

王红春, 靳平, 何燕. 基于三分向台站波形的重复地下爆炸相关检测. 地球物理学报, 2012, 55(3): 937-943, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.023.

Wang H C, Jin P, He Y. Cross-correlation detection of repeating underground explosions using three-component stations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 937-943, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.023.

基于三分向台站波形的重复地下爆炸相关检测

王红春^{1,2}, 靳平^{1*}, 何燕¹

1 西北核技术研究所, 西安 710024

2 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

摘 要 在将相关检测方法应用于三分向台站记录数据时不能采用台阵数据检测时所使用的基于相关系数慢度估计的虚假触发筛查方法来控制误检测. 为此, 本文根据重复事件的震中位置本身固定, 各台站记录到的重复事件信号之间的到时差与相应参考事件的信号到时差基本相同的特性, 根据两个以上三分向台站的相关检测触发到时差筛查相关检测虚假触发, 从而解决了相关检测方法在应用于三分向台站数据时虚假触发过多的问题. 利用新疆的三个三分向台站一个月的连续数据对该方法进行测试的结果表明, 该方法能在接近零误检率的情况下对重复地下爆炸进行检测.

关键词 三分向台站, 重复地下爆炸, 相关检测

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.03.023

中图分类号 P315

收稿日期 2011-11-29, 2011-12-06 收修定稿

Cross-correlation detection of repeating underground explosions using three-component stations

WANG Hong-Chun^{1,2}, JIN Ping^{1*}, HE Yan¹

1 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

2 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract The false detection can't be eliminated with the slowness estimation method of the array data cross-correlation detection when the detection method is applied to three-component station records. Due to the fixed epicenter of the repeated events, the arrival time differences of repeated events between different stations are equal to that of the template event. The false detections are screened out based on the triggering time difference conditions of template event between different three-component stations. This cross-correlation detection method overcomes the problem of high false-alarm rate for the detection of three-component station records. We have tested this method with mining blasts in Qitai County, Xinjiang, China using continuous records of three 3-component stations. The results obtained show that very high detection rate for blasts close to the template event can be achieved without false alarming.

Keywords Three-component station, Repeating underground explosion, Cross-correlation detection

基金项目 禁核试核查国防预先研究项目(513310101-1)资助.

作者简介 王红春, 男, 1979 生, 2005 年硕士毕业于西北核技术研究所, 中国科学技术大学在读博士研究生. 现主要从事地震信号检测、理论地震图计算、震源机制反演及地震事件识别等方面的研究工作. E-mail: wangustc@mail.ustc.edu.cn

* 通讯作者 靳平, E-mail: jinpings6608@tom.com

1 引言

相关检测方法是一种类似于匹配滤波器的信号检测方法^[1]. 该方法利用已知波形作模板信号, 通过计算波形数据与模板信号之间的相关系数来实现重复信号检测. Gibbons 等将相关检测方法应用于台阵数据并利用信号比例压缩加噪的方法验证了相关检测对低信噪比重复信号的检测能力^[2]. Schaff 的研究结果表明将相关系数检测方法应用于中国的地震活动监测时, 相应的检测震级可以降低 1 个震级单位^[3-4]. 同时相关检测方法还可用于地震信号到时的准确测量^[5-7], 地下爆炸事件的识别^[8]及地下爆炸信号的检测^[9], 利用相关检测得到的重复地震事件还可用于台网定位能力的评估^[10].

相关检测方法在对重复信号有极强检测能力的同时还能保持极低的误检率. Gibbons 研究小组利用 2005 年挪威的一次地震作为参考事件对 NORSAR 台阵 2005 年全年数据进行相关检测并得到了 32 个检测结果, 其中只有两次检测是误检测^[11]. Schaff 对相关检测的检测能力进行的半经验统计也证实了相关检测方法在极低误检率的情况下仍然具有极强的检测能力^[12]. 虽然相关检测在进行重复信号的检测时具有很低的误检率, 但这要在检测阈值较大的情况下才能保证, 这对信号之间的相似性要求较高. 由于信号之间的相似性会随震源距离的增大而迅速减小^[13-14], 并且对于爆炸方式差异较大的工业爆炸, 信号之间的相似程度会进一步降低. 为了实现对工业爆炸进行相关检测就必须降低检测阈值, 而降低检测阈值将会使检测触发数迅速增加. 虽然利用台阵数据通过对相关系数的慢度进行估计可以排除绝大多数的虚假触发, 但将相关检测应用于三分向台站时, 由于利用单个三分向台站的相关系数并不能进行慢度的估计, 因此必须利用其他条件对相关系数的检测触发进行筛查.

本文将相关检测方法应用于三分向台站连续数据中重复爆炸事件的检测. 为了消除低触发阈值带来的大量虚假检测, 本文介绍了一种利用两个以上三分向台站检测触发时刻关联来减少误检测的方法. 利用该方法对新疆地区的 MUL、BLK 和 HS31 三个三分向台站 2008 年 4 月共 30 天的连续波形数

据进行检测并对检测结果进行分析讨论.

2 基于三分向台站的相关检测基本原理

假设有两个信号 $w(t), v(t)$, 定义它们窗长为 L 的内积为

$$\langle w(t_w), v(t_v) \rangle_L = \int_0^L w(t_w + \tau) v(t_v + \tau) d\tau, \quad (1)$$

对于采样周期为 Δt 的离散系列, 窗长为 L 的内积定义为

$$\langle w(t_w), v(t_v) \rangle_{N, \Delta t} = \sum_{k=0}^{N-1} w(t_w + k\Delta t) v(t_v + k\Delta t), \quad N = \text{round}(L/\Delta t), \quad (2)$$

相应的归一化相关系数定义为

$$C[\langle w(t_w), v(t_v) \rangle_{N, \Delta t}] = \frac{\langle w(t_w), v(t_v) \rangle_{N, \Delta t}}{\sqrt{\langle w(t_w), w(t_w) \rangle_{N, \Delta t} \langle v(t_v), v(t_v) \rangle_{N, \Delta t}}}, \quad (3)$$

相关系数 C 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当

$$v(t_v)_{N, \Delta t} = \alpha w(t_w)_{N, \Delta t} \quad (4)$$

时, 相关系数取得极限值 1 或 -1, 符号取决于系数 α 的符号. 假设 t 时刻台站的记录信号是之前某一时刻 t_r 记录信号的重复, 则 t_r 处的信号与 t 时刻处的信号之间的相关系数将达到最大值, 而时间 t 前的噪声由于与 t_r 处的信号之间的相关性较差, 相关系数将取较小值, 这样就会将 t 处的信号凸现出来. 在理想情况下, 如果信号与噪声完全不相关并且噪声与噪声之间也完全不相关, 则即使信号本身的信噪比趋于零也能将信号凸现出来.

根据两个以上有一定张角的三分向台站的相关检测结果, 可以对触发检测是否为与参考信号具有相同震中位置事件的信号进行判断, 从而排除大量的虚假触发. 假设参考事件在台站 1 和台站 2 上的信号到时分别为 t_1^M, t_2^M , 定义两台站上的信号到时差为 $\Delta t_{12}^M = t_1^M - t_2^M$. 利用参考事件的信号作为模板信号, 对相应台站的记录数据进行相关检测, 假设两个台站的相关系数分别在时间 t_1^D 和 t_2^D 处各有一次检测触发, 它们的到时差为 $\Delta t_{12}^D = t_1^D - t_2^D$. 如果 $\Delta t_{12}^D \approx \Delta t_{12}^M$, 则检测事件有可能与参考事件具有相同的震中位置, 如果参与相关检测的三分向台站越多, 到时差约束越多, 检测事件的误检率就越低.

3 事件检测

为了验证基于三分向台站波形的相关检测对实际数据的检测效果,本文利用位于新疆的三个三分向台站的波形数据采用相关检测方法对新疆维吾尔自治区奇台县东北部一个矿山的重复小当量工业爆破进行检测.从新疆地震局目录中选取了该地区位置比较集中的 25 次疑爆事件(见附录表 1),这 25 次疑爆中震级最大的为 M_L 2.7 级,最小的为 M_L 1.4. 为了确定这 25 次爆破之间的相对位置,本文利用相对定位^[15]方法对各次疑爆进行了相对定位.为了使相对定位的台站对矿区有尽可能好的方位角包围,

本文还使用了 GAZ、TCH、QHE 和 BTS 等部分台站的波形信号进行相对定位.图 1 为这 25 次疑爆事件及本文使用的检测台站和用于辅助相对定位台站的位置分布.图中还用局部放大图给出了相对定位后各次事件的相对位置分布情况,图中圆圈的半径为 1.0 km.相对定位的参考事件为附录表 1 中 04-29 日 2.7 级的疑爆.从疑爆事件的相对定位结果可以看出这些疑爆事件主要集中在三个地区,说明该矿山主要有三个作业点,其中两个作业点上的爆破位置比较集中.本文以分布在局部放大图中原点附近的 8 次爆破作为相关检测的对象.

以附录表 1 中 2008-04-29 18:26:43.0 震级为 2.7 级的事件作为相关检测的参考事件.图 2a 是该

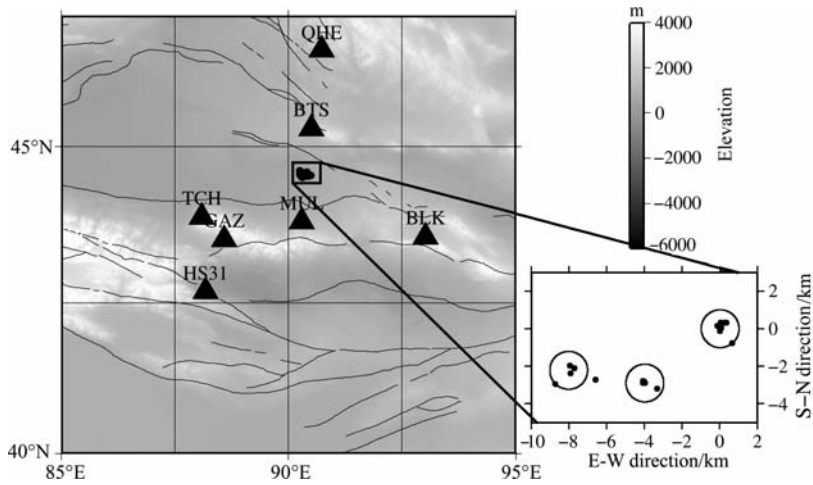


图 1 奇台矿山爆破及台站的位置分布图,图中圆圈的半径为 1 km

Fig. 1 Location illustration of Qitai mining explosions and stations. The radius of the circle in figure is 1 kilometer

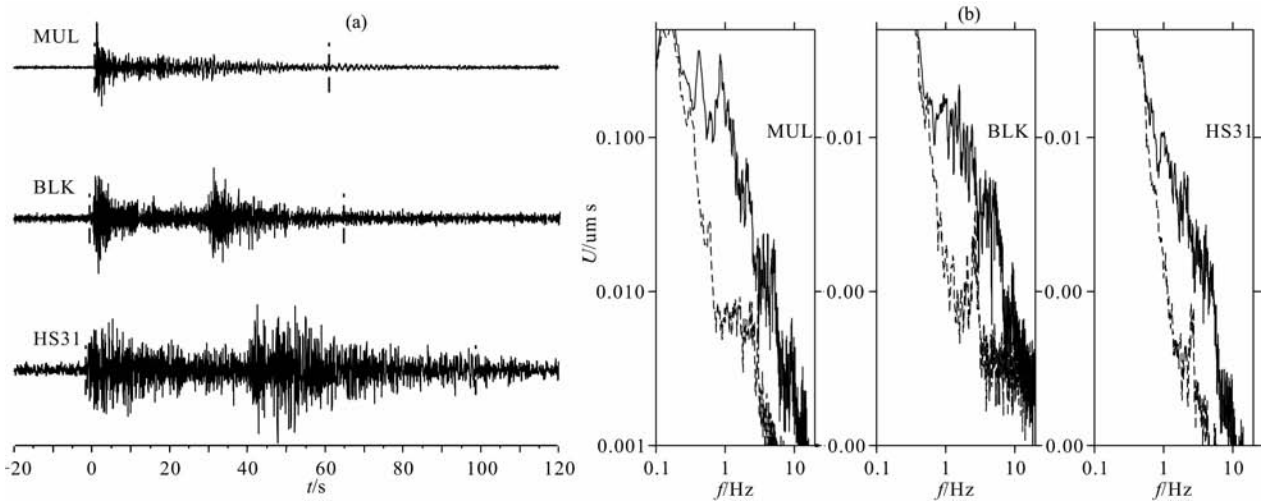


图 2 (a) 2008-04-29 18:26:43.0 爆炸在 MUL, BLK 和 HS31 台站 BHZ 通道的记录经 1.0~10.0 Hz 频带的带通滤波器滤波后波形;(b) 相应时间窗内信号的频谱

Fig. 2 (a) BHZ channel waveform of 2008-04-29 18:26:43.0 explosion recorded by MUL, BLK and HS31, filtered by 3th order Butterworth band-pass filter with 1.0~10.0 Hz pass-band; (b) Corresponding spectrum of signal in time windows

事件在 MUL, BLK 和 HS31 台站 BHZ 通道的波形经频带为 1.0~10.0 Hz 的三阶巴特沃斯带通滤波器滤波后的波形, 图中虚线表示相应台站的参考信号时间窗, 图 2b 为相应的频谱. 根据信号本身的频谱特征, 本文选取频带分别为 1.0~2.0 Hz, 2.0~4.0 Hz, 3.0~6.0 Hz, 4.0~8.0 Hz 的四个三阶巴特沃斯带通滤波器, 对这三道波形进行滤波并截取相应时间窗内的信号, 得到 12 道参考信号. 对 BHN 和 BHE 通道也进行相应的操作共得到 36 道参考信号波形. 分别以这 36 条波形记录作为参考信号对 MUL, BLK 和 HS31 三个台站记录到的 2008 年 4 月 1 日至 2008 年 4 月 30 日共 30 天的连续记录数据进行相关检测. 检测时先将对应台站各个通道的记录数据利用与相应参考信号完全相同的滤波器进行滤波, 再与相应的参考信号进行相关运算, 对每个频带, 一个台站可以得到三束相关系数波形, 对这三束相关系数波形进行聚束得到该台站的相关系数束. 利用常用的 STA/LTA 信号检测器即可以从相

关系数束中检测出相关系数突然增大的位置. 根据相关系数束的波形特征及多次检测实验的结果, 本文将 STA/LTA 检测器的配置参数取为短窗宽度 2.0 s、长窗宽度 20.0 s、短窗更新速度 0.2 s、长窗更新速度 5.0 s、检测阈值 3.5, 并取 STA/LTA 触发位置前 0.5 s 至触发后 2 s 时间窗内相关系数最大值的时刻为检测信号的到时. 根据参考信号在三个观测台站上的到时差关系, 对 STA/LTA 的检测结果进行到时差关联, 在这一时间段内共成功关联形成 9 次重复事件 (表 1). 其中有 7 次事件为新疆地震局疑爆事件目录中的事件, 而 D5 和 D6 两次事件并未出现在疑爆事件目录中. 其中 D5 事件在地震目录中被误判为天然地震; D6 事件则是一次漏检事件. 这两次事件的波形及其与参考信号的互相关系数如图 3 和图 4 所示. 在图中可以看出 D5 事件在三个台站上都有较强的信号, 其波形与参考事件的波形特征基本吻合. D6 事件虽然只在 MUL 台上有明显的信号, 而在 BLK 台上只有较弱的 Lg 波信

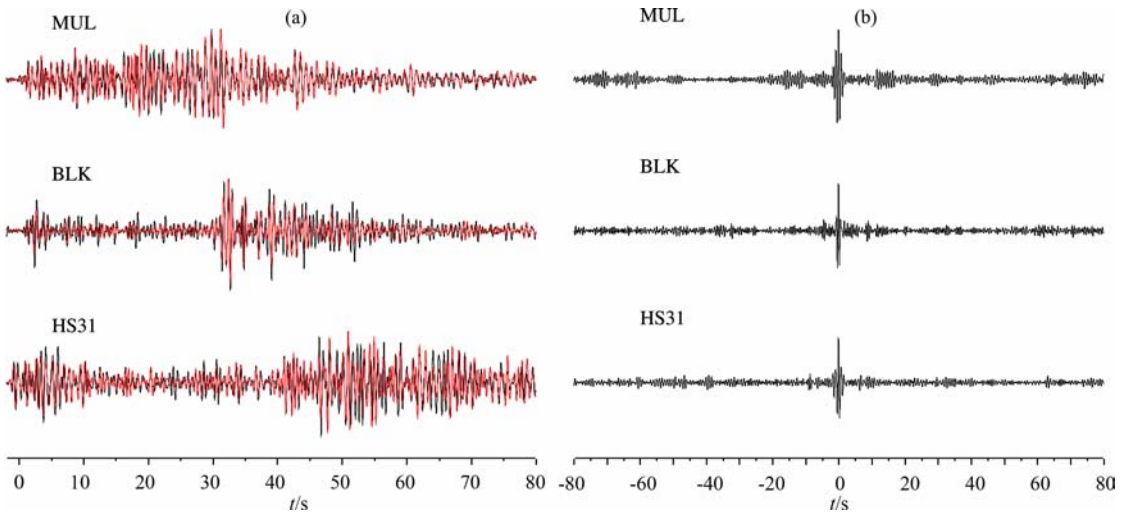


图 3 2008-04-12 奇台爆破的波形信号(a)及相应的相关系数(b)

Fig. 3 Waveform of 2008-04-12 Qitai explosion(a) and the cross-correlation waveform(b)

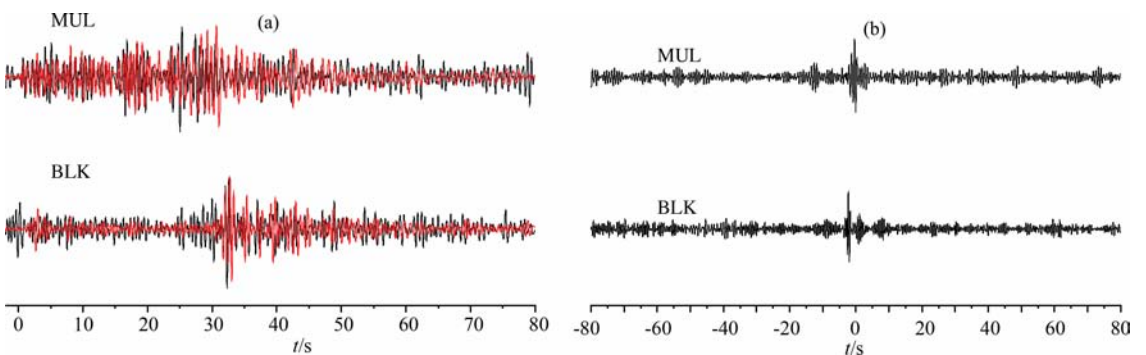


图 4 2008-04-13 奇台爆破的波形信号(a)及相应的相关系数(b)

Fig. 4 Waveform of 2008-04-13 Qitai explosion(a) and the cross-correlation waveform(b)

表 1 以 2008-04-29 爆破作为参考事件的相关检测结果

Table 1 Cross-correlation detection result with 2008-04-29 explosion as master event

编号	年-月-日	时:分:秒	震级 (M _L)	最大相关系数	相应的频带	备注
M1	2008-04-29	18:26:43.0	2.7			参考事件
D1	2008-04-02	18:41:50.0	1.5	0.81	1.0~2.0	
D2	2008-04-03	14:06:40.8	2.2	0.40	4.0~8.0	
D3	2008-04-07	14:35:15.7	1.5	0.45	1.0~2.0	
D4	2008-04-08	13:53:30.0	1.6	0.52	1.0~2.0	
D5	2008-04-12	15:48:03.9		0.85	1.0~2.0	误判事件
D6	2008-04-13	14:39:00.8		0.51	1.0~2.0	新检出事件
D7	2008-04-14	11:48:57.8	1.8	0.71	1.0~2.0	
D8	2008-04-20	17:58:46.3	1.4	0.56	2.0~4.0	
D9	2008-04-22	19:42:13.2	1.4	0.74	1.0~2.0	

号,但是相关系数检测方法仍然能够将其准确检测出来.而在整个检测时间段内虚假事件的个数为零.

4 讨论

由于相关检测以观测波形与参考波形之间的相关系数为检测对象,因此其对信号的检测能力依赖于待检测波形与参考波形之间的相关性,这限制了相关检测方法在波形未知的天然地震信号日常检测中的应用.但对于波形已知的特定场地地下爆炸,相关检测是一种非常有效的检测方法.为了研究信号检测率与相关系数之间的关系,本文首先合成与参考信号具有不同相关系数的合成信号,然后利用本文介绍的信号相关检测数据处理流程对合成信号进行检测,不过这里只对 BLK 台 1.0~2.0 Hz 频带内的信号进行检测.合成信号的方法如下:(1)以附录表 1 中 2008-04-29 时 2.7 级疑爆在 BLK 台上 BHZ 通道的信号到时前 300 s 至信号到时后 300 s 为时间窗截取三个通道的波形数据;(2)从各个通道的截取波形中截取 BLK 台参考信号时间窗对应起始时间前 10 s 至时间窗截止后 10 s 内的波形数据进行傅里叶变换;(3)对各频率点上的傅立叶变换结果施加一个大小由随机数控制的相位扰动;(4)将扰动后的频谱反变换到时域得到与参考信号具有不同相关系数的合成信号;(5)利用合成信号代替步骤(2)中相应时间窗内的信号,并对插入的两端点上的波形进行 6 点光滑.以此合成波形进行多次反复实验得到具有不同相关系数的合成信号,并保证各相关

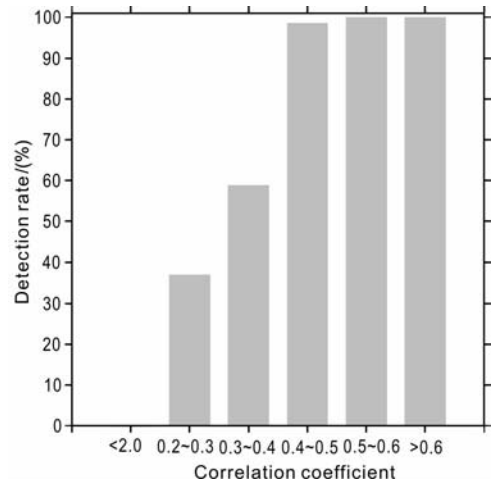


图 5 不同相关系数下的信号检测率

Fig. 5 Detection rate for different cross-correlation coefficient

系数范围区间内的合成信号数不小于 150 次.对正确检测的次数进行统计得到不同相关系数的信号检测率如图 5 所示.从图中可以看出,当相关系数大于 0.3 后,信号的检测率就可以达到 50% 以上,大于 0.5 后检测率可达 100%.

为了验证三分向台站之间检测的到时差关联筛查对降低误检率的作用,本文也对仅只利用相关系数的触发条件进行检测的结果进行了分析.表 2 分别列出了不同相关系数触发阈值条件下所有台站在 1.0~2.0 Hz 频带上的触发个数、误触发个数及平均误触发个数,在计算漏检率时以表 1 中列出的所有事件作为完备集目录.从表中的结果可以看出,虽然在检测阈值取较大值时平均误触发的次数非常小(0.7 次/天·台),但所能检测到的事件也只占 50%.当 STA/LTA 的检测触发阈值降低到 3.5 时,事件的检测率达到 100%,与此同时平均误触发次数增加到 7.1 次/天·台,但如果利用各个台站检测之间的到时差关系进行筛查后事件的误检测次数仍能保持零.因此在地下爆炸的地震监测中利用三分向台站的地震数据采用相关检测方法对某地区可

表 2 不同 STA/LTA 触发阈值下的相关检测结果比较

Table 2 Detection result with different threshold

STA/LTA 检测触发阈值	触发个数	假触发数	平均假触发 (次/天·台)	事件检测率/(%)	事件误检率
6.5	68	59	0.7	50	0
5.5	118	101	1.1	60	0
4.5	185	169	1.9	70	0
3.5	663	643	7.1	100	0

能进行地下爆炸进行相关检测时,如果不根据多个台站上检测之间的到时差关系对触发检测进行关联筛查,则即使在触发阈值取较大值时,每天在每个台站上仍有可能会有虚假检测触发,并且这时对事件的检测率还比较低.如果要保证较高的检测率,则平均误触发次数会迅速增加,这在地下爆炸的长期监测中就需要大量的人力对虚假触发进行处理.

为查看相关系数与爆心距之间的关系,本文计算了表1中除D5和D6外各次事件在MUL台的波形信号之间的相关系数.计算相关系数时信号都经带通为2.0~4.0 Hz的带通滤波器滤波,计算相关系数的时间窗为从P波信号到时处起宽为5.0 s的时间窗.图6给出了MUL台上各次信号之间的相关系数与爆心距之间的关系.从图中可以看出,当爆心之间的距离小于0.6 km时,信号之间的相关系数大多在0.7以上.而当爆心距大于0.8 km以后,信号之间的相关系数都小于0.7.在爆心距小于0.6 km的事件对中,有的事件对即使爆心之间的距离小于0.2 km,但信号之间的相关系数也会较小.出现这种情况的原因是由于矿山爆破的爆炸方式差异引起的.

从本文的结果可以看出,利用一次爆破事件的地震信号作为参考信号可以将其周围的爆破事件检测出来.根据本文对2008年4月份新疆奇台附近25次疑爆事件的相对定位结果可以推测,如果再从另外两个作业点选取两次事件的信号作为参考信号就有可能利用相关检测方法将这25次疑爆事件中的大部分事件从连续波形中检测出来.

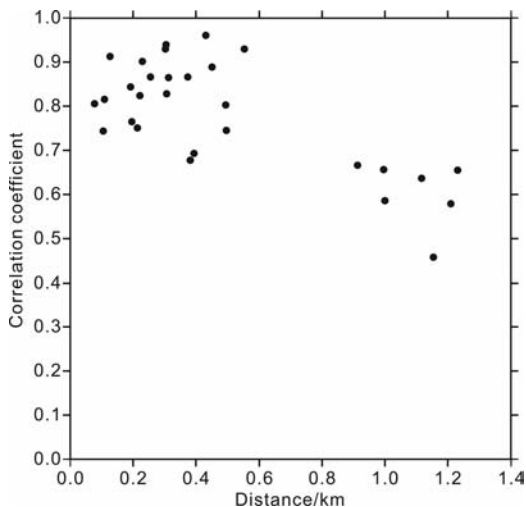


图6 波形相关系数随爆心距之间的关系

Fig. 6 Relations between explosions distances and cross-correlation coefficient

5 结论

本文的研究结果表明,虽然相关检测方法对于震源机制及爆心位置具有较好重复性的地下爆炸具有极强的检测能力,但在利用该方法对爆炸方式及爆心位置重复性较差的工业爆破进行检测时很难保证其检测率.为了提高检测率则需要降低检测阈值,而降低检测阈值将出现大量的误检测.本文介绍的基于三分向台站波形的信号相关检测到时差关联的方法能对检测结果进行筛查去除误检测.对新疆三个三分向台站一个月连续波形数据的测试结果表明,该方法能在保持零误检率的情况下对重复性较差的工业爆破进行检测.此外,本文对工业爆破的检测结果表明,对于作业点差异较大的矿山工业爆破,需要利用多个相互独立爆炸的地震信号作为模板信号才能实现大多数爆破的有效检测.

致谢 感谢新疆地震局提供新疆地震目录及部分台站的波形数据.本文的插图由GMT绘制.在编写本文的相关检测程序过程中得到了西北核技术研究所刘文学副研究员的帮助,在此一并感谢.

附录

附表1 2008年4月新疆奇台矿区疑爆事件目录
Appendix Table 1 Explosion bulletin of Qitai mine
in April, 2008

年-月-日	时:分:秒	纬度/°N	经度/°E	震级
2008-04-01	10:53:31.4	44.53	90.43	1.6
2008-04-02	18:41:51.0	44.55	90.38	2.5
2008-04-03	14:06:40.8	44.57	90.38	1.9
2008-04-07	14:35:15.7	44.55	90.42	2.0
2008-04-08	13:53:30.0	44.55	90.37	2.3
2008-04-09	15:45:32.8	44.57	90.32	1.7
2008-04-09	19:42:33.4	44.55	90.30	1.9
2008-04-10	20:58:00.5	44.53	90.37	1.8
2008-04-11	14:48:08.6	44.55	90.32	1.8
2008-04-12	19:47:02.8	44.57	90.33	1.7
2008-04-13	14:46:52.8	44.57	90.42	1.5
2008-04-14	11:48:57.8	44.55	90.48	1.9
2008-04-15	13:30:03.0	44.57	90.25	1.8
2008-04-15	20:08:25.0	44.53	90.32	2.1
2008-04-17	14:13:47.2	44.52	90.30	2.1
2008-04-18	16:43:51.9	44.53	90.28	1.9

年-月-日	时:分:秒	纬度/°N	经度/°E	震级
2008-04-19	13:55:50.6	44.55	90.33	1.7
2008-04-20	17:58:46.3	44.55	90.35	2.7
2008-04-21	11:07:36.4	44.57	90.30	1.7
2008-04-22	19:42:13.2	44.60	90.40	2.5
2008-04-23	12:47:03.4	44.55	90.27	1.6
2008-04-24	20:14:16.0	44.57	90.25	1.9
2008-04-27	19:57:31.1	44.57	90.33	2.0
2008-04-29	18:26:43.0	44.58	90.37	2.7
2008-04-30	20:01:14.3	44.62	90.25	1.9

参考文献(References)

- [1] Van Trees H L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. New York: John Wiley and Sons, 2003.
- [2] Gibbons S J, Ringdal F. The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys. J. Int.*, 2006, 165(1): 149-166, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.
- [3] Schaff D P. Broad-scale applicability of correlation detectors to China seismicity. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36: L11301, doi: 10.1029/2009GL038179.
- [4] Schaff D P, Waldhauser F. One magnitude unit reduction in detection threshold by cross correlation applied to Parkfield (California) and China seismicity. *Bull. Seismo. So. Am.*, 2010, 100(6): 3224-3238.
- [5] 唐杰, 王宝善, 葛洪魁等. 小当量激发的远距离信号检测研究. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1810-1818.
Tang J, Wang B S, Ge H K, et al. Study on weak signal detection of small shot in regional scale deep exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 51(6): 1810-1818.
- [6] Wen L X, Long H. High-precision location of North Korea's 2009 nuclear test. *Seismological Research Letters*, 2010, 81(1): 26-29.
- [7] Selby N D. Relative locations of the October 2006 and May 2009 DPRK announced nuclear tests using International Monitoring System Seismometer Arrays. *Bull. Seismo. So. Am.*, 2010, 100(4): 1779-1784, doi: 10.1785/0120100006.
- [8] Harris D B. A waveform correlation method for identifying quarry explosions. *Bull. Seismo. So. Am.*, 1991, 81(6): 2395-2418.
- [9] Gibbons S J, Ringdal F. A waveform correlation procedure for detecting decoupled chemical explosion. // NORSAR Scientific Report; Semiannual Technical Summary No. 2-2004. NORSAR, Kjeller, Norway, 2004: 41-50.
- [10] 将长胜, 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. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 817-827.
Jiang C S, Wu Z L, Li Y T. Estimating the location accuracy of the Beijing Capital Digital Seismograph Network using repeating events. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 817-827.
- [11] Gibbons S J, Sørensen M B, Harris D B, et al. The detection and location of low magnitude earthquakes in northern Norway using multi-channel waveform correlation at regional distances. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2007, 160(3-4): 285-309.
- [12] Schaff D P. Semiempirical statistics of correlation-detector performance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2008, 98(3): 1495-1507, doi 10.1785/0120060263.
- [13] Geller R J, Mueller C S. Four similar earthquakes in central California. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, 7(10): 821-824.
- [14] Menke W. Using waveform similarity to constrain earthquake Locations. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1999, 89(4): 1143-1146.
- [15] Fehler M, Phillips W S, House L, et al. Improved relative locations of clustered earthquakes using constrained multiple event location. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, 90(3): 775-780.

(本文编辑 胡素芳)