一频点的幅值是由时间域上整个波形所决定的, 某一时刻的状态是由频谱在整个频域上的贡献确定的. 为了克服傅氏分析这一缺点, 这就需要一种能够在时域局部进行频谱分析的数学方法.

1 信号的时-频分析

1946 年, Gabor 发展了付氏变换, 提出时频分析的一种具体方法——短时傅里叶变换(STFT), 数学表达式[3]为

$$F(\tau,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)g(t-\tau)\mathrm{e}^{-j\omega t}\mathrm{d}t$$

收稿日期: 2000-02-09
* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000036
作者简介: 许康生(1963－), 男(汉族), 甘肃武威人, 工程师, 主要从事地震监测和地震信号处理工作.

上式可改写为

$$F(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t+\tau)\, g(t) e^{-j\omega t} dt$$

表示窗口不动, 信号沿时间轴滑动. 对时间离散化, 取 $t = mT$, $\tau = nT$, 则 STFT 可表示为

$$F(n, \Omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m+n)\, g(m) e^{-i\Omega m}$$

其中, $\Omega = \omega T$, T 为采样间隔, n 为数据点数, m 为窗宽度. $g(m)$ 为窗口函数. 短时性是通过时域加窗来实现, $F(n, \Omega)$ 反映了 $f(n)$ 在时刻 m 的频谱的相对含量.

本文资料的计算处理是在 MATLAB5.2 环境下自编程序实现的[4, 5]. 由于这一方法仍受测不准原理的约束, 不能同时取得高时间分辨率和高频率分辨率, 在窗宽度选择上必须考虑信号处理的目的, 若信号处理的目的侧重于频率分辨, 窗宽度选择可适当取大, 若侧重于时间分辨, 窗宽度可适当取小. 本文主要讨论的是这一方法对地震信号处理的可靠性和有效性, 在窗宽度的选择上作了折中处理, 两者兼顾. 窗函数采用汉宁(Hanning)窗, 窗宽度为 512 点. 汉宁窗的函数表达式为

$$w(k) = 0.5[1 - \cos(2\pi \frac{k}{m+1})] \qquad k = 1, 2, \cdots, m$$

结果显示横轴为时间(s), 某一频点的幅值大小由灰度表示, 约定幅度值由小到大, 对应图上是从白到黑.

2 单频正弦信号的时-频分析

为了验证时频分析及程序的有效性和真实性, 首先对已知的单频正弦波序列信号进行计算处理. 信号数据包含 17 个正弦波频点, 按图上的顺序依次为 0.010、0.014、0.020、0.033、0.05、0.066、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、15、18、20、22 Hz, 由数字地震仪记录, 地震计为 FBS-3, 频带范围 20 s-20 Hz, 数据采集器为 16 位分辨率. 17 个频点的正弦波时域记录和时频分析结果见图 1, 显示出各频点在时间轴上出现的情形, 频率计算及随时间变化出现的位置正确, 灰度表示的振幅大小与时序图一致. 由此可以认为, 时频分析方法对信号的分析处理是有效可靠的.

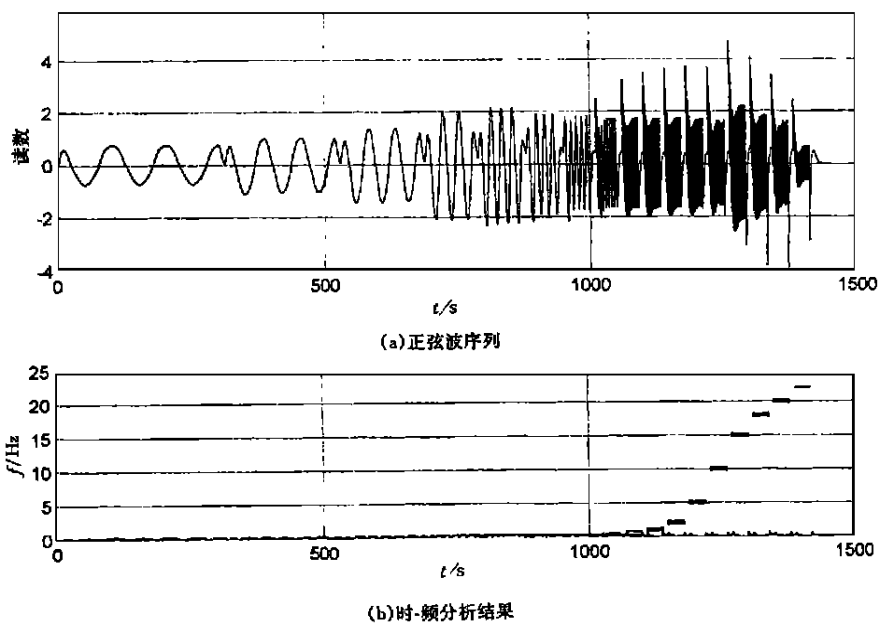

图 1 正弦波序列及其时-频分析结果

Fig. 1 Sine wave series and their time-frequency analysis results.

3　地震实例的时-频分析

3.1　对一个地震的时-频分析

随意抽取 1996-06-01 天祝地震记录为例进行处理, 结果显示于图 2.

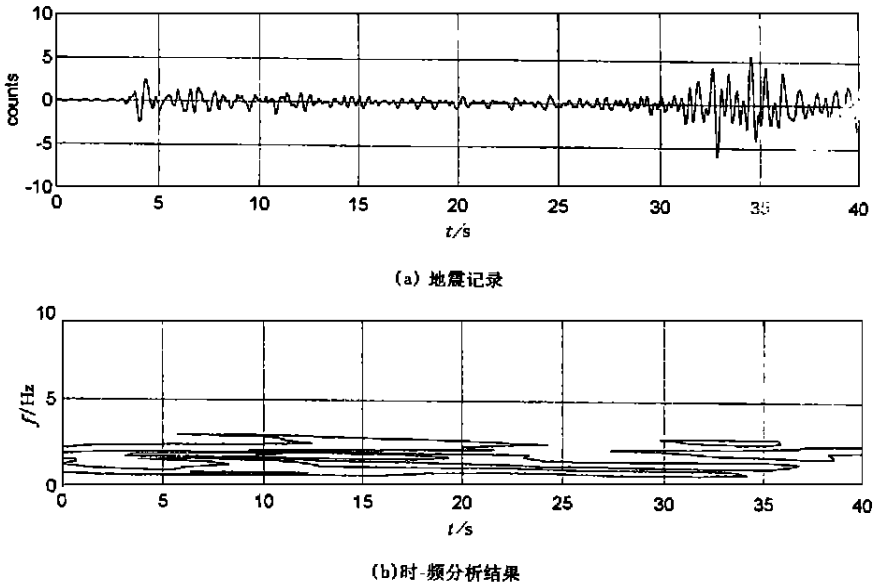

图 2　1996 年 6 月 1日 天祝地震记录及其时-频分析

Fig. 2　The records and their time-frequency analysis of the Tianzhu earthquake on Jun. 4, 1996.

图 2 显示出主要震相出现时频率成分变化的时间特征, 相信, 这对于震源物理过程及区域构造的深入研究是一种有用的分析方法.

3.2　对地震序列的时-频分析

本文选用 CDSN 兰州台记录的天祝地震(1996-06-01 M_S5.8)序列 16 个地震 P 波的资料进行计算处理, 主要是因为作者曾用几种频谱分析方法[9](普通傅里叶变换、最大熵谱法等)对其作过分析, 结果不仅显示出震前、大震期间、震后这一大时间尺度上地震谱结构的变化, 而且这一方法还显示出每个地震 P 波频率变化的时间特征. 仍用这些资料进行时频分析, 旨在使结果具有对比意义, 验证时频分析方法对地震信号处理的真实性、有效性和其对有用频谱成分的分辨率. 限于篇幅, 在此仅给出 4 例地震(1995-06-04, 1996-04-26, 1996-06-01, 1996-12-28)的时-频分析结果, 见图 3.

从图 3 中可以看出, 天祝地震前(1995-06-04)和震后半年(1996-12-28)地震 P 波高频成分在 3.8 ~ 4.2 Hz 的范围内; 震前一个多月(1996-04-29), 地震 P 波初动 1.5 s 后出现 4.2 ~ 4.8 Hz 的频率成分, 1996-06-01 大震期间, 地震的整个 P 波含有 5 ~ 5.2 Hz 和 6.1 ~ 6.4 Hz 的高频成分. 这与作者以前用其它谱分析方法得出的结果相吻合. 而且, 清楚地显示出震前、地震期间地震频谱中高频成分出现的时间特征, 这是普通傅氏变换所不具有的优点.

4　结语

(1) 正弦波序列的时频分析结果表明, 时-频分析对信号处理, 无论是在时间轴上还是频率轴上计算结果都是真实可靠的.

(2) 对地震信号实例的计算结果不仅显示出震前、大震期间、震后地震频谱成分的明显变化, 而且能显示地震波在时序上的变化特征, 这对于深入研究地震的物理过程、反演区域构造也是有益的. 由于本文重点在于讨论分析方法, 对于地震频率成分在时域上变化的地球物理和地震学方面的意义未展开讨论, 这将是今后进一步开展的工作.

(3) 时-频分析方法建立在平稳信号分析的基础之上, 受测不准原理的约束, 不能同时在时域和频域上获

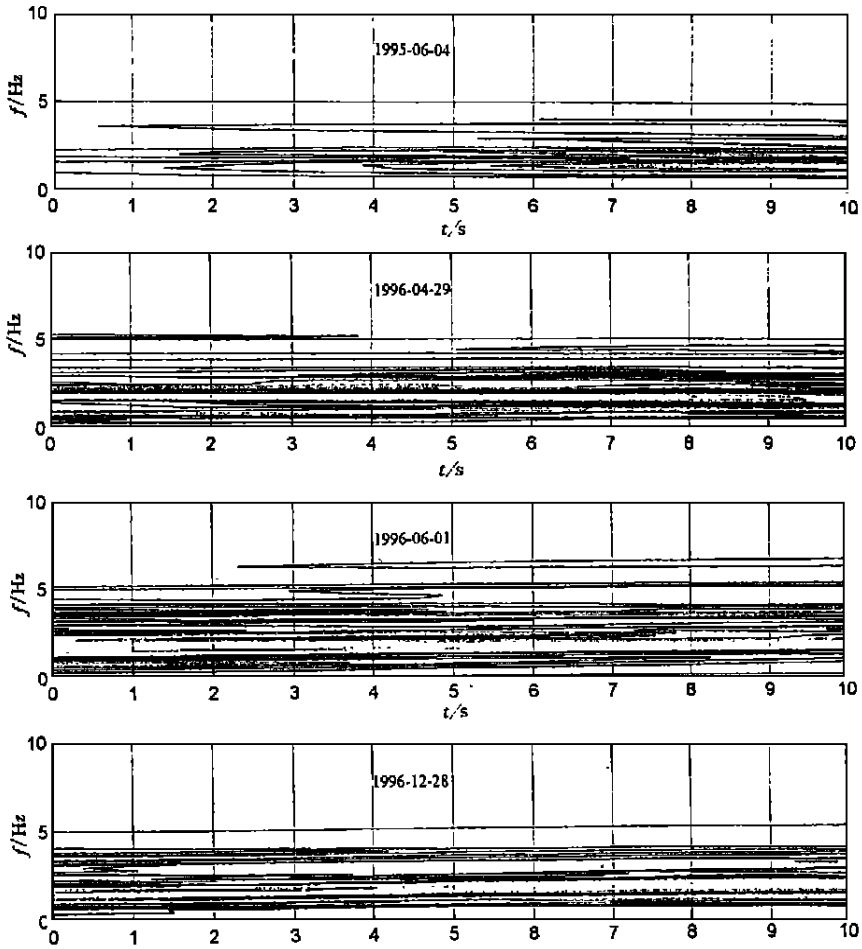

图 3 天祝地震序列 P 波的时-频分析

Fig. 3 Time-frequency analysis of P wave for the Tianzhu earthquake series.

得高分辨率, 应用时应根据信号处理的侧重点适当选取窗宽度.

闵祥仪研究员 对本文提出了宝贵的修改意见, 谨此致谢.

[参考文献]

[1] 吴湘淇. 信号系统与信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.

[2] 赵松年, 等. 子波变换与子波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.

[3] L 科恩著, 白居宪译. 时-频分析: 理论与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

[4] 高俊斌. MATLAB5.0 语言与程序设计[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998.

[5] 楼顺天, 李博菡. 基于 MATLAB 的系统分析与设计的信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.

[6] 许康生, 周志宇, 李英. 天祝地震前后地震的谱结构变化[J]. 高原地震, 1999, 11(1): 48—52.

(下转 478 页)

传输，又将台网的监测孔径扩大到150多公里，大大提高了合肥数字遥测台网的监测能力. 达到了该台网系统技术方案设计要求.

3 结语

数据复分复接技术应用于数字化地震台网建设有着十分重要的意义，当然也要根据每个台网建设特点和要求来确定，实现的过程也会有所不同，特别是信道条件，应根据自己的优势、技术方案和数据量大小，采取不同级联方式，否则也会降低系统的效率.

该项工作得到了福建省地震局陈文明总工、朱海燕主任、北京英连科公司杨文刚同志的帮助指导，在这里表示谢意.

[参考文献]

[1] Bylanski P, Ingram D G W 著(迟惠生译). 数字传输系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.

[2] 朱海燕, 等. 无线扩频技术在数据传输中的应用[J]. 福建地震, 1998, (2): 9—13.

THE APPLICATION OF THE DATA COMPOUND AND DECOMPOSITE TECHNOLOGY IN DIGITIZED RADIO TELEMETRY NETWORK

ZHAO Jian-he[1], GE Ning[1], XU Yan[2], YUAN Hong-zhong[3]

(1. *Seismological Bureau of Anhui Province, Hefei* 230031, *China*;
2. *Seismological Bureau of Huainan City, Huainan* 232001, *China*;
3. *Seismological Bureau of Lu' an City, Lu' an* 237002, *China*)

Abstract: The basic principle and linking method of the data composite and decomposite technology are expounded. The MPX1059 data compounding equipment is applied in relay transferring of the Hefei digital radio-linked telerecording seismometer network and good results have been achieved.

Key words: **Digital seismic network**; **Seismic data**; Composite and decomposite technology; Relay transferring

---

(上接482页)

TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF THE EARTHQUAKE SIGNALS

XU Kang-sheng

(*Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: Time-frequency analysis method is further expansion of Fourier transform. Earthquake signals may be decomposed into different frequency section on time-axis by time-frequency analysis method. Emulation study results show that time-fequency analysis method has a series of advantages while FFT methods do not have. The method is very effective in signals analysis.

Key words: **Sine wave**; **Fourier transform**; Earthquake signal; Time-frequency analysis