

滑动 AR 谱分析与地震信息处理

韩 大 宇

(国家地震局分析预报中心)

摘 要

用滑动 AR 谱分析方法对唐山地震前后的张道口短水准资料进行了分析。AR 谱分析参数在唐山地震期间出现异常变化。自 1975 年 1 月至 1977 年 1 月左右,出现了 $T = 30$ 天左右周期,AR 模型拟合最佳阶 $P_{OP} \geq 6$,相应的 FPE 值为高值。

关键词 时间序列分析;谱分析;短水准

一、引 言

自 1966 年邢台地震以来,积累了丰富的地震观测资料。由于观测条件及影响观测资料变化因素的多样性与复杂性,如何从地震观测资料中识别真正的与地震有关的信息,是一个复杂的课题。随着各种信息处理方法引入或移植至地震领域,对地震观测资料的分析亦存在一个再认识的问题。

时间序列分析是研究随时间变化的随机数据序列的数学方法^[1]。它包括时间域分析和频率域分析两个方面。时间域分析主要对随机序列在时域上的各种平均值进行分析,而频率域分析则主要对随机序列进行谱分析。时域上的时间序列分析是七十年代以来随着计算技术发展而迅速发展的方法,近年来在地震观测资料分析中得到了应用,并取得了一定的效果^[2-4]。本文用 AR 谱分析方法,对地震观测资料同时进行时间域与频率域分析,并以张道口短水准资料为例,讨论在唐山地震前后 AR 谱分析参数的变化特征。

二、AR 谱分析方法

对于样本序列 $\{x_t\}$, $t = 1, 2, \dots, n$, P 阶自回归模型 AR(P) 为:

$$x_t = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \dots + \alpha_P x_{t-P} + a_t \quad (1)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_P$ 为 P 阶 AR 模型的系数, a_t 为残差。(1)式可改写为:

$$a_t = x_t - \alpha_1 x_{t-1} - \alpha_2 x_{t-2} - \dots - \alpha_P x_{t-P} \quad (2)$$

这种形式亦称预报误差滤波器,它的输出方差为:

$$\sigma^2 = E a_t^2 \quad (3)$$

可用 Butg 递推法求得 AR 模型的系数 $\alpha_1 \dots \alpha_P$ 与 σ^2 值^[1]。

对于长度为 n 的样本序列 $\{x_t\}$ 来说,它所适合的 AR 模型的阶数 P 是需要由样本

序列来估计的,常用 FPE 准则,即最小最终预报误差准则来选择最佳 AR 模型阶数,它以模型输出的一步预报误差方差来判定模型阶数,一步预报误差方差愈小就认为模型拟合得愈理想. FPE 准则的表达式为:

$$\text{FPE}_p = \sigma^2(n+P)/(n-P) \quad (4)$$

AR 谱亦即最大熵谱的表达式为:

$$g(\lambda) = \sigma^2 / |\alpha(e^{i2\pi\lambda})|^2 \quad (5)$$

$$\alpha(e^{i2\pi\lambda}) = 1 - \alpha_1 e^{i2\pi\lambda} - \dots - \alpha_p e^{i2\pi p\lambda} \quad (6)$$

式中

这亦是 P 阶 AR 序列的谱密度.

这种 AR 谱估计方法亦即最大熵谱估计方法,是一种非线性谱估计方法,它对资料以外的数据不作任何假设,而按最大熵原理外推自相关函数值,用一个等价的自回归模型的谱来近似原序列的谱,所以具有分辨率高、周期偏移小的突出优点.

用滑动 AR 谱分析方法探讨地震观测序列在地震前后的特征变化,对一个长的地震观测序列,以一定的滑动间隔进行分段滑动,在时间域上进行 AR 建模,可以探讨 AR 模型参数随时间变化特征,在频率域上进行 AR 谱估计,以分析地震前后的谱特征变化. 计算时选择合适的数组长度 n_1 ,适当压缩数组,如数天取一均值,组成实际数组长度 n_2 ,给定最大建模阶数 P_{\max} ,用上述的 FPE 准则判定最佳阶数 P_{op} ,得到最佳阶的 AR 模型参数,并计算得到 AR 谱. 选择合适的滑动间隔 Δm ,对每一实际数组进行上述计算,即可得到一系列的 AR 模型参数及 AR 谱.

用 FORTRAN 程序进行上述计算,在数据文件中输入相应参数 n_1 , n_2 , Δm , P_{\max} 及 IB (起算步)和 IE (终止步),即可得到一系列的 AR 谱分析参数. 其中包括 AR 模型系数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ 和最佳模型阶 P_{op} 及 FPE 值,相应的 AR 谱及它的显著周期 T .

三、结果分析

以唐山地震周围的张道口短水准资料为例,进行 AR 谱分析. 通过计算分析,探讨唐山地震前后 AR 谱分析相应参数的变化. 张道口短水准测线跨北东向白塘口西断裂,距唐山地震的震中距 $\Delta = 110\text{km}$.

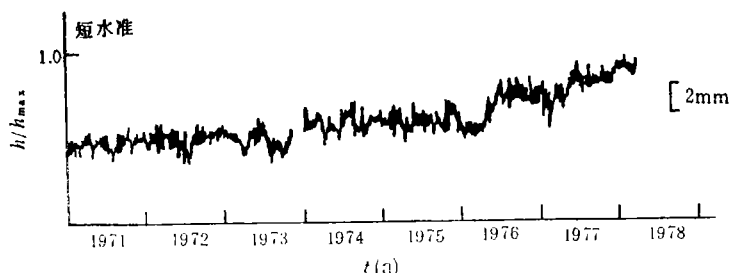


图1 张道口短水准曲线图

Curve of short-base leveling at Zhangdaokou.

1971年1月至1978年3月的张道口短水准资料示于图1. 计算时选择 $n_1 = 1000$, $n_2 = 250$, $P_{\max} = 20$. 计算结果见表1. 表中 FPE 值为最佳模型的数值, α_i 为所选模型

表 1 张道口短水准 AR 滑动建模参数
AR moving modelling parameters of Zangdaokou short-base levelling

时间段 t_1-t_2	P_{0P}	FPE	α_i
1971.2—1973.11	3	9.78	$\alpha_1 = 0.59; \alpha_2 = 0.06; \alpha_3 = 0.13$
1971.4—1974.1	3	10.16	
1971.6—1974.3	4	10.33	
1971.8—1974.5	4	10.35	
1971.10—1974.7	3	12.75	
1971.12—1974.9	3	14.15	$\alpha_1 = 0.61; \alpha_2 = 0.06; \alpha_3 = 0.22$
1972.2—1974.11	3	14.99	
1972.4—1975.1	3	14.49	
1972.6—1975.3	6	13.96	
1972.8—1975.5	6	13.55	
1972.10—1975.7	6	14.11	$\alpha_1 = 0.63; \alpha_2 = 0.08; \alpha_3 = 0.17;$ $\alpha_4 = -0.09; \alpha_5 = -0.05; \alpha_6 = 0.16$
1972.12—1975.9	6	14.34	
1973.2—1975.11	6	14.94	
1973.4—1976.1	8	14.86	
1973.6—1976.3	6	14.38	
1973.8—1976.5	6	14.43	$\alpha_1 = 0.62; \alpha_2 = 0.12; \alpha_3 = 0.16;$ $\alpha_4 = -0.11; \alpha_5 = -0.02; \alpha_6 = 0.16$
1973.10—1976.7	6	15.39	
1973.12—1976.9	6	15.94	
1974.2—1976.11	6	15.54	
1974.4—1977.1	6	15.89	
1974.6—1977.3	7	16.86	$\alpha_1 = 0.71; \alpha_2 = 0.24$
1974.8—1977.5	3	15.27	
1974.10—1977.7	2	13.95	
1974.12—1977.8	2	13.19	
1975.2—1977.10	2	12.69	
1975.4—1977.12	2	12.66	
1975.6—1978.2	4	11.89	

系数。为简明起见，每年仅列出一个 AR 模型的系数。

对张道口短水准资料的计算结果表明，AR 拟合模型的最佳阶数 P 不大于 10。以 1974 年 2 月—1976 年 11 月时段为例，模型最佳阶数 $P_{0P} = 6$ ，FPE 曲线在 $P_{0P} = 6$ 时出现低值（图 2）。每一时段通过计算都可得一最佳 AR 拟合模型。表 1 所列模型参数

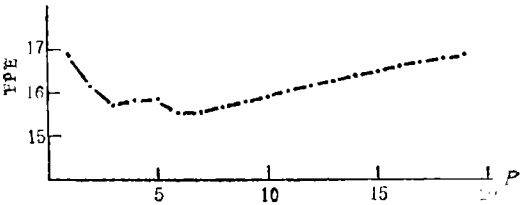


图 2 FPE 曲线
FPE Curve.

表明它们随时间的变化情况。FPE 值的大小反映了 AR 模型拟合的优劣情况。自 1974 年 9 月至 1977 年 6 月 FPE 值处于高值,此段期间 AR 最佳模型的阶数基本是 $P_{0P} \geq 6$ 。FPE 值随时间变化情况示于图 3。图中点的位置相应数组长度的尾部。若取同阶模型,则 FPE 值变化趋势类同。在一段期间 FPE 值普遍增大,反映了 AR 模型拟合情况的差别,表示了此段期间数据序列的统计特征有变化。

自 1971 年初至 1978 年 2 月,共计算了 27 个 AR 谱。 n_1 仍取 1000 天,滑动间隔 $\Delta m = 60$ 天。各时段显著周期 T 随时间变化情况示于图 4。图中纵坐标为显著周期 T ,横坐标为时间,点的位置相应数组长度的尾部。计算结果表明,直至 1974 年 5 月止,AR 谱的显著周期为 $T = 21$ 天和 $T = 10$ 天。自 1974 年 7 月左右开始 $T = 21$ 天基本消

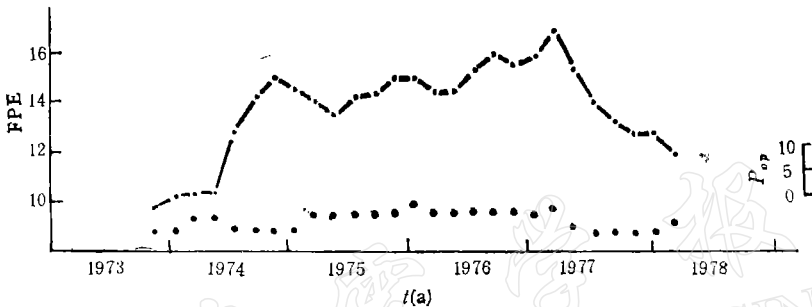


图 3 张道口短水准 P_{0P} 及 FPE 值随时间变化图

Time Changes of P_{0P} and FPE for Zangdaokou short-base leveling.

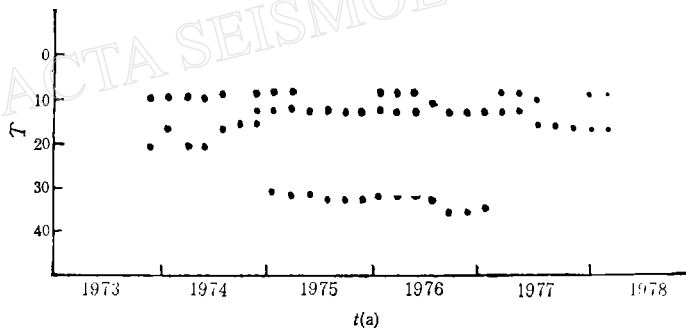


图 4 AR 谱显著周期随时间变化图

Time variation of distinct periods in AR spectra.

失,开始出现 $T = 16-17$ 天周期。而自 1975 年 1 月左右开始稳定出现 $T = 31-33$ 天及 $T = 13$ 天周期,这种情况持续至 1976 年 7 月。此后 $T = 30$ 天左右周期缓变为 $T = 35-36$ 天周期,直至 1977 年 1 月左右。而自 1977 年 3 月开始 $T = 30$ 天左右周期完全消失,但 $T = 13$ 天周期仍然存在。自 1977 年开始, $T = 13$ 天周期消失,出现 $T = 16-17$ 天周期,与唐山地震前 1974 年 7 月前后的周期相同。张道口短水准的 AR 谱示于图 5,图中分别展示了特征时段的 AR 谱图。其中图 5(a) 给出 1974 年前至 1976 年初期间的某些特征时段的 AR 谱。谱值曲线表明,1972 年 10 月—1975 年 7 月时段的 AR 谱与 1971 年 10 月—1974 年 7 月时段的 AR 谱明显不同,出现明显的 $T = 33$ 天及 $T = 13$ 天周期。1973 年 4 月—1976 年 1 月时段的 AR 谱形态与上一时段的谱形态基

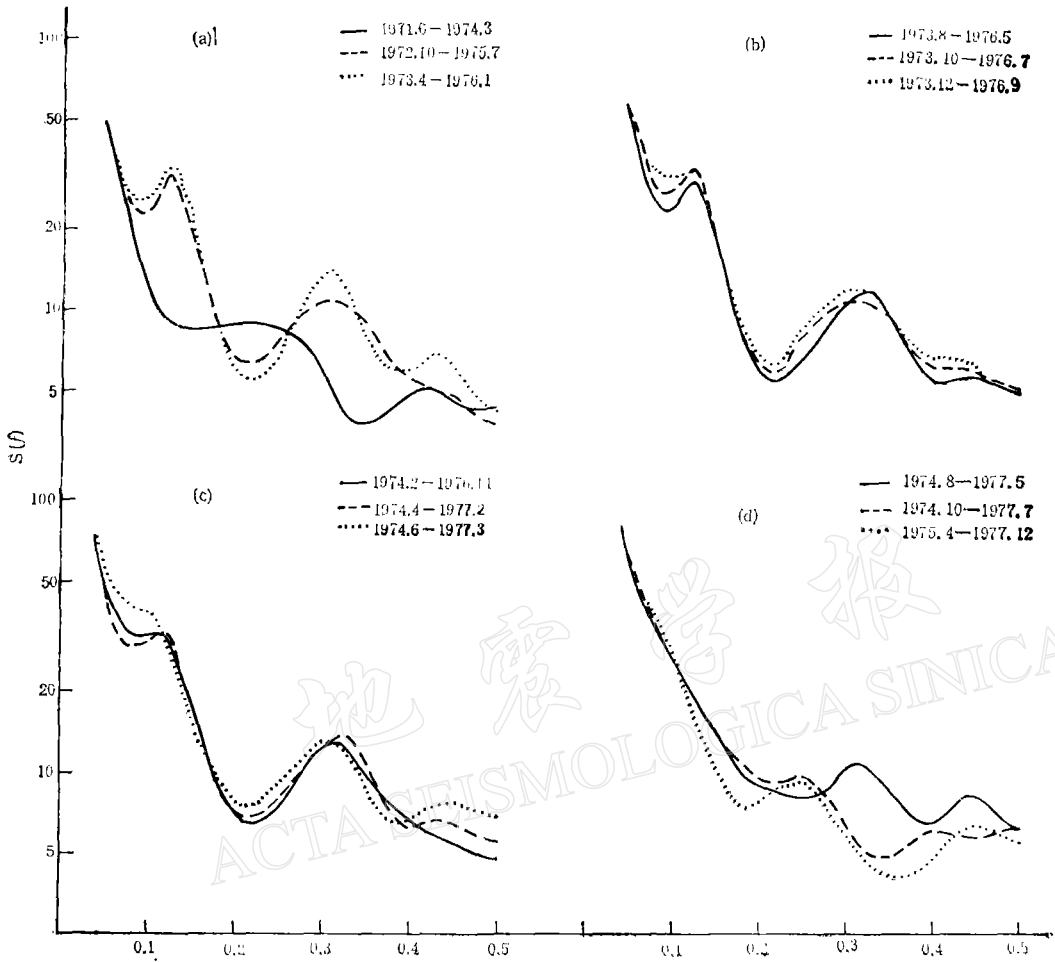


图 5 张道口短水准特征时段的 AR 谱
AR spectra of characteristic periods.

本类似。图 5(b) 为 1976 年 7 月 28 日唐山主震前后相应时段的 AR 谱曲线。谱曲线基本形态相互类似， $T = 30$ 天左右周期略有偏移。图 5(c) 的三个特征时段分别相应 1976 年 11 月 15 日宁河 $M_s = 6.9$ 地震前后的 AR 谱曲线。其中 1974 年 2 月—1976 年 11 月与 1974 年 4 月—1977 年 1 月时段仍保留有 $T = 30$ 天左右周期，而在 1974 年 6 月—1977 年 3 月时段时，该周期开始消失。图 5(d) 为 1977 年 5 月以后特征时段的 AR 谱曲线，此时 $T = 30$ 天左右的周期已经消失。在 1974 年 8 月—1977 年 5 月时段，尚存在 $T = 13$ 天左右周期，而在 1974 年 10 月—1977 年 7 月时则出现 $T = 16-17$ 天周期。

上述结果分析仅进行至 1978 年初。应该指出，对张道口短水准进行的分析，实际上延伸至 1979 年底，但由于原始资料在 1978 年以后缓慢上升，在某种程度上影响处理结果的质量，所以在相应图件中未予以表示，但由于 AR 建模所选时间段较长，计算结果仍有一定的参考价值。自 1975 年 8 月—1978 年 4 月时段开始直至 1977 年 3 月—1979 年 12

月时段结束,共计 11 个时段,AR 谱分析结果表明,仍不存在地震前后时期的 $T = 30$ 天以上周期,而主要周期稳定在 $T = 17-18$ 天,与 1977 年底及 1978 年初所反映的周期基本类似.与此同时,模型最佳阶 $P_{0P} \leq 4$,而 FPE 值相应为低值.由此可见,1978 年初直至 1979 年底,相应时段的 AR 谱分析结果仍符合所分析的震后参数特征.

综上所述,AR 谱分析参数在唐山地震前后出现了某些异常变化,其特征表现为自 1975 年 1 月左右至 1977 年 1 月左右出现 $T = 30$ 天以上周期,而在此期间发生了 1976 年 7 月 28 日的唐山主震及 11 月 15 日宁河 6.9 级地震,后者距张道口更近.相应的 AR 模型拟合最佳阶 $P_{0P} \geq 6$,反映 AR 模型拟合优劣的 FPE 值为高值.若将这段时期称为异常变化段,则在此段两端尚可能存在一过渡变化段,表现在 1974 年左右出现 $T = 16-17$ 天的周期,相应的 FPE 值增大,及震后 $T = 13$ 天左右转为 $T = 16$ 天左右和 FPE 值的减小变化段.

四、讨 论

唐山地震前后的大量观测资料表明,地震孕育与发生过程的异常特征在观测数据中有反映.唐山地震孕育与发生过程的复杂性造成了观测数据动态类型与异常反映特征的复杂性.在某些观测资料中,地震前后的异常变化可能直观一些,而在某些资料中反映并不明显.张道口短水准资料虽然在震前数月的短期变化明显,但直观地分析长期变化中的统计特征变化是困难的.用 AR 谱分析方法可以在某种程度上揭示数据时间序列的统计特征变化.

通过滑动 AR 谱分析,得到相应的 AR 建模 P_{0P} 和 FPE 参数及 AR 谱的显著周期参数随时间变化特征.对张道口短水准序列分析结果表明,存在两个明显的转折变化时段,其一位于唐山地震前的 1974 年底及 1975 年初;另一变化时段位于震后的 1977 年.看来这种现象不是偶然的.谱分析的显著周期在 10 至 30 天上下变化,并且在地震期间出现某些特殊的谱周期成份.在唐山地震前后 9 年的数据序列中,这种数十天的周期变化近似于一种短周期的“脉动”.其引起原因尚待进一步探讨.短水准资料数十天的周期变化可能与降雨等环境因素有关.文献[2]曾提及日本的地形变资料受 20—50 天范围的降雨周期变化影响,但仅降雨因素仍不能说明,为什么在地震释放期的前后发生了 AR 谱分析参数的变化.看来,这种变化尚可能与地震期间的断层活动特征及与断层附近的介质条件如孔隙度等因素的变化有关.

参 考 文 献

- [1] 安鸿志、陈兆国、杜金观、潘一民,时间序列的分析与应用,247—264,科学出版社,1983.
- [2] 橘爪道郎、三雲健,地殻変動観測データの多変量解析——ARIMA モデルによる予測の試み——,地震,36, 515—530,1983.
- [3] 韩大宇、安鸿志、顾岚,用疏系数混合回归建模方法分析地震前后形变资料,中国地震,1,67—73,1985.
- [4] 韩大宇,时间序列建模与地震信息处理,地震,1985,5: 38—42.

MOVING AR SPECTRUM ANALYSIS AND EARTHQUAKE INFORMATION PROCESSING

HAN DAYU

(Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau)

Abstract

The short-base levelling data at Zhangdaou is analysed by the moving AR spectrum analysis. There are some anomalous changes of AR spectrum parameters during the Tangshan earthquake. The period is about $T=30$ days appearing from January 1975 till January 1977, meanwhile the optimum order of AR model fitting $P_{op} \geq 6$, the corresponding FPE value is high.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA