近地震波的小波相对能量分布特征分析。

许康生,李 英,李秋红

(中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要:地震波具有非平稳信号特征,能量分布在一个有限带宽范围内。本文根据小波变换的时频 特性和分层分解关系,得到了近地震(震中距小于 300 km)峰值能量的频率主要集中在 3~6 Hz 频 段这一初步结果。统计分析结果证明了这种方法对于近地震波分析的有效性和可靠性,同时也表 明基于小波变换的地震相对能量分布特征可以更准确的给出地震信号的细节。结果对于地震震源 及地震波传播规律的研究以及工程抗震设计具有一定的参考意义。

关键词:近地震波;相对能量;小波变换;多分辨率;频率子带

中图分类号: P315.730.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)01-0166-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0166

Distribution Characteristics of Wavelet Relative Energy on Near-earthquake Wave

XU Kang-sheng, LI Ying, LI Qiu-hong

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Seismic waves have characteristics of non-stationary signals, and their energy distribution is in a finite frequency band. In addition, they contain a significant amount of information about sources and media. Analysis of seismic signals is used to determine the sources and propagation medium and for further study of earthquake mechanisms. Fourier transform is a classic method used for signal processing. Because it is a pure frequency domain analysis method, its shortcoming is lost time information. The Fourier transform method stringently requires that the system is linear and that the signal is stationary. Therefore, high limitations are placed on non-stationary signals. For short-time Fourier transform, constraints of the window function result in difficulties in simultaneously obtaining good resolution in time and frequency domain. Because the wavelet transform has the characteristic of multi-resolution, the time and frequency windows can be dynamically adjusted as the signals changes; thus, the characteristics of local information expression capability is improved in the time and frequency domain. Therefore, the dynamic characteristics of the seismic waves in the frequency and time domain should be determined by the multiresolution decomposition of seismic signals. In this paper, the multiresolution decomposition of discrete wavelet transform is used to show decomposition of a synthetic waveform that is rebuilt by different level signals of decomposition. The standard square error is 1.554 2e-019, and the root mean square error is 7.351 2e-012 between original and rebuilt signals. The signal is not distorted due to decomposition and reconstruction processing. These results satisfy the requirements of computational analysis. Moreover, nine earthquakes records obtained from the Gansu Seismic Network with a magnitude range of $M_{\rm L}3$, 3-4. 2 were processed by using the same meth-

① 收稿日期:2010-11-16; 中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013007

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2009A19);中国地震局地震行业科研专项(200708031-1) 作者简介:许康生(1963-),男(汉族),甘肃武威人,高工,主要从事地震监测和地震数据处理研究.E-mail;xuks@foxmail.com. ods.

Results indicate a relative energy distribution range of 1-15 Hz and an energy peak of 3-6 Hz for the local seismic wave ($\Delta < 300$ km). For one earthquake, the relative energy distribution of the earthquake differs among stations, which is caused by the focal radiation pattern and medium differences. The statistical test results show that the error level and results of synthetic waveform testing are consistent. This method can accurately determine near seismic energy distribution in the frequency domain characteristics, which is conducive to the study of seismic wave variation in various frequency bands. Moreover, statistical results show that this method is effective and reliable for obtaining details of seismic wave variation. However, it is difficult to explain the phenomenon such that the frequency of the peak energy changes from low to high with an increase in epicenter distance. Therefore, this topic requires further study. In addition, it should be noted that if such a method is used to process data for wavelet window length, some energy may be lost in the calculation process. The results of this study provide reference value in the research of earthquake sources, radiation patterns and seismic wave propagation in an anisotropic medium, and aseismic design for engineering applications.

Key words: Local seismic wave; Relative energy; Wavelet transform; Multiresolution; Subband of frequency

0 引言

地震波携带着丰富的震源信息和路径介质信息,人们希望通过对地震信号的分析获取所关注的信息。对地震信号处理最经典的方法是傅里叶变换,但傅里叶变换是纯频域的分析方法,处理时丢失了时间信息。又因为傅里叶变换严格要求系统的线性、信号的平稳性,对于非平稳信号表现出很大局限性。后来发展的短时傅里叶变换(STFT),受窗函数的制约,不能在时间域和频率域同事得到很好的分辨率。小波变换由于具有多分辨率的特征,其时间窗和频率窗随信号的具体形态可以动态调整,在时域和频域表征局部信息的能力得到加强。本文期望通过对地震信号的多分辨率分解,展现地震波在频域和时域的动态特征和规律。对近地震的相对能量分布特征的分析就是其中的问题之一。

1 地震信号各子带相对能量分布的数学表 达

信号的小波多分辨率分解可表达为

 $S(t) = \sum_{j=-N_j}^{-1} \sum_{k} C_j(k) \phi_{j,k}(t) = \sum_{j=-N_j}^{-1} r_j(t) \quad (1)$ 式中 S(t)为信号; Cj(k)为小波系数; $\phi_{j,k}(t)$ 是小波 母函数。由于小波簇{ $\phi_{j,k}(t)$ }对 L²(R)是 正交的, 小波系数由 C_j(k) = <S, $\phi_{j,k}$ > 给出,每层的能量 就是细节信号的能量:

$$E_{j} = ||r_{j}||^{2} = \sum_{k} |C_{j}(k)|^{2}$$
 (2)

总能量有下式给出:

$$E_{\text{total}} = \|S\|^2 = \sum_{j < 0} \sum_{k} |C_j(k)|^2 = \sum_{j < 0} E_j$$
(3)

我们定义一个归一化参数 ρi 表示相对小波能量:

$$\rho_j = E_j / E_{\text{total}} \tag{4}$$

$$E_{j}^{(i)} = \sum_{k=(i), L+1}^{i,L} |C_{j}(k)|^{2} \quad i = 1, \cdots, N_{T} \quad (5)$$

这个时间窗口的总能量为

$$E_{j}^{(i)} = \sum_{j<0} E_{j}^{(i)}$$
 (6)

相对能量分布为

$$\rho_{j}^{(i)} = E_{j}^{(i)} / E_{\text{totalj}}^{(i)}$$
(7)

2 各子带相对能量分布的理论测试

2.1 信号构建

构建信号的采样率为 100 sps.构建的正弦信号分为 3 段:第一段频率为 0.5 Hz,第二段频率为 5 Hz,第三段频率为 15 Hz。

2.2 小波基的选择

在信号分析时小波基的选择也很重要。我们在 此选择了 Daubechies 小波。其特点是有较好的紧 支撑性、光滑性和近似对称性。小波系数按正整数 N分为不同序列(dbN),考虑到地震仪记录地震波 的频带范围,在此我们选用 db8。

2.3 理论信号的小波分解及结果检验

在 Matlab2009a 环境下,自编程序实现信号的 小波多分辨率分解。图1展示了原始理论信号和信

效的、可靠的。

3 实际地震波的计算处理

结果表明,信号的能量集中在子带2、4、7,对应

我们选取了9例2010年甘肃地震台网记录

M₁3.3~4.2,震源深度 5.9~9.2 km 的地震,进行

小波多分辨率的分解及相对小波能量分布计算。所

选地震的有关参数来自中国地震台网(表 2)。

信号的 15 Hz、5 Hz 和 0.5 Hz, 与信号频率一致。

从理论信号的处理及测试结果表明,这种方法是有

号重构的对比,可见信号没有因分解和重构的处理 而发生失真。通过对原始信号和重构信号的偏差统 计分析,得到二者的方差(SSE)为 1.554 2e-019, 均方根差为(RMSE)为 7.351 2e-012。可以满足 计算分析的要求。

2.4 理论信号的相对能量分布

根据前述信号的相对能量分布的数学表征,对 构建信号进行了小波相对能量分布的计算。采用 db8 小波基将信号分解为 8 个子带,每个子带对应 的频段如表 1 所示。



表1 子带与频段对应表



Fig. 1 Comparison of the original signal and rebuild signal.

	表 2 选取的地震参数
Table 2	Seismic parameters of selected earthquake

事件序号		发震时刻	纬度/°		震源深度/km	震级 M _L	震中
1	2010-03-03	22:35:01	32.86	105.31	7.3	3.5	武都
2	2010-08-01	01:23:59	39.50	102.60	8	3.7	阿右旗
3	2010-09-14	21:27:06	39.10	98,60	6	3.8	肃南
4	2010-09-22	18:00:45	38.85	99.46	9.2	3.8	肃南
5	2010-10-11	20:55:01	37.51	102.24	5.9	3.3	天祝
6	2010-10-12	23:53:21	39.52	103.45	8.6	3.7	阿右旗
7	2010-11-20	16:39:41	37.60	102.90	7	4.2	古浪
8	2010-12-10	17:13:01	39.30	100,80	7	4.1	阿右旗
9	2010-12-13	13:19:30	38.30	101.00	6	4.1	民乐

3.1 实际地震信号的小波分解和结果检验

对选取的9例地震记录进行了小波多分辨率分 解(db8),并进行信号重建。对重建信号和原始信 号的统计检验结果表明,方差(SSE)量级达到 10⁻¹⁹,均方根差(RMSE)的量级达到10⁻¹²,与理论 信号的误差量级一致。图 2 展示了 2010 年 3 月 3 日武都地震,甘肃文县台垂直向记录的小波多分辨 率分解的各层细节和信号重建的波形,可见分解后 的细节更清晰的表达了信号的频率特征和在时序上 的变化过程,重建信号与原始信号之间偏差极小。





Fig. 2 Multiresolution decomposition and signal rebuild of Wudu earthquake in 2010 recorded by Wenxian seismic station).

		Table 3	The sub	-band of	seismic v	wave pea	k		
	台名	WXT	WDT	CXT	ZHQ	TSS	WHS	MXT	DBT
事件1	震中距/km	60	63	105	136	177	202	211	234
	峰值子带	3	4	4	4	4	5	4	5
	台名	MIQ	HXP	SDT	GTA	SNT			
事件 2	震中距/km	74	130	157	239	268			
	峰值子带	3	3	4	4	4			
	台名	SNT	GTA	SDT	HXP				
事件 3	震中距/km	13	68	137	236				
	峰值子带	4	3	4	4				
	台名	SNT	GTA	SDT	HXP				
事件 4	震中距/km	53	135	171	219				
	峰值子带	4	4	4	3				
	台名	HJT	SGT	НХР	HYS	JTA	SDT	LZH	
事件 5	震中距/km	41	48	99	112	167	175	213	
	峰值子带	4	5	3	3	5	6	5	
	台名	MIQ	HYS	HXP	SGT	SDT	HJT	JTA	
事件 6	震中距/km	53	135	171	219	224	225	265	
	峰值子带	4	4	5	4	5	6	4	4
	台名	SDT	HXP	MIQ	SGT				
事件7	震中距/Km	53	135	171	219				
	峰值子带	4V3	3	5					
事件 8	台名	SDT	HXP	SNT	GTA				
	震中距/km	52	97	135	159				
	峰值子带	4	3	4	4				
	台名	SGT	YDT	JTA	BYT			<u></u>	
事件 9	震中距/km	12	96	114	157				
	峰值子带	4	5	4	5				

表 3 地震波峰值子带

3.2 实际地震波的相对能量分布

采用同样的计算方法,计算了这 9 例地震一些 近台记录垂直向的相对能量分布(表 3)。

从表 3 可见近地震的能量主要集中在 3,4,5 这 3 个频率子带,估算的频率范围在 1~15 Hz,其中, 子带 4 能量峰值最为集中,频率范围为在 3~6 Hz, 同一地震不同台站记录的相对能量分布存在差异。

对不同震中距段内,能量峰值子带的出现概率 作了初步统计,结果如表 4。可以看出随震中距增 大,峰值能量的频率由低向高的走势,这种现象的解 释或许是一个需要进一步探求的问题。

表4 地震峰值能量频带的概率统计

Fable 4	The probabili	ty on sub-ban	d of seism	ic wave peak

電中時/1	子帯 3 出现	子帯4出现	子带 5 出現
展甲距/km	概率/%	概率/%	概率/%
<100	33	53	13
$100\!\sim\!200$	14	52	14
200~300	7	38	38



图 3 文县台垂直向记录的相对能量分布 (2010.03.03 武都地震)

Fig. 3 Distribution of relative energy of Wudu earthquake in 2010 recorded by Wenxian seismic sation.

图 3 给出了 2010 年 3 月 3 日武都地震甘肃文 县台垂直向记录的相对能量分布。

4 结果与讨论

(1) 基于小波多分辨率分解的后的重建信号与 原始信号之间的偏差很小(在 10e⁻¹² 量级上),可以 满足信号分析的要求;

(2) 将地震信号分解在不同频率的子带上,仍 然保留了信号的时间信息,并在一定程度压制了其 它杂嗓干扰信号,更利于研究地震波在不同频段的 时程变化规律,更利于研究震源过程、能量辐射规律 和路径介质的各向异性;

(3)近地震的峰值能量频率集中在 3~6 Hz 之间;

(4) 地震波相对能量的计算方法可以很好的揭示近地震能量分布在频率域的特征;

(5)由于小波窗长的影响,计算过程会有一些 能量泄露,在计算处理时要给予注意和考虑。

[参考文献]

- [1] 李英,张淑贞,许康生.小波降噪方法在地震信号处理中的应用
 [J].西北地震学报,2006,28(2):159-162.
 LI Ying, ZHANG Shu-zhen, XU Kang-sheng. Application of
 Wavelet Transfer in Seismic Signal Denoise[J]. Northwestern
 Seismological Journal,2006,28(2):159-162.
- [2] 刘希强,沈萍,山长仑,等. 数字化地震波形资料的时频分析方法及应用[J]. 西北地震学报,2004,26(2):118-124.
 LIU Xi-qiang, SHEN Ping, SHAN Chang-lun, et al. Time-frequency Method and Its Application in Digital Seismic Wave Data Processing[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26(2):118-124.
- [3] 姚家骏,杨立明,冯建刚,常用时频分析方法在数字地震波特征 量分析中的应用[J].西北地震学报,2011,33(2),105-109.
 YAO Jia-jun, YANG Li-ming, FENG Jian-gang. Application of Common Time-Frequency Analysis Methods in Analyzing Characteristic Quantity of Digital Seismic Wave[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(2),105-109.
- [4] 王燕,刘俊民,王晓明,等. 地震阈值监测技术中的震级校正
 [J],西北地震学报,2011,33(4):319-321.
 WANG Yan, LIU Jun-min, WANG Xiao-ming, et al. Magnitude Calibration of Seismic Threshold Monitoring[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(4):319-321.
- [5] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社, 2000:42-68.

YANG Fu-sheng. Application and Engineering analysis of Wavelet Transfer[M]. BeiJing: Science Press, 2000;42-68.

- [6] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与统计
 [M].西安:西安电子科技大学出版社,1999:210-232.
 HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, XIA Jun, et al. Statistics and Analysis of System Based on MATLAB[M]. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 1999: 210-232.
- [7] 许康生,李秋红,李英.大地震前近台背景噪声的频谱分析[J]. 西北地震学报,2012,34(2):150-153.

XU Kang-sheng, LI Qiu-hong, LI Ying. Analysis on the Spectrum of Background Noise in Stations Near by Epicenters of Two Great Earthquakes [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 150-153.

- [8] 刘希强,孙亚强,赵冰,等. 地震震中实时动态定位的方法研究
 [J]. 西北地震学报,2012,34(4):342-348.
 LIU Xi-qiang, SUN Ya-qiang, ZHAO Bing, et al. Research on Real-time Evolutionary Earthquake Epicentral location[J].
 Northwestern Seismological Journal,2012,34(4):342-348.
- [9] Daubechies I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelet[J]. Communication Pure and Applied Mathematics, 1988,41(7):909-996.