

基于慢度估计的次声台阵信号 自动检测算法及应用

陈虎虎, 王同东, 沈旭峰

(西北核技术研究所, 陕西西安 710024)

摘要: 针对次声监测研究领域广泛使用的短时间与长时间信号功率比检测方法性能不能满足要求, 渐进多通道互相关检测算法虚警率较高的缺点, 利用信号的时、频、波数域特性和次声台阵各子台信号的互相关性特性, 提出了一种基于次声台阵信号慢度估计的自动检测算法。次声信号慢度估计结果的合理性、一致性是该检测算法的依据。考虑到该检测算法计算量较大, 在具体应用中加入其他计算量较小的传统算法, 进行逐次检测, 最后应用的慢度估计方法既是一种检测方法, 也是对其他检测算法结果的最终审核, 一方面可以降低单项检测方法对检测参数的敏感性, 另一方面也可提高检测的正确率(虚警率和漏警率同时降低)。该复合检测算法应用于某实验次声台站信号的检测(信噪比大于 1.1), 结果虚警率为 4.0%, 漏警率为 5.0%, 表明了该方法的优良性能。从检测应用处理结果还可以推测, 结合一个区域现有密集的地震台站数据和 2~3 个次声台阵的数据, 可以方便地识别、监控爆破方式日益复杂的人工爆破事件和真正的地震(余震)事件, 为地震灾害减灾防灾、采矿监控等多领域服务, 具有重大推广价值。

关键词: 慢度估计; 渐进多通道互相关; 信号检测

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-01-0085-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.01.016

An auto detection algorithm based on slowness estimation for infrasonic array signals and its application

CHEN Hu-hu, WANG Tong-dong, SHEN Xu-feng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: An auto-detection algorithm based on slowness estimation is presented for infrasonic array signals to overcome the low performance of STA/LTA detection algorithm and the high false-alarm rate of PMCC algorithm. The principle of the algorithm is introduced by following descriptions of slowness estimation in time domain and wave number domain. Tactful compensations are made for this algorithm to reduce computation time, for which a series of simple detection algorithms are used before running the main algorithm to eliminate the apparent noise. Thus a hybrid detection algorithm is finally implemented to achieve high performance in real time. The results of applying the hybrid detection algorithm to signal detections of an experimental infrasound array in Xinjiang show that a better performance with the false-alarm rate of 4% and the missing alarm rate of 5% has achieved, and so the problem on high false-alarm rate of traditional detection algorithm is solved. An inference can also be drawn from the detection results, such as from the data acquired by a regional seismic net in association with 2-3 infrasonic arrays, the regional manmade explosion events can be monitored and distinguished easily from true earthquake events.

Key words: slowness estimation; PMCC; signal detection

0 引言

次声监测是全面禁核试条约的四种基本监测手段之一(其它三种为地震、水声、核素技术), 其关注的次声信号为大气层核试验、陨石爆炸、火箭

发射、飞行器爆炸、采矿爆破等次声信号^[1-3]。次声数据的日常处理中, 首先要进行台阵信号的自动检测, 进而进行关联、定位及后续深入分析等处理。日常处理中绝大部分实测信号为当地信号(传播距离极小, 不是关注目标)或区域次声信号。区域信号传播距离较远, 一般特征是持续时间长, 没有明显的初至, 信噪比低, 可能含有干扰, 是研究关注的重点。全面禁核试条约地震数据自动处理技术已经

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-12-15

作者简介: 陈虎虎(1975—), 陕西富平人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为次声探测技术。

通讯作者: 陈虎虎, E-mail: chenhuhu@nint.ac.cn

较为成熟,而次声信号自动处理技术依然在发展中,其中一个难点就是次声信号的检测问题,其结果直接影响后续处理中的关联、定位结果与效率。全面禁止核试验条约组织的国际数据中心曾因为次声信号检测等技术存在一定问题,导致整个数据自动处理系统一度中止运行^[4]。

在次声信号的检测技术中,目前国际上常用的有信号短时间与长时间平均比(Short Time Average over Long Time Average, STA/LTA)方法^[1,2]、渐进多通道互相关(Progressive Multi-Channel Correlation, PMCC)检测方法等^[5,6]。本文在分析这两种检测方法缺陷的基础上,探讨一种新的信号自动检测方法。

1 STA/LTA 与 PMCC 检测方法的分析

STA/LTA 方法利用信号短时窗与长时窗的信号功率比值或信噪比来判断信号的有无,当次声信号的信噪比较低甚至被噪声淹没或信号持续时间较长时,这一统计量已经较难应用,检测阈值低则虚警率大,阈值高则漏警率大。事实上,一些台阵信号的信噪比虽然比较小,但各个子台信号的相关性较高,可以判定为一个次声信号;反之,当这一比值较大但子台信号相关性较差时,也并不能做出肯定的判断,比如脉冲型的噪声也具有这一比值较高的特点。

PMCC 方法的基本原理是:如果信号出现,存在几个最优子台(渐进进行),其信号的到时差之和理论上为零。该检测方法的主要优点是漏警率低,但也同时存在虚警率高的问题。对于这一情况,存在两种原因:(1)“如果信号出现,各子台信号的到时差之和理论上为零”这一命题的逆命题并不完全成立,实际上到时差之和为零不一定是信号,也就是说它不是一个充要条件;(2)信号的检测问题本质是一个二元识别问题,其本质要求是把需要的信号从噪声中识别出来,而此处的噪声是次声监测中不需要的干扰信号,带有一定的主观性,实际上一段次声干扰信号可能包含的内容较为丰富,比如大量不间断存在的微气压、山背波常常作为台站的背景噪声出现,地震耦合杂波等(非震中次声波)也较多,而且表现出较强的相关性,其台阵信号满足 PMCC 的要求,但都不是关注的信号。所以 PMCC 方法从原理上就存在虚警率较高的问题。实际应用表明,PMCC 的自动检测结果虚警率可以达到 85% 以上。

2 基于慢度估计的检测算法

2.1 算法的原理

由于大气层温度剖面的特殊结构,次声波传播到地面台阵时入射角会处于一定范围,这使得其视速度处于一定范围。这也可以通过台阵信号的慢度来描述(慢度是一个有三个方向分量的矢量,其方向与信号速度方向相反,绝对值为后者的倒数。考虑到台阵子台的高程差可以忽略不计,下面慢度只考虑水平面内的慢度)。次声监测信号处理中次声信号慢度一般小于 330 s/deg(视速度大于 340 m/s),而风速一般不超过几十米每秒,地震耦合杂波的视速度为千米/秒以上,对应的慢度不超过几十秒/度,一个特定台阵的微气压、山背波的慢度与其优势频率分布也有一定规律,正是由于关注的次声信号与风噪声、其他干扰的慢度分布等不同,即信号慢度的合理性成为检测的依据之一。

次声台阵信号的慢度需要估计求解。在低信噪比下慢度估计结果虽然可能是合理的,但不一定是正确的。次声台阵信号慢度的估计方法目前主要有时域方法和频率-波数分析方法(frequency-wavenumber analysis, FK)^[6]。两种方法一个在时域进行,一个在波数域进行,两种方法均能在较低信噪比情况下估计出信号的慢度。通常情况下两种不同方法对于信号、噪声特性的灵敏度不同,单一时域或波数域慢度的估计存在一定不确定度甚至会出现估计完全错误的情况。在一定信噪比情况下,如果噪声中包含信号,两种方法的估计结果应满足自恰性,即慢度估计的一致性,且应该接近真实值,如果不包含信号,则两种估计结果在概率意义上不同。所以台阵信号慢度估计的一致性检测是第二个依据。

慢度估计的一致性判据能够有效地检测识别那些不相关的台阵噪声,而慢度估计的合理性判据能够检测剔除那些子台信号相关性较好但不是关注的信号。

慢度估计检测的原理如图 1 所示,当时域和波数域的慢度估计结果一致且都在灰色圆环中时判断为信号。如果选择在 400×400(根据次声信号的速度和高度角来决定)的慢度估计平面上的偏差 10 s/deg 作为检测阈值,对一段白噪声而言,两种方法估计到同一个格点的概率为 $(10 \times 10) / (400 \times 400) = 1/1600$ 。事实上真正感兴趣的次声信号慢度分布有一定范围,如果两种方法估计的结果同时落到慢度

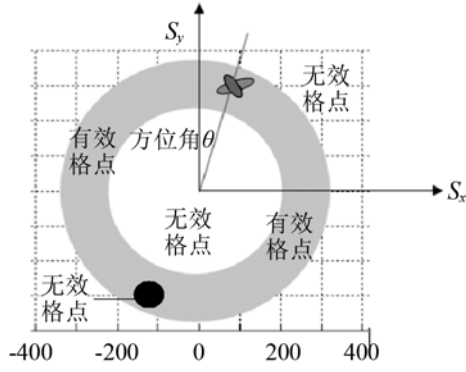


图 1 慢度估计检测的原理
Fig.1 Principle of slowness estimation

较小或较大的格点上(即圆环外),这一结果也是无意义和无效的,所以这一概率应该更小。

对于微气压、山背波或其他不明类型的噪声,可根据其慢度分布规律(包含频率因素)对灰色圆环再加上额外限制,减少通过区域,如图 1 圆环中的黑洞,减少虚警信号。

在信噪比较低时,台阵信号可能有部分子台受到严重干扰,所以算法中借鉴 PMCC 算法的“渐进选择子台,估计慢度时只选择部分最优子台信号”进行慢度估计的策略。

2.2 两种慢度估计的方法

时域方法首先获取各个子台信号的到时差向量 T , 然后解一个超定方程, 就可以求出信号的慢度向量 $S = [S_y \ S_x]^T$, 即求出了信号的后方位角 $\theta(\text{tg}\theta = S_x/S_y)$ 。

$$RS = T \quad (1)$$

式中: R 为各个子台的相对位置矩阵, 因为次声子台的个数一般为大于 4, 所以该方程为超定方程, 取其最小均方差意义的解。在强背景噪声环境的实际应用中, 各个子台的次声信号可能会受到不同程度的干扰, 使得信号的相似性受到一定影响, 应选择其中最为相关的几个子台信号计算。

FK 分析是地震等台阵信号处理中一种使用广泛的技术, 用来估计信号的慢度和方位角, 它对次声信号依然有效。

设 $n(x, y, z)$ 为噪声场, 其自相关函数为 $R(\xi, \eta, \tau)$, 其功率谱密度为 $P(k_x, k_y, \omega)$, 则有

$$R(\xi, \eta, \tau) = \langle n(x, y, t)n(x+\xi, y+\eta, t+\tau) \rangle$$

$$P(k_x, k_y, \omega) = \int \int \int R(\xi, \eta, \tau) \exp[i(\omega\tau - k_x\xi - k_y\eta)] d\tau d\xi d\eta$$

引入一个权函数:

$$W(\kappa_x, \kappa_y) = \frac{1}{N^2} \sum_{q,p=1}^N \exp[-i\kappa_x(x_q - x_p) - i\kappa_y(y_q - y_p) + i\omega(\tau_q - \tau_p)]$$

式中: N 为台阵子台个数, x 、 y 分别为子台位置, 只要台站分布已知, 权函数就可求出。可证明估计的 $\hat{P}(k_x, k_y, \omega)$ 是真实功率谱 $P(k_x, k_y, \omega)$ 的加权平均:

$$\hat{P}(k_x, k_y, \omega) = \int \int W(\kappa_x - k_x, \kappa_y - k_y) \times P(\kappa_x, \kappa_y, \omega) d\kappa_x d\kappa_y$$

在实际计算中可以用信号的波数能量谱 $E(\mathbf{k}_0 -$

$$\mathbf{k}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\overline{x(\omega)}|^2 |C(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k})|^2 d\omega$$

来估计信号的真实 $\mathbf{k}$ 值(角频率与慢度的乘积), 在它的两个分量 k_x 、 k_y 达到实际值时 E 有最大值, 从而可求出信号的慢度和方位角。其中 $|C(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k})|^2 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \exp(i\omega \cdot \mathbf{r}_p(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}))|^2$

为台阵的响应函数。

3 性能测试、分析与算法改进

把该方法应用于某火箭发射场 2014 年一次火箭发射事件(约 GMT2014/05/15 21:42:00, 发射、飞行过程中有部分火箭设备元件坠落我国某省境内, 引发普遍关注)次声信号的检测性能测试。测试数据选择距离发射场较近的国际监测系统 I31KZ 台站两天的数据。I31KZ 位于拜科努尔发射场西北方向, 距其约 610 km。图 2 给出了其相关时间段的部分信号, 可以观察到信号没有明显的初至, 信噪比较低, 尤其是后期信号。检测的一致性阈值设置为 10 s/deg, 合理性阈值为 240~327 s/deg, 信号检测时间窗口为 7、12、25、50 s。表 1 给出了该号的检测目录。图 3 为所有检测目录中的信号方位角随时间的变化情况。首次触发的信号标注为 I 声相, 后续特性基本相同的触发标注为 Ix 声相(可能有若干信号是同一位置产生, 在大气层不同位置折射返回产生的声相)。可以观察到在约 700 s 时间范围内, 信号的方位角从 157° 随时间持续变小, 到最后变成约变成了 100°, 说明信号源是一个活动目标, 这与火箭发射过程吻合。检测目录中观察到这组信号是该台站两天范围内出现的唯一一组具有该特征。考虑该组信号的方位角、时间与火箭发射吻合, 又具有移动特征, 该信号与该火箭发射事件关联的可能性较大。单独应用 PMCC 检测方法(检测阈值为 0.02 s), 其触发次数为上述结果的 10 倍以上, 由于大量无意义无规触发, 其方位角无规分布, 导致无法得到以上方位角随时间变化的规律。

基于慢度估计的自动检测方法每次都需要进行时域、波数域慢度的估计(且要分频带并行扫描), 其耗时占整个检测过程的 90% 以上, 对于仅包含数量较少信号的数据而言较为浪费, 使得检测过程较

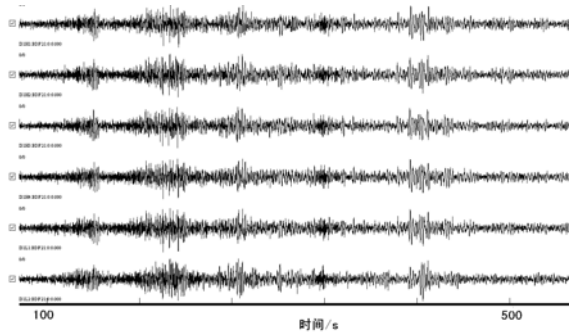


图 2 疑似某火箭发射次声信号
Fig.2 Suspicious infrasound from rocket launching

表 1 检测目录(部分)
Table 1 Detection bulletin

台站	时间	方位角	慢度	声压	信噪比	慢度差	频率
I31	2014/05/15 22:14:26.5	157.5	240.1	0.019	3.1	7.3	1.0-4
I31	2014/05/15 22:15:18.5	155.1	286.7	0.008	1.3	1.7	1.0-4
I31	2014/05/15 22:15:54.5	151.2	272.4	0.016	1.2	9.9	0.4-5
I31	2014/05/15 22:16:27.5	151.0	289.1	0.022	1.4	9.8	0.4-5
I31	2014/05/15 22:16:55.5	149.7	276.1	0.033	1.3	9.6	0.2-5
I31	2014/05/15 22:17:19.5	151.9	273.2	0.043	1.3	5.9	0.4-5

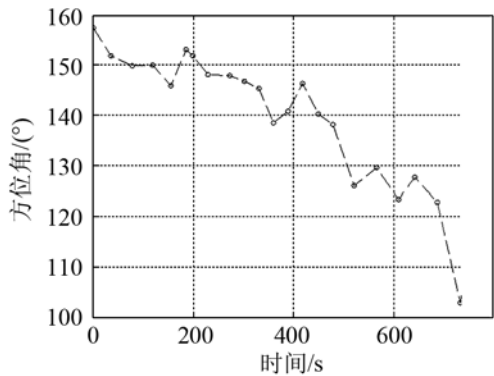


图 3 信号方位角随时间的变化
信号的起始时间 2014/05/15 22:14:26
信号方位角持续变小表明源大致向东或北运动
Fig.3 Signal azimuth varying with time
The beginning of signal time is 2014/05/15 22:14:26. The signal azimuth decreasing gradually with time indicates that the signal source is moving east or north

难实时完成。鉴于此，考虑加入不同计算量大小的一些传统算法逐次进行检测，以改进其较高耗时的缺点，这样简单算法用以去除明显的噪声，较高级算法用以识别较为模糊的信号。

复合检测系统由 STA/LTA、PMCC 检测、慢度估计检测构成，充分利用了信号的时域、频谱、时频域特征，其流程如图 4 所示。从图 4 可以看出，慢度估计检测实际上也起到了对前面检测结果的审核和识别作用。在慢度估计方法检测前，明显的噪声(占大部分)已经被剔除，慢度估计检测主要用来识别那些不易判断的可能信号。关注的信号相对于整个数据而言是小量的，计算时间可以满足实时

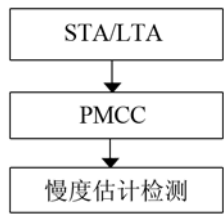


图 4 复合检测流程
Fig.4 The procedure of hybrid detection

处理的要求。

4 实际应用与结果

把上述复合检测算法应用于某个实验次声台阵数据的检测(这一区域有密集的地震台站和较多的信息已知的采矿、采石矿区，能产生周期规律性爆破次声信号)，并结合该区域台网的地震数据进行次声—地震信号关联分析。

以下是 2012 年 8 月一个月的数据的处理结果，相关检测参数和前面相同(信号检测频带为 0.1~8 Hz，频带信噪比大于 1.1)。对 8 月 1~3 日的全部次声数据进行交互分析并和自动生成的 250 个次声检测目录对比，检测算法的漏警率为 5%，同时虚警率为 4%。

图 5 为自动检测到的一组巴里坤煤矿爆破次声信号的例子。图中最上三个通道为巴里坤煤矿当地的一个地震台记录到的南北、东西、垂向通道的地震信号；图中下四个通道为较远距离的次声台阵的四个子台信号，这些信号在较长时间内(一般是数百秒甚至上千秒)的方位角都是相同的。该月份类似这样的信号大量重复出现。

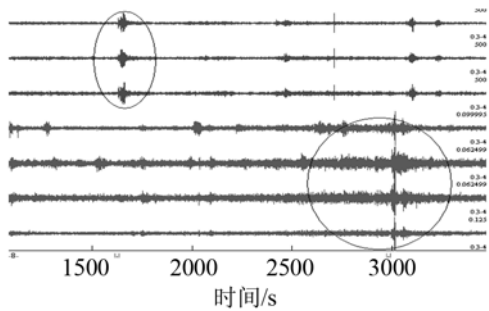


图 5 一个煤矿采矿地震、次声信号例子
Fig.5 A group of signals from a mining explosion

图 6 给出了该月全部数据处理结果的地理区域分布，图中白色小点表示真正的地震事件(较大震级或震源较浅的地震才可能产生次声信号，但这样的地震事件的数目较少，密集的区域地震台站也能探测识别)，而十字符号表示检测到次声信号的事件。白色小点代表的地震事件基本上是随机分布的，而

十字符号代表的次声信号在地理上形成了若干聚群,而不同次声聚群信号的时间也具有规律的重复性,集中在每一天的某一时刻。这些地理上的聚群与已知采石采矿区域基本一致,可以判定为采石采矿爆破或其它爆破事件。考虑到目前仅有一个次声台阵(位置用黑色方框表示)的数据参与处理(次声探测也有影区及时变大气剖面的影响),若有2~3个次声台阵,上述结果可能将更加明确。

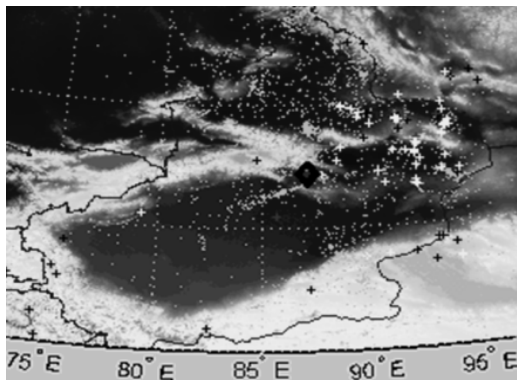


图6 复合检测算法检测到的新疆区域附近的次声信号
Fig.6 The detected infrasound in a certain area in Xinjiang

这些信号由于信噪比较低,持续时间长,没有明显的初至,即使人工交互处理分析也存在检测识别的困难,考虑到在没有任何先验信息条件下能进行人工交互分析的数据量有限,较难得到这样规律性的结果,该次声自动检测算法发挥了重要作用。

5 结论

本文提出的基于慢度估计的自动检测方法在原理上比传统的次声台阵信号检测方法具有虚警率低的优势。基于慢度估计的次声信号复合检测算法应用于某个实验次声台站信号的检测结果(通过交互分析验证的结果)表明了该方法的优良性能,有效解决了国际次声监测领域次声信号检测虚警率高的问题。

结合了几种简单检测算法进行逐次检测的复合检测算法可以使得每个单项检测技术的阈值都可以较为宽松,提高了系统的稳健性,和传统方法相比,一方面降低了检测系统的虚警率,同时也降低了系统的漏警率,也能够保障速度与性能两个方面的指标。

台阵信号自动检测结果在地理、时间分布的规律性也表明了上述检测方法的有效性,也暗示结合一个区域现有较为密集的地震台数据和2~3个次声台阵的数据,可以较为方便地识别爆破方式日益复杂的采石、采矿爆破等事件(比如微差爆破事件,总当量可能较大而地震信号较小)和真正的地震(余震)事件,为地震灾害减灾防灾服务,具有重大推广价值。

基于慢度估计为核心的复合检测算法并不限于次声台阵信号的检测,还可以应用于其他台阵信号的检测,比如地震、水声台阵的信号等(需要根据信号的传播速度、台阵子台个数、台阵噪声的情况等调整配置参数)。

参 考 文 献

- [1] Christie D, Kennett B, Tarlowski C. Advances in infrasound technology with application to nuclear explosion monitoring[C]// 29th Monitoring Research Reviews, 2007.
- [2] Dale N. Anderson. Trends in nuclear explosion monitoring[C]// 26th seismic research review, Orlando, Florida, 2004, 3-13.
- [3] Alexis Le Pichon, Elisabeth Blanc, Alain Hauchecorne. Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies[M]. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, Library of Congress Control Number: 2009941470.
- [4] Stephen J Arrowsmith, Rod W Whitaker. Development and validation of infrasound data processing algorithms[C]// 2012 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies.
- [5] Cansi Y. An automated seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method[J]. Geophys. Res. Lett. 1995, 22(9): 1021-1024.
- [6] Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proc IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.