

# 基于波形相关性的地震事件分类

魏富胜 许忠淮 郭祥云

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 讨论了地震波形相似性的定量描述手段,计算了长白山及附近地区 2004 年发生的 20 个较小地震事件的地震波形相关系数,探讨了波形相关性与震源类型的关系。

**关键词** 相关系数;波形相关性;地震识别;震源类型

## 0 引言

我国地震观测数字化体系建设为地震事件观测和震源特征研究建立了可靠的基础,为快速开展地震记录的深入分析提供了便利。我们在阅读数字地震记录波形时,发现在某些地区有些地震波记录的波形形态极为相似(如图 1、图 2 所示)。为了定量描述这一现象,我们开展了地震波形的相关性分析,以获取更多的震源信息和事件类型描述方法。

2004 年 9 月 8 日发生在我国吉林省东部的地震以及 3 天后发生在朝鲜北部“为了建水电站而计划好的炸山行动”人工爆破,原本不属于同一类型的地动事件,曾被国外某些媒体的“蘑菇云”嫁接式报道,引发“疑核”的国际关注。

利用我国长白山地区、丹东地区的数字化地震观测台站记录波形,对附近地区 2004 年 6—10 月期间发生的 20 个较小地震事件,开展了波形相关性分析,积累了该地区小事件震源类型的观测资料。

## 1 用相关系数定量描述地震波形的相似性

相关系数(数学手册编写组,1979)反映了两个变量  $x, y$  之间的线性关系的密切程度,定义为

$$R_{xy} = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}l_{yy}}} \quad (1)$$

对离散变量,式中  $l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ,  $l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ,  $l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ ,  
 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

当  $|R|=1$  时,称为完全线性相关;当  $|R|=0$  时,称全无线性相关;  $|R|$  越接近 1,线性相关

越大。当相关系数 $|R|$ 大于某一起码值时,所谓线性才有意义。该值与观测次数或采样点 $n$ 及所给可信度有关。采样点越多,由于影响相关性的因素随之增多,故 $R$ 的起码值也较小。

我们使用互相关系数 $R$ 定量描述两个波形的相似性。取值从0(不相似)到1(完全相似),即表示两个地震波形的完全无关或完全一致。

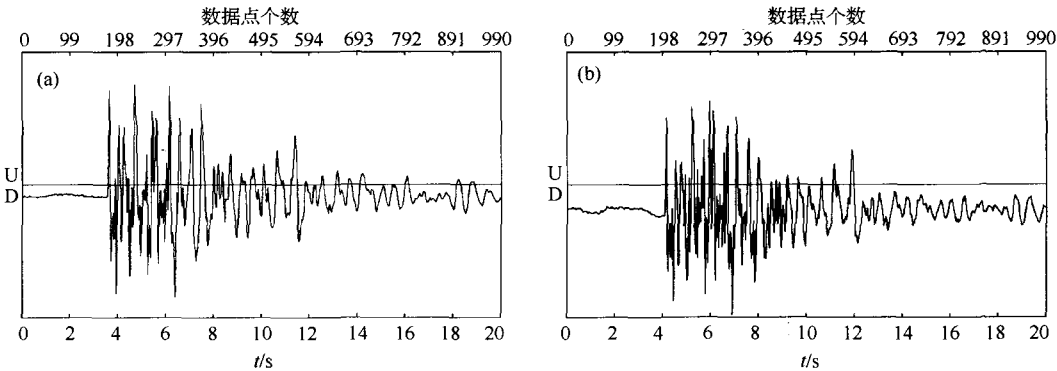


图 1 长白山地震台宽频带地震仪记录的 2 次地震事件的速度型垂直向波形  
(a) 表 1 中 07 号事件;(b) 表 1 中 08 号事件 (震中距约 1 km,采样率 50 点/s,时间窗长度 20 s)  
Fig. 1 Vertical component ground velocity waveforms of 2 earthquakes recorded by a broadband seismograph at Changbaishan Seismic Station

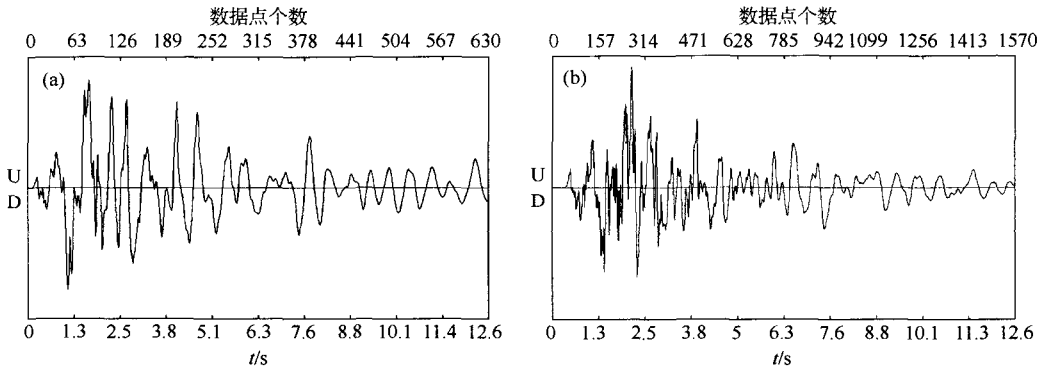


图 2 两次长白山火山地震的速度型垂直向记录波形(时间窗 12.6 s)  
(a)长白山台记录的 2004-09-08T22:24:13.4,42.11°N,127.51°E,3.5 级地震(表 1 中 12 号事件)(采样率 50 点/s);  
(b)火山地震观测台记录的 2003-07-24T17:54:23.04,42.02°N,128.06°E,2.5 级地震(采样率 125 点/s)  
Fig. 2 Vertical component ground velocity waveforms of 2 volcanic earthquakes

同一台站,如果记录到在相近地点不同地震事件的相似地震图,那么就说它们是重复性地震事件(repeating seismic events)。两个事件称为**双震(doublets)**,重复性地震的成簇现象称为多重震(multiplets),无疑它们具有相同或相似的**震源机制**和相近的发震位置。通过观测波形的相关性分析,我们将会看到 2004 年 9 月靠近中朝边境的长白山火山地区的地震群就具有这种相关特征。

每个事件的震源位置,震级大小,震源机制各不相同,不可能向震源周围辐射出完全一致的地震波,即便同一断层上的两次间隔很近的震源错动亦如此。不同的地震台站对同一事件的观测方位及距离不同,由于地震波传播路径上非均匀地球介质复杂结构产生反射折射散射的辐射波及其叠加,对地震波的传播影响也不同。还有,即便是相同类型的记录仪器也不会产

出相同的波形记录。因此,从认识两个震源相似性的角度而言,分析整个波列的相关性远不如对地震波的初始 P 波段进行相关性分析具有意义和有效。地震初至 P 波携带着震源的信息纯净地最早出现在记录图上,没有受到其他震相的干扰,是反映震源性质的优选震相。S 波携带着震源释放的大部分地震波能量,但介质对其影响也增大。因此我们使用了记录波形的初至震相 P 波段,也兼顾到 S 波段的较大振幅。为了统一比较条件,对中朝边境地区的事件大都使用了初至 P 波约前 2 个周期的波段进行波形相关性分析。图 4 是图 3 所示波段的互相关函数。

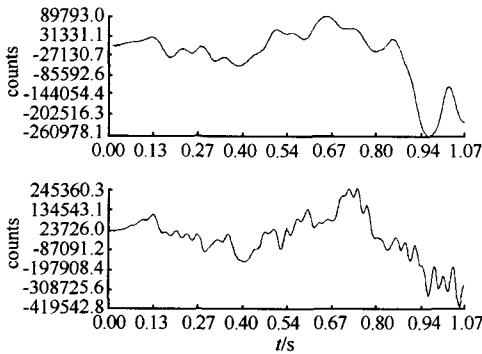


图 3 图 2 中所示 2 个地震波形实施相关分析截取的初始波段  
(CBS 台采样率 50 点/s, HRS 台采样率 125 点/s, 经插值后都统一到 250 点/s)

Fig. 3 Initial part of the wave records, displayed in Fig. 2, selected for correlation analysis

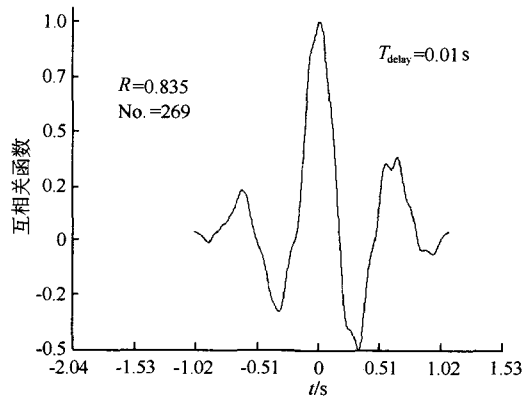


图 4 图 3 中波形的互相关函数计算  
(波形延迟时移为 0.01 s 时,两波形相关性最好,此时相关系数为 0.835)

Fig. 4 Calculated correlation function for the 2 wave records displayed in Fig. 3

一般地,两个数字化波形  $a$ 、 $b$  的离散相关函数定义为

$$C(a, b)_j = \sum_{k=0}^{n-1} a_{j+k} b_k \quad (2)$$

由于它满足离散相关定理,分别计算它们的傅氏(Fourier)变换  $\{a_j\} \leftrightarrow \{A_k\}$ 、 $\{b_j\} \leftrightarrow \{B_k\}$ ;由  $A_k B_k^*$  的傅氏逆变换得到相关函数  $C(a, b)_j$ ,其中  $*$  表示复共轭。我们如此设计软件的计算方式是考虑到其执行效率高,尤其当  $n$  较大时。如同在褶积中的情况,还要考虑信号末端及有限长的影响。得到的互相关函数在正负延迟两个方向上给出  $a$ 、 $b$  两波形的相关性,以及最大相关的位置。软件可以给出两信号间最大相关位置的时移值,确定两个信号间的到时差,例如在相对定位或读取震相走时时就显得很方便实用了。

## 2 2004 年长白山附近地区地震事件的相关性

对于 2004 年 9 月引起广泛关注的长白山火山地震群以及附近的“工程爆破”事件,我国的长白山地震台具有近距离观测优势,波形记录质量良好。而辽宁数字地震台网及丹东地震台网台站由于距离相对较远,信号幅度小,大部分记录波形的信噪比相对较差,给较小事件的波形利用造成困难。为了尽可能利用现有波形资料,在已观测到的波形数据中,宽容地使用了该地区 20 个地震与爆破事件的波形记录。由于事件较小,有观测记录的台站也少,观测台站甚至没能给出事件的宏观参数。表 1 列出了本文分析使用的事件目录。虽然有的事件小得还没有被编进台站观测的“地震目录”,但作为地震观测研究仍不失为难得的好资料,故纳入本文分析目标事件的目录表中(表 1)。

为了尽可能减少地震波传播路径和记录过程环节的差异对计算结果的影响,突出源的效应,应选取具有一致或相近条件的传播路径和记录仪器的资料。因此,统一使用了吉林省长白山地震台的记录波形。表中采用了长白山地震台记录波形的事件文件命名。

作为补充和对比,也分析了辽宁省丹东地震台网 4 个台站的记录波形。

表 1 长白山地震台观测事件目录  
Table 1 Event list obtained from seismic observations at Changbaishan Seismic Station

事件序号	时间	$\varphi$ N/°	$\lambda$ E/°	震级	地点	性质
01	2004-06-07T01:23:51			1.9		地震
02	2004-06-07T02:30:07			2.5		地震
03	2004-06-07T15:05:57					
04	2004-06-09T17:39					
05	2004-06-23T03:44					
06	2004-07-11T19:56					
07	2004-07-11T20:05					
08	2004-07-11T20:19					
09	2004-07-11T20:22					
10	2004-07-11T20:43					
11	2004-08-15T23:38					
12	2004-09-08T22:24:13.4	42.11	127.51	3.5	吉林抚松县	地震
13	2004-09-08T22:29:03			2.1		地震
14	2004-09-09T00:19					
15	2004-09-09T00:29					
16	2004-09-09T00:29:33					
17	2004-09-10T20:03:43					
18	2004-09-11T14:28:32.3	41.40	126.58	2.2	朝鲜中江	爆破
19	2004-10-31T15:17:33.8	39.85	124.60	1.4	朝鲜盐州	爆破
20	2004-10-31T16:21:47.4	39.87	124.57	1.3	朝鲜盐州	爆破

为了减少人为因素对计算结果可能造成的影响,尽可能减少中间计算环节,本次计算统一使用了台站原始记录的速度型垂直向波形数据,开展该地区事件波形的相关性分析,为认识区域性小地震事件的波形相关性规律以及分析小事件的震源类型进行尝试。分析的 20 个事件的记录波列采样点数都在 256 以上,保证了表 2 中的相关分析置信区间的最低值要求。

表 2 20 个事件波形的互相关系数(R)  
Table 2 Cross-correlation coefficient of the waveforms from 20 seismic events listed

事件编号	时间	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
01	2004-06-07T01:23:51	71	86	25	31	12	11	11	07	02	09	20	18	09	07	00	47	11		
02	2004-06-07T02:30:07		72	48	34	20	07	13	12	15	00	32	34	17	12	01	48	02		
03	2004-06-07T15:05:57			69	67	73	18	81	25	14	08	58	61	10	06	34	70	08		
04	2004-06-09T17:39				81	71	78	74	78	73	23	38	71	14	51	58	34	03		
05	2004-06-23T03:44					83	87	85	84	77	08	28	45	09	17	44	32	05		
06	2004-07-11T19:56						92	81	85	86	11	47	00	19	17	08	09	02		
07	2004-07-11T20:05							92	74	93	03	15	04	08	09	15	02	11		
08	2004-07-11T20:19								69	91	04	37	14	00	10	07	24	10		
09	2004-07-11T20:22									69	05	24	04	03	08	03	04	17		
10	2004-07-11T20:43										04	27	08	02	16	12	06	12		
11	2004-08-15T23:38											25	45	01	08	10	05	04		
12	2004-09-08T22:23:42												71	43	46	51	03	14		
13	2004-09-08T22:29:03													49	54	52	29	01		
14	2004-09-09T00:19														77	77	13	01		
15	2004-09-09T00:29															99	34	24		
16	2004-09-09T00:29:33																36	00		
17	2004-09-10T20:03:43																	08		
18	2004-09-11T14:28																			
19	2004-10-31T15:17:33																			
20	2004-10-31T16:21:47																			

注:表头中数字为事件编号,其对应数值为 R 的 100 倍

计算了表 1 所列 20 个地震事件的长白山台速度型垂直向记录波形的互相关系数,结果列于表 2。可以看出,发生在长白山及附近地区的这一群小地震之间,承载着某种机制关联性。震群的每一次地震活动至少有一个同类“伙伴”与之“相呼应”,其相关系数都在 0.7 以上。它提示我们应该寻找更加恰当有效的分析方法以揭示它们之间的关联因素及内在联系。

第 4、5、6、7、8、9、10 号地震的相关系数表明,有理由将它们称之为一簇多重震,它们应该具有相近的震源机制。而分别把 1、2 号事件,15、16 号事件视为双震也是非常合适的。

前 18 次事件中,11、18 号 2 个事件与其余的事件之间的相关系数都低于 0.5,据此可以认为,11、18 号 2 个事件与另外 16 个事件不具有关联性。因为我们已经知道 18 号事件是一次朝鲜工程爆破,1、2、12、13 号等事件是天然地震,应该能够推断另 16 次事件与天然地震同类,而 11 号事件与这 16 次天然地震相关性较低,不属同一类型。

如果在某地区利用与已知事件(地震或爆炸)的相关性能够判断出新近发生事件的类属关系,那将是一个很诱人的事情。因为据此可以判定新事件属性。但有趣的是,11、18 号 2 个事件间的相关系数仅为 0.04,表明它们不相关。Schaff (2004)用类似的研究方法也得到了相同的认识;20 世纪 90 年代中国罗布泊相距 100 m 的两次爆炸的相关系数并不高,都不是“双震”。这一现象将使我们的研究引向深入。

地震有断层失稳加速运动的构造地震,地下岩浆运动引发的火山地震,以及地层坍塌造成的塌陷地震等分类。爆炸也有化学爆炸与核爆炸等种类。各种量级的各类事件激发的地震波之间的关联程度,表征在定量化的相关系数上的规律,是值得我们下一步研究的课题。希望它能为认识震源分类提供有益的信息。

对于这些小地震,除 2004 年 9 月 11 日(18 号事件)朝鲜爆破的震中距大于 100 km 外,长白山地震台的震中距大都在 1 km 多,而辽宁台网的距离相对较远,因此不宜分析辽宁台网台站与长白山地震台之间的波形相关性。我们仅对丹东台网的 4 个台站记录的 2004 年 10 月 31 日朝鲜盐州的 2 次爆破间的速度型地震波记录计算了相关系数,结果列于表 3。由表

表 3 丹东台网台站记录 19、20 号事件的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients deduced from waveforms of the No. 19 and No. 20 event recorded at Dandong network stations

事件 19	事件 20			
	台站 1	台站 2	台站 3	台站 4
台站 1	0.83	0.09	0.10	0.10
台站 2	0.09	0.85	0.08	0.04
台站 3	0.06	0.01	0.86	0.11
台站 4	0.04	0.04	0.08	0.95

可见,两次小爆破间的互相关系数,在同一台站显示出很高的相关性,而不同台站之间却很小。这说明对于该地区的小爆破事件,考察同一台站上的地震波相关性才有意义,不同台站间的相关性很弱,可比性也小。这也表明,在考察该地区的波形相关性时,我们采用同一个长白山地震台的观测数据作对比分析是正确和合理的做法。

3 结论

(1)本文利用同一台站地震波形间的相关系数反映相近地区较小事件的震源类型特征,分析简明,方法有效,为利用事件间的相关系数研究震源差异积累了有价值的尝试。

(2)考察相近地区不同事件间的相关系数,应使用同一台站的记录作对比。以更大地突出震源因素,消除非震源的其他影响,提高分析手段的有效性。

(3)相关系数的取值能够反映出不同地震事件震源间的类型差异。这有望为区别天然地

震与人工爆炸提供一种新手段,值得深入探索。

以上初步结果表明,利用波形的相关性能够标志地震间的类型关系,同时也显示出地震与爆炸的不相关性。但只有深入探索,才能获取更加明确的信息。

吴建平研究员提供了长白山火山地震观测记录的事件波形,丹东地震台提供了记录资料,在此一并致谢。

#### 参考文献

- 蒋长胜,吴忠良,李宇彤. 首都圈地区重复地震及其在区域地震台网定位精度评价中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3):817-825.
- 数学手册编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 1979:837-838.
- 魏富胜. 识别震源性质的一种新方法[J]. 地震地磁观测与研究, 2000, 21(6):32-38.
- Wei Fusheng, Li Ming. Cepstrum analysis of seismic source characteristics[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 16(1): 50-58.
- 魏富胜,黎明. 震源性质的倒谱分析[J]. 地震学报, 2002, 25(1):47-54.
- David P Schaff and Richards G. Repeating seismic events in China[J]. Science, 2004, 303(5 661):1 176-1 178.

## Classification of seismic events based on waveform correlation analysis

We Fusheng, Xu Zhonghuai and Guo Xiangyun

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

#### Abstract

Quantitative description of waveform similarity of seismic events is discussed. This study has calculated waveform correlation coefficients of 20 small seismic events, which occurred in 2004 in Changbaishan and nearby region, and recorded by the Changbaishan Seismic Station in China. The relation between waveform correlation and seismic source type is explored.

**Key words:** correlation coefficients, waveform correlation, seismic distinguish, seismic source type