

用最大熵谱法分析玉门地震序列的频谱变化

许玉红¹, 李兴坚², 雷功明¹

(1. 甘肃省地震局嘉峪关地震台, 甘肃 嘉峪关 735100; 2. 甘肃省地震局高台地震台, 甘肃 高台 734300)

摘要:采用 Burg 最大熵谱分析方法对玉门地震序列进行了频谱分析计算。结果显示:当主震发生时,频谱主频向高频方向变化,当整个序列接近尾声时,频率逐渐恢复。这个结果可解释为,随着应力的积累,孕震区介质部分裂隙闭合,挤出裂隙水,密度相对增大,品质因数提高,高频成分的衰减降低,使频谱的主频率移向高频。

关键词:最大熵谱法; 玉门地震序列; 频谱分析

中图分类号: P315.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)增刊-0078-03

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.增刊.0078

Analysis on the Spectrum Variation of Yumen Earthquake Sequence by Using Maximum-entropy Method

XU Yu-hong¹, LI Xing-jian², LEI Gong-ming¹

(1. Jiayuguan Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Jiayuguan Gansu 735100, China;

2. Gaotai Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Gaotai Gansu 734300, China)

Abstract: In this paper the spectrum of Yumen earthquake sequence was calculated and analyzed by using the maximum-entropy method of Burg. The results showed that the dominant frequencies changed in direction to high frequencies with the coming of main shock, and the dominant frequencies gradually restored with the ending of sequence. This phenomenon could be understood as: with the accumulation of stress, some crannies across the earthquake-preparation zone were closed, then fluid in the crannies was pushed out, and density of the medium became relatively high, which made quality factor of the medium increase and attenuation of high-frequency components reduce so that dominant frequencies became higher.

Key words: maximum-entropy method; Yumen earthquake sequence; spectrum analysis

0 引言

地震学家认为,地震在震源区的孕育过程就是岩石应力不断聚积的过程。伴随着应力的积累,孕震区岩石层的物理性质也将随之发生变化,比如有微裂隙的产生、闭合、贯通、缩小、空间排列方式的变化,以及各向异性程度的变化,都将引起介质品质因数的变化,那么穿过这些介质的地震波的频谱成分也应有所变化,提取这些变化信息,无论对于研究孕震过程、发育机制还是地震预报都将是很有意义的。对地震波的频谱分析则是一种重要的方法之一,但

效果又常常受到分辨率的制约,所以选择一种分辨率较高的方法就显得非常重要,本项研究采用了最大熵谱分析方法,对 2002 年 12 月 14 日 21 时 27 分 27.6 秒玉门(39.82°N, 97.32°E) M_s 5.9 地震序列进行了分析处理,试图通过分析本次地震前后频谱变化来探讨其应力变化过程。

1 最大熵谱法及其 MATLAB 实现

1967 年 Burg 在频谱分析领域引入了信息熵的原理和方法,提出了最大熵谱分析,这是一种非线性

谱分析方法:令有限序列 $\{X_n\} (|n| < N)$ 的自相关函数 $R(n)$, 当外推至 $|n| \rightarrow \infty$ 时, 不做任何假设, 而是每推一步都保持未知事件的熵最大^[1-3]。

设 $|n| \rightarrow \infty$ 时的 $R(n)$ 的功率谱为

$$P(\omega) = \sum R(n)e^{-j\omega\Delta n}$$

(1)

熵谱为

$$H = \sum P(\omega) \ln P(\omega)$$

(2)

其中 $P(\omega)$ 为有限序列的功率谱。

最大熵谱功率谱为

$$P(f) = \frac{P_{\min}^{(M)} \Delta t}{|1 - \sum_{j=1}^n a_j e^{-j\omega\Delta t}|}$$

(3)

其中 P 为最小误差功率; a_k 为滤波器系数; Δt 为采样时间间隔; 公式(1)和(3)中的 j 为虚数。

MATLAB 信号处理工具箱提供了多种信号谱分析方法^[2], 其中包括互功率谱估计、协方差功率谱估计、Burg 法谱估计等。使用 MATLAB 编程, 程序代码简洁高效, 而且可将结果以图片形式输出, 使用非常方便。Burg 方法是根据 AR 自回归模型与预测误差滤波器的等价性, 同时作向前和向后两个方向预测, 使预测误差滤波器的输出方差最小, 递推得出自回归模型参数和自协方差参数。

最大熵谱分析等价于用 AR 模型拟合测量数据, 因此就存在确定模型阶数 M 的问题。阶数 M 定得是否准确将直接影响到谱估计的结果。阶数过小会出现“蚀频”现象(漏掉某些频率成分), 阶数过大则会造成“增频”现象(出现虚假频率成分)。在时域中确定 AR 模型的阶数有许多方法, 如 CCT(特征相关时间)准则, 阶数 M 的计算公式是

$$M = \pi \frac{\sum_{m=0}^{N-m} |R_x(m)|}{2 |R_x(0)|}$$

(4)

另外, 还有最终预测误差原则(FPE)、最小信息量准则(AIC)等方法, 但到目前为止, 还没有一种对各种方法和各种数据都适用的定阶方法, 通常使用经验加试验的方法。经验表明, 用以上准则确定的阶数, 用于 AR 谱估计时通常是偏低的, 这是因为实际的测量序列一般不是满意的强自回归过程, 而是具有独有的随机性。对于短资料记录情形, 取 $M = N/2$ 较合适, 而对于长资料记录, 取 $M = N/3$ 更好些。特别是对于较短的资料序列或分辨靠得很近的谱峰时, M 还要适当选大一些^[3-6]。本文通过试算确定阶数为 17, 然后进行最大熵谱分析。

2 资料的选取及计算结果

本研究数据选取了 2002 年 1 月 1 日至 2003 年 12 月 31 日高台台站宽频带数字地震仪 VBB 通道记录, 高台台记录到本次主震及余震共 240 多次, 由于震级 $M_L < 1.8$ 的地震 P 波段记录不很清晰, 为了不影响整个研究的真实性, 本文只选择 $M_L > 1.8$ 地震 99 次, 其中主震前 7 次, 主震及余震 92 次。

高台地震台高程为 1 340 m, 台基为花岗岩, 地震计为 JCZ-1, 观测频带为 DC-20 Hz, 采样率为 50, 数据采集器为 EDAS-C24, 动态观测范围为 140 dB。地动噪声功率谱曲线见图 1。

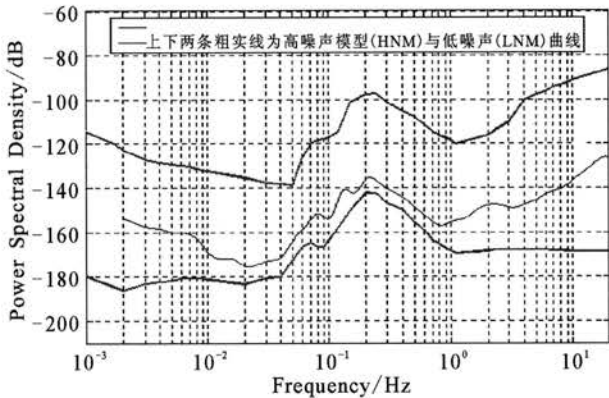


图 1 高台台地动噪声功率谱

Fig. 1 Power spectrum of the background noise at Gaotai station

地震记录的频谱包括震源频谱、衰减频谱和仪器的传递函数。因此, 对数据进行了去倾处理, 并扣除了仪器响应, 采用 butterworth 3 阶带通滤波器, 带通范围是 5~20 Hz, 以突出本项研究所关注的频率范围, 然后对每个地震采用 Burg 最大熵谱分析方法进行频谱分析计算, 并对计算结果分析研究。考虑到噪声背景, 仅选取 P 波段进行计算。表 1 给出了主震及两次强余震前后的频率平均结果。

表 1 主震及两次强余震前后的频率变化平均结果

日期	发震时刻	震中位置		震级 M_L	频率变化/Hz		
		纬度 /(°)	经度 /(°)		震前	震时	震后
2002-12-14	21:27:28.0	39.82	97.33	5.9	5.56	7.03	6.35
2002-12-14	22:25:40.0	39.73	97.37	4.8	6.15	7.62	6.25
2002-12-17	04:36:44.0	39.83	97.38	4.5	6.40	8.17	5.80

由图 2 可见, 主震前地震的拐角频率一直增高, 主震时略有下降, 主震后震荡, 但总体继续走高。频率演变过程表现出震前低—发震时频率明显增大—震后调整下降的变化过程。在随后发生的两次强余震前后, 表现出同样的变化趋势。从而认为在发生大震前地震拐角频率演变过程表现出震前低—震时

增大一震后调整下降的变化过程,这一结果基本反映出这一地区的应力调整过程:在发生地震前孕震区介质应力状态处于一个相对平衡,主震发生时孕震区介质原来的应力平衡状态被打破,地震发生后积聚的应力被释放,介质应力逐步调整为新的平衡状态。这一结果与已知的震源力学过程是基本相吻合的。

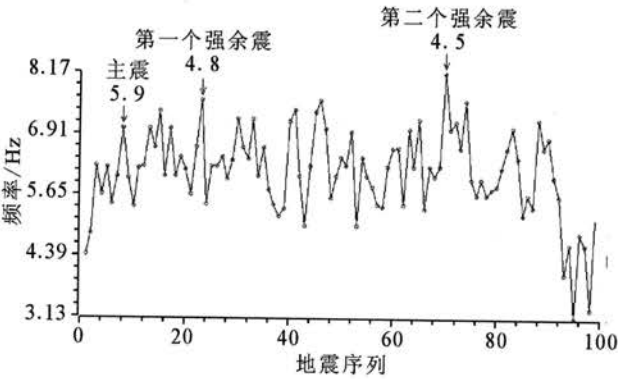


图2 玉门地震($M_s5.9$)前后P波段UD分向地震频谱的主频变化

Fig. 2 Variation of the dominant frequencies of in UD direction P-wave before and after the Yumen earthquake

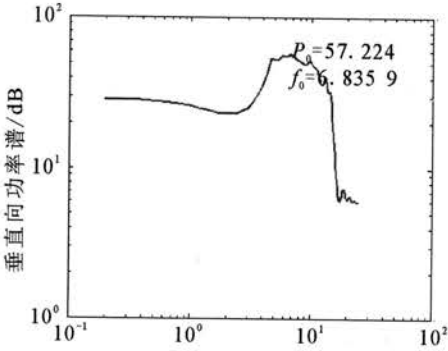


图3 主震前地震的频谱图

Fig. 3 Spectrum of the earthquakes before the main shock

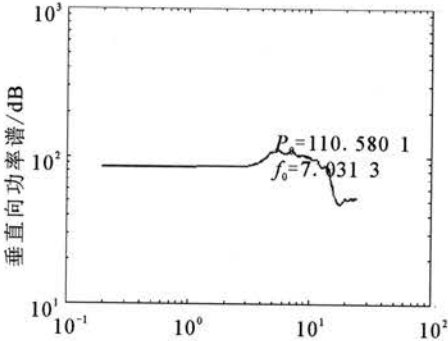


图4 主震的频谱图

Fig. 4 Spectrum of the main shock

为了更加突出地震前后频率的变化,下面给出了主震前(图3)、主震(图4)和主震后167小时发生

的余震(图5)的频谱结构图。在主震前功率谱 P_0 为 57.22 dB,拐角频率 f_0 为 6.84 Hz;主震的 P_0 为 110.58 dB,拐角频率 f_0 为 7.03 Hz,与震前的相比明显增大;在主震后 167 小时的余震的功率谱 P_0 为 83.56 dB,拐角频率 f_0 为 5.86 Hz。地震后由于地壳介质的应力状态的调整变化,没有恢复到震前的水平,但有明显的下降,还是清晰的反映出在整个地震过程频谱“低—高一低”的演化特性。

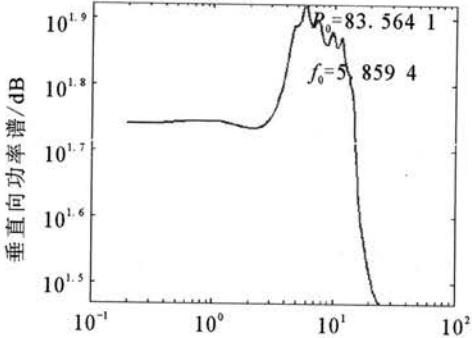


图5 主震后167小时发生的余震的频谱图

Fig. 5 Spectrum of the aftershocks in 167 hours after the main shock

3 讨论与认识

通过本次研究发现在该次地震主震发生时,频谱主频向高频方向变化,当整个序列接近尾声时,频率逐渐恢复。这个结果可解释为,随着应力的积累,孕震区介质部分裂隙闭合,挤出裂隙水,密度相对增大,品质因数提高,高频成分的衰减降低,使频谱的主频率移向高频。

针对某一地区地震的单台记录跟踪研究,将资料分析置于同等的介质差异和仪器频响下对比讨论,有利于提取其真实的频谱变化信息,对这些地球物理信息的跟踪提取,对于研究该地区地震发生机理及今后该地区地震预报的探索具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 王世一. 数字信号处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
[2] 邹鲲,袁俊泉,龚享铤. MATLAB 信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
[3] 聂士忠,王玉泰. 最大熵谱分析方法和 MATLAB 中对短记录资料的谱分析[J]. 山东师范大学学报,2005,20(3):40-41,51.
[4] 吴永刚,王建民,刘英杰. 最大熵谱分析及其在时间谱分析中的应用[J]. 大庆石油地质与开发,1993,12(1):1-7.
[5] 李文英. 最大熵谱法在华北地震活动幕式结构分析中的应用[J]. 地震,1996,16(2):121-127.
[6] 李强. 体应变最大熵谱分析在江苏及邻区中强震的预报应用[J]. 地震,1998,18(2):184-188.