

次声信号的时频信号能量统计检测方法^{*}

唐 伟 刘俊民 王晓明 石建芳 王海军

(禁核试北京国家数据中心 北京 100085)

2012 年 3 月 31 日收到

2013 年 4 月 2 日定稿

摘要 次声信号检测是次声事件监测的重要环节,常用的短时平均与长时平均之比 STA/LTA (Short Term Average to Long Term Average) 和著名的逐次多通道互相关方法 PMCC (the Progressive Multiple Cross-Correlation) 误检率都比较高。为此,提出一种时频域信号能量统计的次声信号检测方法,其基本原理是根据目标信号与噪声的频域分布差异,采用窄带分频技术将待检波形变换到时频域,按时频格点计算局部平均能量与全局平均能量之比,当比值大于设定阈值时,认为该格点属于目标信号的一部分。以国际监测系统次声台站监测数据为对象进行了实验研究,并与 PMCC 检测结果进行了比较,结果表明所提出的信号检测方法对微弱次声信号检测能力强、误检信号少。

PACS 数: 43.60

An infrasonic signal detection method based on the time-frequency domain signal energy statistic

TANG Wei LIU Junmin WANG Xiaoming SHI Jianfang WANG Haijun

(CTBT China Beijing National Data Centre Beijing 100085)

Received Mar. 31, 2012

Revised Apr. 2, 2013

Abstract Infrasonic signal detection is a major procedure in events monitoring. The commonly used STA/LTA (Short Term Average to Long Term Average) and PMCC (the Progressive Multiple Cross-Correlation) methods have too many false detections. So, a algorithm based on TFSES (the Time-Frequency domain Signal Energy Statistic) is proposed according to the distribution difference between the target infrasonic signal and the noise in the frequency domain. Firstly, the narrow band frequency division method is used to transform the waveform into the Time-Frequency domain. Then, calculate the ratio of local average energy to that of the global. The signal is detected at the grid while the ratio is greater than the threshold. The method is tested by using the actual monitoring data from the International Monitoring System infrasonic stations, and the experimental results are compared with PMCC. It is obvious that the TFSES method in this paper has a good performance in weak infrasonic signal detection, can remarkably reduce the amount of false detections.

引言

频率低于 20 Hz 的声波称为次声波, 矿爆、大气层核试验、飞机起降、火箭发射与返回、极光、流星、火山喷发、地震等均能产生次声波。百吨级当量爆炸产生的次声信号可传播上千公里; 距离地震震中

150 km 的次声台站可以记录到 3 级地震^[1-3] 产生的次声信号。我国次声学研究始于上世纪 60 年代, 中科院声学所在这一领域做了大量研究, 包括次声传感器与降噪管设计^[4-5], 在北京香山建立次声台站, 并在次声波传播规律^[6-7] 以及次声信号的接收、记录 and 数据分析等方面积累了一定的经验。上世纪 70 年代至 90 年代中期, 学术界对于次声学的研究趋于

^{*} 国防预研基金资助

停滞, 期间全球仅有澳大利亚沃勒曼加台站在内的少数次声台站正常运行。上世纪 90 年代末期开始, 学术界重新重视次声技术研究, 挪威、荷兰、美国等均建立了次声台站, 我国国家地震局等单位也相继建立了次声台站^[8], “十二五”期间, 我国还将在北京和昆明建立两个国际次声监测台站, 其中昆明台站将于 2013 年上半年完成建设。

次声信号检测是次声数据处理的重要环节, 是分析、识别次声事件的重要依据。当前次声信号检测方法主要包括: 短时平均与长时平均之比 STA/LTA (Short Term Average/Long Term Average) 和互相关法。STA/LTA 方法可以采用信号平均幅值或平均能量之比, 当信号较弱或背景噪声水平较高时, 次声信号检测能力较弱; 互相关法包括逐次多通道互相关方法 PMCC^[9-10] (The Progressive Multiple Cross-Correlation)、波形形态相似法^[11]等, 其中 PMCC 方法使用最为广泛, 主要依据同一次声台站不同子台记录信号具有相关性, 而噪声不具有相关性的特点进行信号检测, 与 STA/LTA 方法相比, PMCC 具有较好的信号检测性能, 但 80% 以上检测结果为虚假信号。

针对两种主流方法在次声信号检测方面存在的缺陷, 本文提出了采用时频域信号能量统计法 TFSES (The Time-Frequency domain Signal Energy Statistic), 并引入了地震台阵聚束处理方法, 实现次声台阵聚束、方位角与入射角计算, 在保持较高次声信号检测率的同时, 降低了次声信号虚检率。为验证 TFSES 检测方法的有效性, 文中给出了利用国际次声监测演练事件数据、不同台站背景噪声数据的测试结果。

1 检测原理

1.1 次声信号的时频分析

时频分析是一种重要的信号分析方法, 可实现由一维时间信号到二维时间与频率域的映射, 能够在二维时频平面上表示信号的能量强度、频带范围、持续时间、各子波出现的时间位置等。时频分析包括线性和非线性两类方法, 线性方法包括短时傅氏变换 STFT^[12] (Short-time Fourier Transform)、小波变换、S 变换, 非线性方法包括 Wigner-Ville 分布^[13]及改进分布、Choi-Williams 分布。

STFT 是研究非平稳信号最广泛使用的方法, STFT 先将时间信号加时间窗, 而后滑动时间窗做 Fourier 变换, 就得到信号的短时谱。信号 $s(t)$ 的短时傅里叶变换一般定义为:

$$s(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)g(\omega - \tau)e^{i\omega t}dt, \quad (1)$$

将 STFT 的模取平方可得到时频面中信号能量的分布, 称为 STFT 时频谱。对于某些不满足 Fourier 变换的能量无限的随机信号, 其具有能量有限的自相关函数。因此, 信号的功率谱密度^[14]就是其自相关函数的 Fourier 变换。对于离散时间序列 $\omega_t (t = 1, \dots, N)$, 其自相关函数定义为:

$$R_{\omega}(m) = E[\omega(n)\omega(n+m)], \quad (2)$$

其中, $m = 0, 1, \dots, N-1$ 。功率谱密度也是一种全局的变换, 能够反映信号的统计特性, 具有广泛的应用。图 1 为天宫一号发射产生次声信号的时频功率谱图, 可以看出信号占居了较宽的时频区域, 在

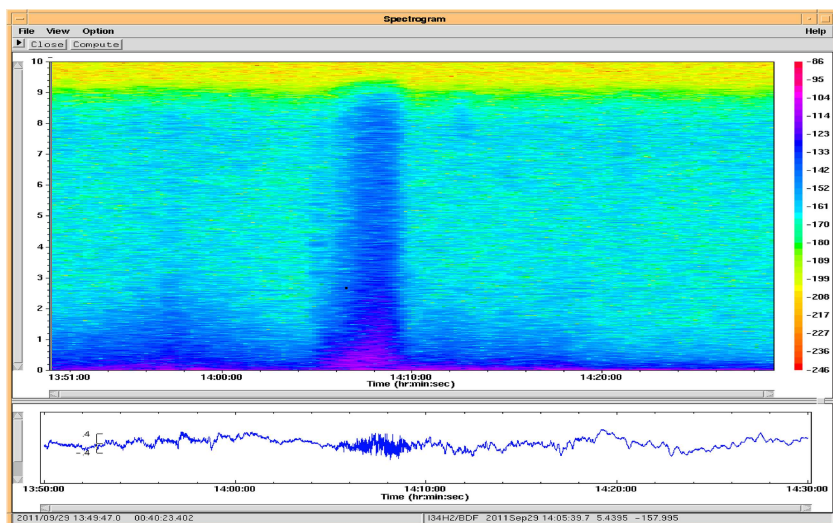


图 1 2011/9/2913:16(UTC) 天宫一号发射次声信号的时频功率谱图, 记录信号的 I34MN 台站 (47.8017N, 106.4101E) 距离酒泉卫星发射中心 902 km。

0.2~9 Hz 具有明显的能量分布, 且能量主要集中在 0.2~2 Hz, 信号持续时间范围在 14:04:10~14:10。

分频处理技术是时频分析的重要应用之一^[15-16], 是地震、水声等监测信号处理中抑制噪声的一种技术手段^[17], 蔡希玲等对地震数据的分频处理方法进行了研究。次声台站记录的噪声主要包括: 线性噪声、微气压噪声、风噪声。微气压噪声是由海洋深处风暴产生的持续性的低频噪声, 中心频率约 0.2 Hz, 该噪声全球范围内普遍存在; 虽然次声台站建有降噪装置, 但当风速大于 4 m/s 时, 台站背景噪声水平成倍增大, 次声信号会淹没在强背景噪声中。

林盛等人提出的倾斜滤波法可有效抑制线性噪声^[18], 该方法的有效性已经在地震信号的分频处理中得到证实: 可以利用干扰波的优势频带提取其特征, 而在非优势频带内利用已得到的特征作为约束, 进而识别干扰波。与次声信号相比, 微气压噪声与强风噪声的带宽明显窄于信号带宽, 只在某一频带内具有较强的能量。因此, 在时频空间和不同频带内进行分析, 可以较准确地识别出噪声干扰频带, 而保持其他频带内信号较为干净。图 2 为在强背景噪声条件下记录的次声信号, 采用分频处理可以将次声信号从背景噪声中有效分离, 图中监测波形为位于哈萨克斯坦阿克纠宾斯克的 I31KZ 台站记录的 2010 年 7 月 5 日数据, 包含的次声信号初至为 22:32(UTC), 频率低于 1.5 Hz 时, 背景噪声与信号能量强度相当, 多子台波形可参考图 10。

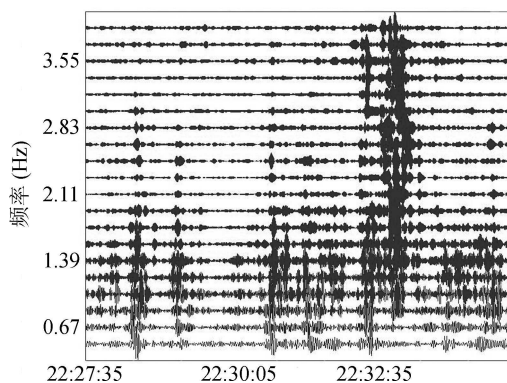


图 2 I31KZ 台站 H1 子台监测信号分频结果

1.2 单通道台站检测算法

次声数据时频分析与特征提取时, 在时间域可选择 Ricker 子波、Buttworth 子波、带通子波、俞氏子波作为窗函数。其中, 带通子波是次声数据处理中常用子波之一, 对于低截频与高截频分别为 f_l 和 f_h 的理想带通子波的表达式为:

$$b_p(t) = \frac{1}{\pi t} (\sin 2\pi f_h t - \sin 2\pi f_l t). \quad (3)$$

将次声监测数据进行窄带分频, 利用带通子波提取相应频带的波形数据。通过计算特定时窗内不同频带信号平均能量水平与对应频带特定时长背景噪声的平均能量之比, 统计比值大于给定阈值的时频格点数在所有时频格点中所占比例, 以此比值作为判定信号的依据。次声信号具有宽频带、时频可分辨是采用 TFSES 方法的基本前提。

对于持续监测而言, 次声台站记录的主要是台站背景噪声, 次声信号在整个时间序列中占比较小。假定连续输入的待检测通道波形数据 $x(t)$ 由时间长度有限的次声信号 $s(t)$ 和随机噪声 $n(t)$ 构成:

$$x(t) = s(t) + n(t). \quad (4)$$

通道的频率响应范围为 $0 \sim M$ Hz, $s(t)$ 的频率范围为 $f_0 \sim f_1$ Hz, 则 $x(t)$ 的频率范围覆盖本底噪声频率范围和次声信号 $s(t)$ 的频率范围。可采用带通滤波的方法, 以带宽为 M/N Hz 的一组窄带滤波器, 将 $x(t)$ 分解为连续 N 个频道子函数:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_N(t). \quad (5)$$

频带数 N 取决于频带上限 M 及频率格点细化程度。对于各子函数, 构造短时平均与长时平均比函数:

$$X_l(t) = \frac{\frac{1}{T_s} \sqrt{\int_{t_0}^{t_0+T_s} x_l^2(t) dt}}{\frac{1}{T_n} \sqrt{\int_{t_0-T_n}^{t_0} x_l^2(t) dt}}, \quad (6)$$

其中, $1 \leq l \leq N$, 时窗长度 $T = T_s + T_n$, T_s 是信号窗长, T_n 是噪声窗长, 一般情况下取 $T_n \gg T_s$, t_0 为所取噪声窗与信号窗的分界时刻, 如图 3 所示, 若噪声窗与信号窗非连续时, 式 (6) 中分子与分母的 t_0 取值不同。在次声波未到达传感器时, $s(t) = 0$, $x(t) = n(t)$, $X_l(t) \approx 1$ 。对子函数 $X_l(t)$ 构造二值函数:

$$\overline{X_l(t)} = \begin{cases} 1, & X_l(t) \geq L, \\ 0, & X_l(t) < L, \end{cases} \quad (7)$$

其中, L 是检测阈值, 根据经验而定。 $X_l(t)$ 大于 L 时, 认为该频道子函数包含次声信号。对 $x(t)$ 构造和函数:

$$\overline{X(t)} = \sum_{l=1}^N \overline{X_l(t)}. \quad (8)$$

$\overline{X(t)}$ 反映了波形函数 $x(t)$ 中可能包含的次声信号的频率和带宽信息, 当 $\overline{X(t)}/N$ 大于指定信号检测阈值时, 则认为 $x(t)$ 包含次声信号。

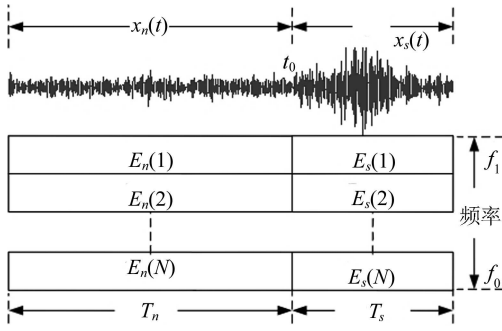


图 3 TFSES 检测示意图

1.3 多通道台阵检测算法

远距离次声事件监测的主要手段是建立次声监测台阵。次声监测台阵一般由性能一致的多个传感器单元组成,按照一定规律分布在方圆数十千米内。当台阵口径远小于次声波传输距离时,认为到达台阵的次声波为平面波。在次声传感器灵敏度所及范围内,次声波掠过次声台阵时被分散布置的传感器(子台)记录到,不同子台记录的次声信号具有较强的时间与形态相关性;而小范围的微气压变化、空气流动、气流漩涡等引起的信号,相对于被关注的次声信号而言属于干扰噪声,各子台记录噪声不具有相关性或呈现弱相关。据此,可以设计针对监测台阵的次声检测算法。

设有子台数为 K 的台阵,以中心子台为原点,建立三维直角坐标系, x 轴为纬线方向,正东向为正; y 轴为经线方向,正北向为正; z 轴为高程,向上为正。假设子台 k 的坐标为 $A_k(x_k, y_k, z_k)$,次声波入射台阵方位角 φ ,入射角为 θ ,如图 4 所示,则次声波掠过中心子台时的波阵面方程为:

$$x \sin \varphi + y \cos \varphi + z \cos \theta = 0. \quad (9)$$

声波前进方向是波阵面的法线方向。根据点到平面的距离公式,此时子台 $A_k(x_k, y_k, z_k)$ 到波阵面的距离函数:

$$d_k = \frac{x_k \sin \varphi + y_k \cos \varphi + z_k \cos \theta}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta}}. \quad (10)$$

当 $d_k > 0$ 时,表明子台 k 在波阵面的前方,即波阵面先到达中心子台,而后到达子台 $A_k(x_k, y_k, z_k)$,子台间延迟时间为:

$$t_k = \frac{d_k}{v}, \quad (11)$$

其中, v 为声波传播速度。反之,若 $d_k < 0$,则表明子台 k 在波阵面的后侧,即波阵面先到达子台 k ;若 $d_k = 0$,说明子台 k 与中心子台在同一个波阵面上,即波阵面同时到达中心子台和子台 k 。

对于包含次声信号的数据记录 $y_k(t)$,扣除子台 k 与中心子台间的信号延迟,将各子台记录数据叠加到中心子台并取平均,获得信噪比增强的台阵聚束数据^[19]:

$$x(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t + t_k). \quad (12)$$

对于次声信号检测而言,事先不能确定是否有次声信号抵达监测台阵。即使有信号,也可能因信号能量弱而淹没在背景噪声中,且信号到达时刻、信号源方位等也正是信号检测所要解决的问题。

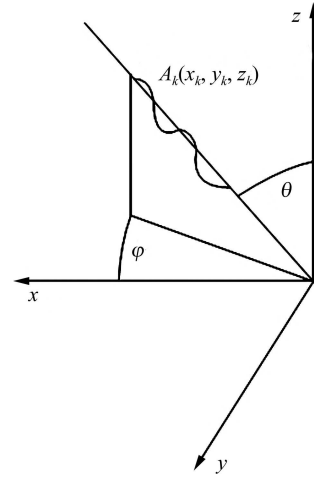


图 4 入射次声信号示意图

次声源通常位于地表或大气层中,可来自任何方位。因此,方位角 φ 介于 $0^\circ \sim 360^\circ$,入射角 θ 应该介于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。以 $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 分别为方位角 φ 和入射角 θ 的最小增量单位,全方位扫描,构建台阵的监测信号序列 $\{x_{i,j}(t)\}$:

$$x_{i,j}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t + t_k^{i,j}), \quad (13)$$

其中, $t_k^{i,j}$ 是将方位角 $\varphi_i = i\Delta\varphi$ 和入射角 $\theta_j = j\Delta\theta$ 代入式 (10) 和式 (11) 计算出的信号延时。对于所有 $x_{i,j}(t)$ 使用式 (6) 构造信噪比函数 $X^{i,j}(t)$,其中信噪比为式 (6) 结果减 1,比较信噪比函数峰值,当 $\text{MAX}\{\text{MAX}(X^{i,j})\} \geq M$ 时,认为台阵在指定时间段内可能监测到了次声信号。 M 是根据经验而定的台阵信号检测阈值。假定:

$$X^{I,J} = \text{MAX}\{\text{MAX}(X^{i,j})\}, \quad (14)$$

且

$$X^{I,J} > M, \quad (15)$$

则相应的 $\varphi_I = I\Delta\varphi$ 和 $\theta_J = J\Delta\theta$ 即为次声波信号入射的方位角和入射角^[20]。对于相应的 $X_{I,J}(t)$ 使用单通道信号检测算法,进一步确定判别信号并确定到时。

2 实验分析

2.1 典型次声信号检测

2009/11/28 07:20:37(UTC), 在哈萨克斯坦 Kara-Zhyra 露天煤矿进行了一次采矿爆破, 爆破使用了 54193 kg 炸药, 爆点位于 (50.018323°N, 78.726551°E), 全球数 10 个科研机构和国际组织对该事件进行了分析比对。国际监测系统 IMS^[21] (International Monitoring Centre) 中编号为 I46RU 的次声台站记录到了该次事件产生的次声信号。I46RU 次声监测台站位于俄罗斯扎列索沃 (53.948°N, 84.819°E), 由 4 个监测子台组成, 距爆炸源约 608 km。图 5 上图为 I46RU 台站记录数据经 0.5~2 Hz 滤波的波形, 经分析确定 I46RU 台站共记录到 6 个次声信号, 依次标记为 I1 至 I6, 各信号到时如表 1 所示。其中 I1 信号在低频滤波时不明显, 使用 2~5 Hz 高频滤波时可分辨信号。

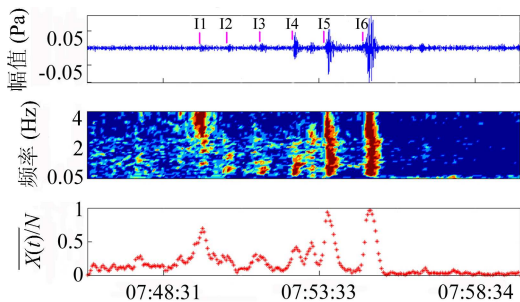


图 5 TFSES 次声信号检测结果, 上图为 0.5~2 Hz 滤波的波形数据; 中图为 $X_l(t)$ 在时频空间分布。其中, T_s 为 8 s, T_n 为 600 s, 时窗滑动时长为 3 s, 在 0.05~4.95 Hz 范围内, 划分 48 个带宽 0.1 Hz 滤波频带, 各频带信号判定阈值 L 为 1.25; 下图为 $\overline{X(t)}/N$, 当比值大于 0.5 判定为次声信号。

图 5 中、下分别为 07:46~08:00 时间段内 TFSES 检测时 $X_l(t)$ 和 $\overline{X(t)}/N$ 分布。很明显, 在 07:49:30~07:55:30 之间存在次声信号。信号 I1 到时在 07:49:30~07:50:00, I6 到时在 07:55:00~07:55:30, 与实际情况完全相符。TFSES 方法可以有效检测出了 I1, I4, I5, I6

四个次声信号, 且 I3 可分辨。上述数据采用著名的 PMCC 检测时, 如图 6 所示, 能检测出 I4, I5, I6 三个信号。由于 PMCC 检测时至少需 3 个子台同时监测到具有较高相关性的次声信号, 而信号 I1 至 I3 仅被个别子台记录或是信号能量较低, 不满足 PMCC 检测条件。从检测结果对比可以看出, TFSES 方法能从噪声中识别出能量较弱的 I1 信号, 说明该方法次声信号检测敏感度较高。由于实验中 TFSES 检测采用了滑动参考背景数据, 当信号时窗位于 I2 信号时, 参考背景数据中由于叠加了 I1 信号, 导致参考背景噪声水平高于实际值, 从而降低了 TFSES 检测性能, 若采用固定参考噪声, 则能避免这一缺陷。

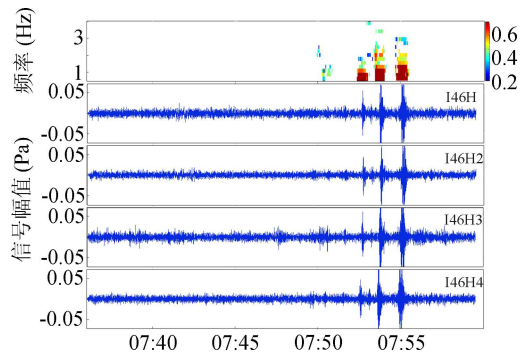


图 6 I46RU 台站 07:36~08:00 时间段 PMCC 检测结果, 其中信号 I4, I5, I6 的通道间相关系数大于 0.7, 信号 I2 通道间相关系数最大仅为 0.4, 小于常用检测阈值 0.5。PMCC 检测信号时窗 45 s, 时窗滑动时长 3 s。

2.2 平稳背景噪声条件下的次声信号检测

国际监测系统中 I32KE 次声台站 (位于肯尼亚内罗毕) 在 2010 年 7 月 2 日记录的次声数据具有相对平稳的背景噪声, 利用 PMCC 与 TFSES 两种方法进行对比检测。图 7 为 00:30~03:50 次声数据 PMCC 检测结果, 经分析仅确认两个真实次声信号 (图 7 方框内), 其余 9 个检测结果经波形分析与时频分析确认与背景噪声无差异, 判断为虚假检测, 该段数据 PMCC 的虚检率为 81.8%。

表 1 I46RU 台站记录次声信号到时

台站	声相	源距 (°)	信号到时 (UTC)	信号走时 (s)
I46RU	I1	5.4	2009-11-28 07:49:32	1734
I46RU	I2	5.4	2009-11-28 07:50:32	1794
I46RU	I3	5.4	2009-11-28 07:51:34	1857
I46RU	I4	5.4	2009-11-28 07:52:37	1920
I46RU	I5	5.4	2009-11-28 07:53:42	1985
I46RU	I6	5.4	2009-11-28 07:54:54	2057

图 8 为 TFSES 检测结果, 图中指示有两个真实检测信号, 未出现任何虚假检测, TFSES 方法在处理具有平稳背景噪声水平的次声监测数据时, 较之 PMCC 相关法具有更好的信号检测性能, 能保证真实信号的正确检测, 并抑制虚假检测信号。

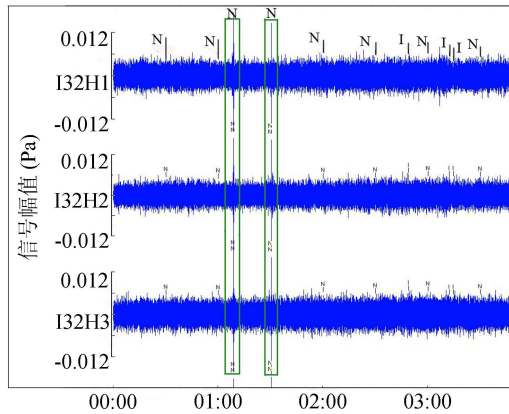


图 7 2010/7/2 00:00~03:50 次声数据及 PMCC 检测结果 (1~3 Hz 滤波)

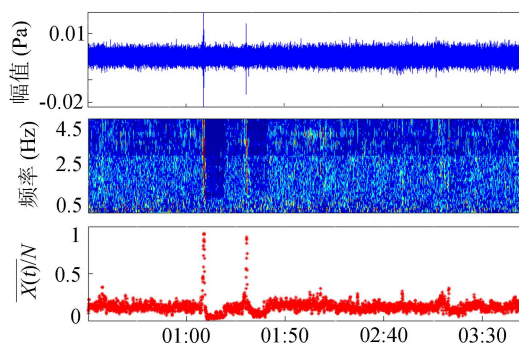


图 8 2010/7/2 00:30~03:50 次声数据 (1~3 Hz 滤波) 及 TFSES 检测结果, 检测参数与图 5 相同。

2.3 高背景噪声条件下的次声信号检测

对复杂监测数据, 尤其是背景噪声变化剧烈或次声信号淹没在噪声中的次声信号检测能力, 是评估信号检测方法适用性的重要依据之一。I31KZ 国际次声台站记录的 2010/7/5 21:00~24:00 次声数据具有较高的背景噪声水平且变化剧烈, 21:38, 22:32, 22:59 等时刻的次声信号几乎淹没在噪声中, 图 9(上、中两图) 为 I31KZ 台站两个不同子台记录的波形数据, 上图中三个次声信号完全淹没在背景噪声中, 中图 21:38 时刻信号无法有效分辨。

图 9(下) 为 TFSES 检测结果, 三个次声信号从背景噪声中有效分离, 且未出现大量虚检信号, 检测性能稳定。图 10(上) 为相同次声数据 PMCC 检测结果, 该方法未能检测出 21:38 时刻信号, 且有多多个虚假检测, 虚检信号数明显多于图 9 所示的 TFSES 结果。

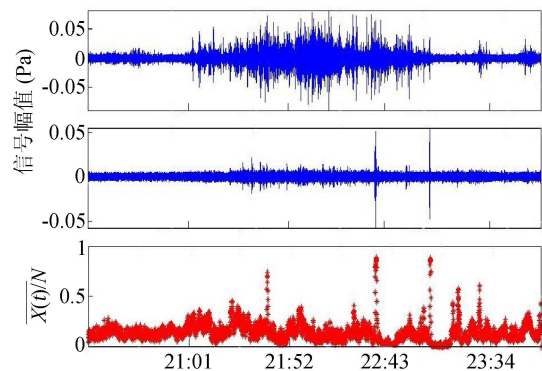


图 9 I31KZ 次声台站不同子台记录的高背景噪声波形数据 (1~2 Hz 滤波) 及 TFSES 检测结果 (下图), 检测参数与图 5 相同。

2.4 次声信号检测原理比较

PMCC 检测信号的基本过程是: 对次声台站不同子台记录的数据, 截取指定时窗长度次声数据滤波后, 将子台按一定顺序两两组合, 计算子台间的波形相似性, 当大于相似性阈值的组合数大于子台组合阈值时, 认为该时频空间内存在次声信号。而 TFSES 检测信号依据记录信号能量的起伏, 若监测数据只包含噪声, 其能量应是平稳的; 当叠加次声信号时, 在信号能量分布频率范围内总能量增加, 即在能量分布上与背景噪声形成差异。反映到 TFSES 检测方法中, 即在一定数目的时频格点内能量水平明显高于参考背景噪声。

PMCC 虚检率高由三方面因素造成: (1) 未从能量分布角度对信号与噪声进行限制, 图 11 为国际次声监测系统 I32KE 次声台站 2011 年监测数据利用 PMCC 方法检测结果统计, 全年检测结果中“N”相噪声 30282 个, “I”相次声信号 2473 个。由图 11(a) 检测信号数随 SNR 分布可知, 相当一部分检测结果的 SNR 小于 1。(2) 未考虑次声信号的频域分布, 次声信号的频率范围在 0.001~20 Hz 之间, 通常关注的爆炸、火山喷发、火箭发射等次声信号均具有一定的频率覆盖范围。图 11(b) 中的检测信号数量与带宽关系表明, 次声信号较之噪声具有较宽的频带, 其中 50% 以上的“I”相信号带宽在 2 Hz 以上; 65% 以上的“N”相噪声带宽小于 1 Hz。(3) 为尽量检测出次声信号, PMCC 方法设置了较低的互相关阈值这一关键检测参数。从图 11(c) 和图 11(d) 可以看出检测信号的最小互相关系数小于 0.2, 在所有检测结果中, 53.9% 的检测信号互相关系数小于 0.5; 而“N”相噪声的互相关系数在 0.2~0.7 之间具有较均衡的分布, 通常情况下相关性小于 0.5 的检测信号可靠性较低。

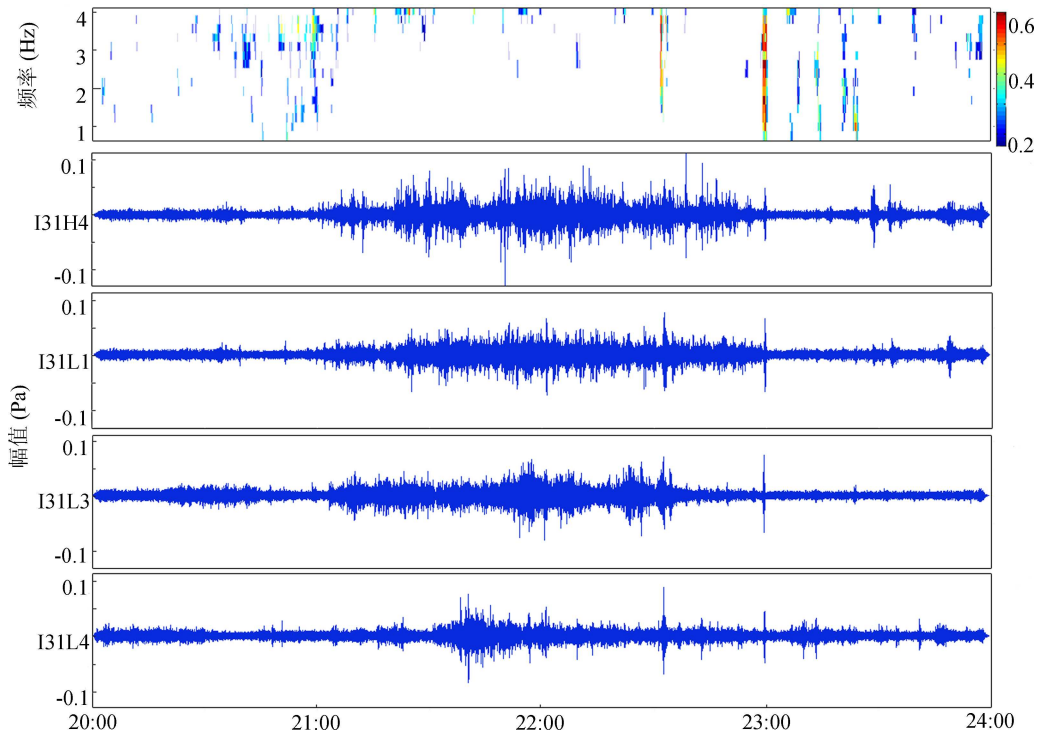


图 10 PMCC 检测结果与 I31KZ 台站部分子台波形数据 (1~2 Hz 滤波), 信号时窗 60 s, 时窗滑动时长 3 s。

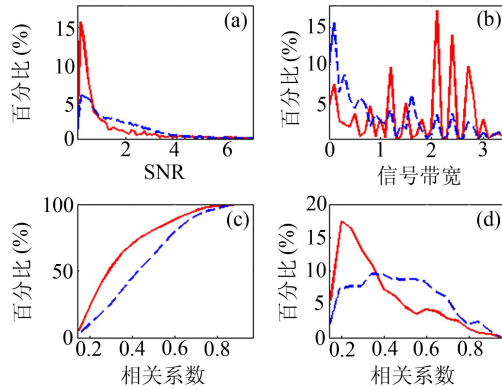


图 11 PMCC 检测的“T”相信号(实线)与“N”相噪声(虚线)参数比较。(a) 为检测次声信号数随 SNR 分布;(b) 为检测次声信号数随带宽分布;(c) 信号累积数随归一化相关系数变化规律;(d) 为检测信号数随相关系数分布。

TFSES 与 PMCC 两种方法均需进行多频带滤波, 在信号时窗滑移长度相同的前提下, TFSES 运算效率主要取决于不同频带下 $\overline{X(t)}$ 的运算速度, 并与滤波频带数 N_1 成正比; 而 PMCC 由于需构建信号检测子网络 (三个以上子台组成), 其运算效率与滤波频带数 N_2 及子网络组合数 C 之积 ($N_2 \times C$) 成正比, 通常情况下 PMCC 检测时需设置多种子网络组合, 因此 $N_2 \times C$ 与 N_1 相当, 当台站子台数较多时, $N_2 \times C$ 甚至为 N_1 的数倍, 从本文实例运行效率来看, 两种方法的运算效率差别不大。

TFSES 通过次声信号分频、台阵信号聚束、延

长噪声时窗等技术手段抑制了台站的随机噪声, 从而提高了次声信号的时频可分辨性; 结合噪声频带较之次声信号狭窄的特点, 进而减少虚假检测。除近距离直达次声信号或地面耦合信号在不同子台的到时呈梯次分布外, 一般情况下, 子台间的次声信号到时差在数秒以内; 而对于噪声, 在各子台间不具有相干性, 且由于台址的差异, 各子台记录的噪声在时域各不相同, 如图 12 中 I31KZ 台站 H1、H2、L1 子台监测数据所示, 其中上图为聚束波形。

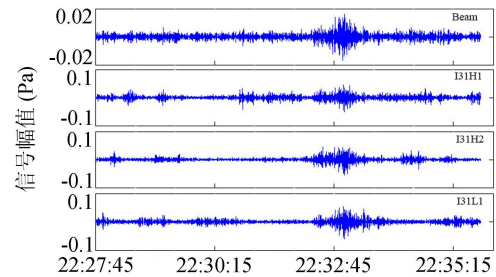


图 12 聚束波形与各子台监测波形比较

对于拥有 N 个子台的次声台站, 通过聚束处理可抑制个别子台高背景噪声对信号检测结果的影响, 在聚束结果中, 该噪声的幅值被抑制为 $1/N$ 。对于部分信号初至不明显或波形数据相似性较差的情况, 考虑到子台间信号延迟时间远小于整个信号持续时间, 因而可简化聚束过程, 直接计算各子台数据的平均值并作为待检测数据, 图 13 为聚束数据、I31H1 与 I31L1 数据经 1.5~4 Hz 滤波后, 计算的 STA/LTA,

可以看出聚束后,背景噪声变化较为平滑,消除了个别子台瞬时强噪声对检测结果的影响,因而确保 TFSES 方法的检测性能。

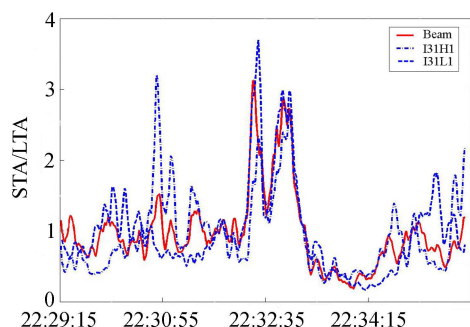


图 13 STA/LTA 比较, 信号时窗为 2 s, 背景噪声时窗为 90 s。

3 总结

本文针对 STA/LTA 与 PMCC 两种次声信号检测方法的缺陷,提出了一种采用时频域信号能量统计的次声信号检测算法。研究表明,通过聚束与波形带通分频,有效地抑制了台站背景噪声;同时,结合信号与噪声频率分布差异的特点,使得 TFSES 具有较好的次声信号检测性能并降低了误检率。平稳背景噪声水平时利用 TFSES 方法能显著降低次声信号虚检率;当背景噪声变化剧烈时,选择合理的检测参数,TFSES 仍能从高背景噪声中检测出次声信号,且检测性能稳定,若考虑波形相似性,则能进一步改善该方法的检测效果;由于 TFSES 方法的前提是次声信号具有较宽的频带,因此,对窄频带分布的次声信号检测能力相对较差。

参 考 文 献

- 1 Le Pichon A, Guilbert J, Vallee M *et al.* Infrasound imaging of the Kunlun Mountains for the great 2001 China earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 2003; **30**(15): 1814
- 2 Alexis Le Pichon, Elisabeth Blanc, Alain Hauchecorne. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. New York: Springer, 2010: 108—112
- 3 刘俊民,唐伟,王晓民等.次声信号产生机理与特征分析.环境工程, 2010; **28**(4): 92—96
- 4 谢金来,谢照华.大气核爆炸次声监测系统.核电子学与探测技术, 1997; **17**(6): 408—410
- 5 宋知用,屠焰.均匀长管阵的特性及其在次声接收中的应用.声学学报, 1982; **7**(2): 99—109
- 6 Alexis Le Pichon, Milton Garces, Elisabeth Blanc *et al.* Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *Acoustical Society of America*, 2002; **111**(1): 629—640
- 7 杨训仁.台风次声射线寻迹.声学学报, 1981; **6**(1): 1—8
- 8 苏伟,楼海,袁松勇.云南腾冲火山地区地震、次声台阵建设.国际地震动态, 2010; **5**: 26—33
- 9 唐伟,刘俊民,王晓民等.互相关算法在次声监测数据处理中的应用.环境工程, 2010; **28**(6): 83—86
- 10 Cansi Y. An Automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method. *Geophys. Res. Lett.*, 1995; **22**(9): 1021—1024
- 11 Kulichkov S N, Chulichkov A I, Demin D S. On experience in using the method of morphological data analysis in atmospheric acoustics. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011; **47**(2): 154—165
- 12 刘林,郝保国.时频分析理论和应用.计算机自动测量与控制, 2001; **9**(4): 44—46
- 13 张绪省,孙金玮,赵新民.用时频分析方法分析非平稳信号.宇航计测技术, 1995; **15**(5): 34—41
- 14 吴富梅,张晓东.几中不同时频分析方法对 INS 信号的分析 and 比较.测绘科学技术学报, 2010; **27**(2): 92—96
- 15 蔡希玲,吕英梅.地震数据时频分析与分析处理.勘探地球物理进展. 2005; **28**(4): 265—270
- 16 刘喜武,刘洪,李幼铭等.局域波分解及其在地震信号时频分析中的应用.地球物理学进展, 2007; **22**(2): 365—375
- 17 戴延中,李志舜.时频分析在宽带信号检测中的应用.船舶工程, 2001; **23**(4): 45—64
- 18 林盛,吴峰,李衍达.相干干扰滤除——倾斜滤波法. CPS/SEG/EAGE 北京 98 国际地球物理会议,北京, 1998
- 19 Park J C, Neelakanta P S. Active control of acoustical beamforming with an electrode array on a piezoelectric rubber composite. *Acoustical Society of America*, 1993; **93**(6): 3519—3521
- 20 刘小刚.基于四元十字阵的声被动定位研究.南京理工大学硕士学位论文, 2005
- 21 张利兴,王旭辉,夏兵等.禁核试核查技术导论.北京:国防工业出版社, 2005: 4—6