

地震信号处理中相位匹配滤波器的设计

周青云^{1,2}, 何永峰², 靳平², 廖桂生¹

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:相位匹配滤波器是一组线性滤波器, 它的傅里叶相位与被检测信号的傅里叶相位相等。本文阐述了相位匹配滤波器的基本原理, 并根据已获得的特定路径的频散曲线完成了理论设计, 实现了对小震级事件面波信号的检测。使用该相位匹配滤波器对内华达地区的18次核爆事件的面波信号进行检测并计算了面波震级, 与ISC公报给出的面波震级比较, 相对误差很小。证明了本设计对面波信号的检测是有效的, 并且可提高小震级面波信号的信噪比。

关键词: 相位匹配滤波器; 面波检测; 地震信号; 震级

中图分类号: P315.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)02-0114-05

Design of Phase-matched Filter in Seismic Signal Processing

ZHOU Qing-yun^{1,2}, HE Yong-feng², JIN Ping², LIAO Gui-sheng¹

(1. Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. North-west Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The phase-matched filters are defined as a group of linear filters in which the Fourier phase of the filter is made equal to that of a given signal. In this article, the fundamental theory of phase-matched filters is described in detail, and on the basis of the given path dispersion curve the design of phase-matched filter is finished in theory. Finally, an effective method working on weak surface wave signals is developed. To test the validity of the method, it is applied to a set of nuclear explosions occurred on the Nevada Test Site and the magnitudes of these events are estimated. From comparing the M_s obtained from the method with ones reported by ISC (International Seismological Centre), it is proved that the relative error is small, the design is effective to detect surface wave signal, and the signal-to-noise rate of weak surface wave signals can be enhanced.

Key words: Phase-matched filter; Detection of surface wave; Seismic signal; Magnitude

0 引言

在地震核查工作中研究一种有效检测和识别小当量核爆事件的方法是非常有意义的。识别核爆和地震事件一种常用的方法是体波震级(M_b)与面波震级(M_s)之比。对于相同体波震级的两个事件, 浅源地震事件通常要比核爆事件产生的面波信号能量要大, 波形较丰富, 因此面波震级要大于同当量的核爆面波震级。对于体波震级大于4.5级的事件, 在区域地震台站上记录到的面波信号具有足够大的信噪比, 可以很容易地测量面波振幅, 从而可计算出面

波震级 M_s ; 但对于小于4.5级的事件, 在区域地震台站上面波信号变弱或被其它信号淹没, 无法用常规的方法(20 s周期)测量面波振幅, 因此以上方法对小震级事件无法生效。为了克服这一不足, 提出了许多改进的方法, 其中有在特定频率范围内的短周期体波与长周期面波最大振幅比^[1]、主事件相关分析方法^[2]、峰值谱^[3]等方法, 但这些方法在进行面波检测时仍存在一定的局限性。

本文将相位匹配滤波器技术^[4]应用于面波信号的检测中。相位匹配滤波器是一组线性滤波器, 该

组滤波器的傅里叶相位与给定信号的傅里叶相位相同。在地震测量中,由震源产生的面波信号经过地球介质的传播,在接收点记录到一组随着到时的先后(因传播速度不同)各相位的周期逐渐改变的波列,称为面波的频散特性。在频域这种频散特性主要表现在接收点信号与震源信号之间存在一个相位差。本文通过已得到的特定地区的频散曲线设计相位匹配滤波器,使它的傅里叶相位与以上相位差相等,从而在接收端去掉因频散引起的相位变化,在时域达到提高面波信号信噪比,实现面波检测的目的。

1 相位匹配滤波器的设计

1.1 基本原理

设在具有频散特性的地球介质表面上有 A、B 两个点, A 点是面波信号激励点, B 点是信号的接收点, 两点间的距离为 D ; 并设 $f_A(t)$ 和 $f_B(t)$ 分别是发射和接收到的信号, 对应的傅里叶变换分别为 $F_A(\omega)$ 和 $F_B(\omega)$, ω 为角频率。为了便于理论计算, 假定面波从 A 点经 D 距离到达 B 点其面波的能量不损失, 即振幅不变, 而且 A、B 两点信号的差异完全是因频散作用引起的, 则应有下列关系式成立:

$$F_B(\omega) = F_A(\omega) e^{-j[\Phi_B(\omega) - \Phi_A(\omega)]} \quad (1)$$

$$|\Phi_B(\omega) - \Phi_A(\omega)| = \omega \cdot \frac{D}{V_R(\omega)} \quad (2)$$

其中 $\Phi_A(\omega)$ 和 $\Phi_B(\omega)$ 分别是信号 $f_A(t)$ 和 $f_B(t)$ 的绝对相位, 随频率而变; $V_R(\omega)$ 是面波从 A 到 B 的传播相速度, 也是频率的函数, 即通常所说的频散曲线。本文是通过已知 A、B 两点面波信号的频散曲线, 由式(2)来计算由于频散引起的 A、B 两点之间的绝对相位差 $\psi(\omega)$ 。若 $\psi(\omega) = |\Phi_B(\omega) - \Phi_A(\omega)|$, 则在 B 点可完全去除因频散引起的相位变化, 这是一个理想情况。在实际的面波检测中要不断地校正 $\psi(\omega)$, 使它与真实的相位差 $|\Phi_A(\omega) - \Phi_B(\omega)|$ 最接近, 则利用下式可去除在 B 点接收到的信号中因频散引起的相位变化:

$$F'_B(\omega) = F_B(\omega) e^{j\psi(\omega)} \quad (3)$$

上式在时域表现为因频散引起的被拉长的记录信号在时间轴的压缩, 从而提高了面波信号的信噪比, 最终实现面波检测的目的。

1.2 理论设计

设 A 点有一任意瞬态激励信号 $f_A(t)$ (图 1(a)), 其解析形式

$$f_A(t) = \cos[(0.05 + e^{1.5(t-10)/25})t] \cdot \sin[\pi(t-10)/25] \quad (4)$$

假设从 A 点到 B 点的频散曲线为一线性变化曲线(图 1(b)), 如果 $f_A(t)$ 经距离 D 到达 B 点, 波形的变化纯粹是由频散而引起的, 则 B 点的频域信号

$$F_B(\omega) = F_A(\omega) \cdot e^{-j\omega D/V_R(\omega)} \quad (5)$$

从 B 点的接收信号中可以看出(图 1(c)), 通过距离 D 的传播, 信号在时间轴上明显被拉长。为了更接近真实的面波接收信号, 在 B 点加入噪声信号(图 2(a))。本文根据已知的频散曲线设计一个相位匹配滤波器, 从接收到的信号中去除因频散而引起的变化, 使它尽量回复到原始的激励信号。滤波器的振幅谱通常取为 1, 并且是偶对称^[4]。假设的 A 点信号记录长度为 100 s, 其采样率为 0.200 4/sps; 该系统的折叠频率为 2.5/Hz, 所以在设计时最高频率设为 2.0/Hz, 根据公式 $\psi(\omega) = |\Phi_B(\omega) - \Phi_A(\omega)| = \omega \frac{D}{V_R(\omega)}$, 在已知频散曲线 $V_R(\omega)$ (图 1(b)) 和震中距 D 的情况下, 可以求出绝对相位差 $\psi(\omega)$, 并且滤波器的相位谱是奇对称^[4](图 1(d)、(e))。

根据公式(3), 就可以得到经相位匹配滤波器压缩后的 B 点信号(图 2(b)), 可以看出面波的信噪比得到了一定的提高。在此基础上对 B 点的时域信号加汉宁窗(图 3(a)), 抽取有用信号, 去掉噪音和其它无用信号。加窗处理后重新回到频域, 利用相位展开技术获得此时信号的相位差 $\psi'(\omega)$ 对原有滤波器的相位进行校正, 获得滤波器新的相位 $\psi(\omega) - \psi'(\omega)$ 。根据公式(3)对 B 点的信号在频域重新进行压缩, 反回到时域, 直到获得一脉冲激励信号(图 3(b))。本方法大大的提高了信号的信噪比, 进而实现面波的检测。

2 相位匹配滤波器的实际应用结果

在实际应用相位匹配滤波器时, 假定被检测信号在特定传播路经下的群速度曲线 $U(\omega)$ 和相位匹配滤波器的振幅谱 $F(\omega)$ 是已知的, 本文在感兴趣的周期范围(0~50 s)内取 $F_p(\omega) = 1$ 。图 4 是相位匹配滤波器的计算机流程图。在已知事件震中距的情况下, 根据 1.1 小节中的公式就以计算出去频散或压缩后的信号 $s(t)$:

$$s(t) = \pi^{-1} \text{Re} \int_{\omega_0}^{\omega_1} S(\omega) \exp[i\omega t - i\psi(\omega) + i\psi(\omega)] d\omega$$

需要指出的是在求相位谱校正项 $\psi(\omega)$ 时, 我们忽略了一个重要的细节, 没有计算 $k_0(\omega_0)$ 项, 而该项关系到 $U(\omega)$ 在 $\omega = 0$ 时的值, 在实际工作中, 我们只需要估计频率大于某一最小值的 $U(\omega)$ 值, 并

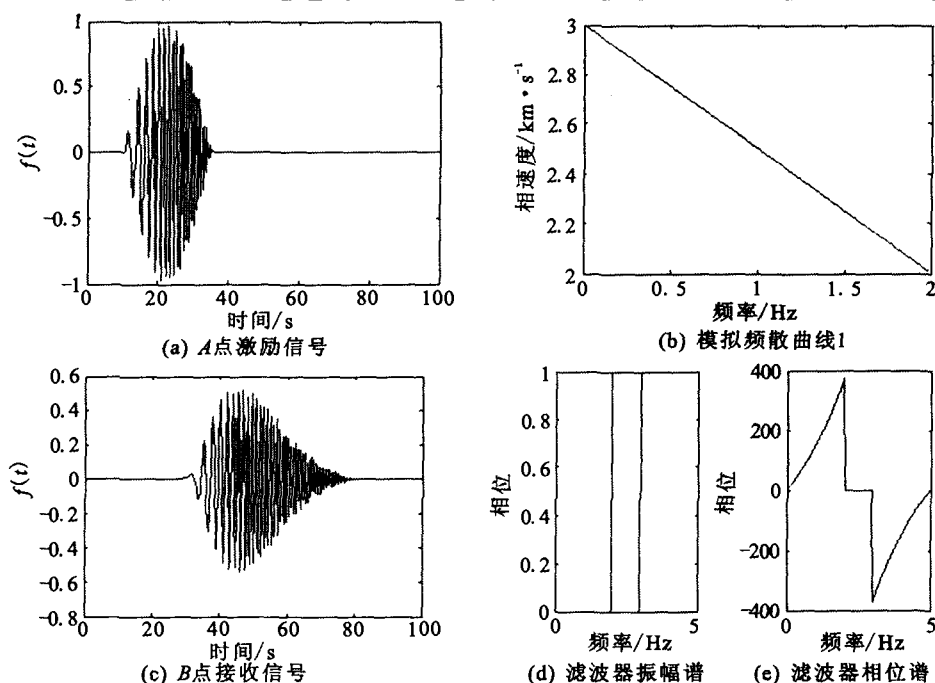


图1 相位匹配滤波器的理论设计

Fig. 1 The design of phase-matched filter in theory.

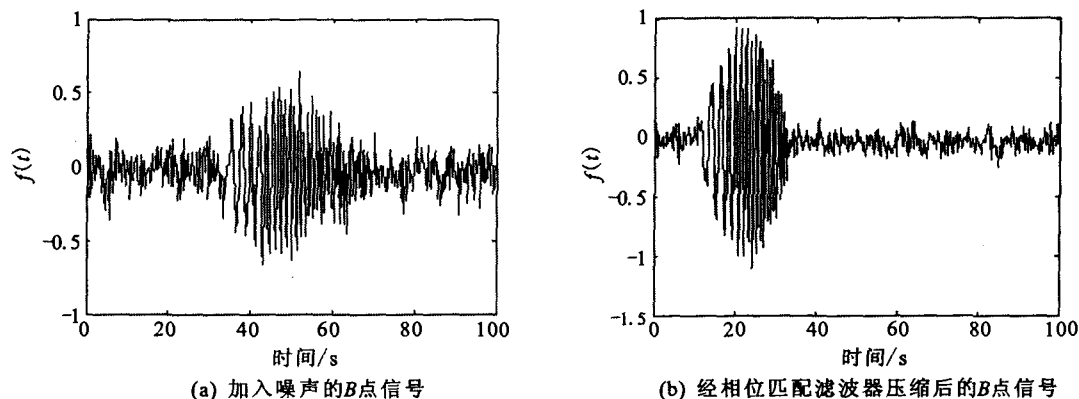


图2 理论面波压缩信号

Fig. 2 Compressed surface wave signals in theory.

且也无法估计到 $\omega = 0$ 时的 $U(\omega)$ 值,但是我们知道 $k_0(\omega_0)\Delta$ 对 $\Psi(\omega)$ 的影响是一个未知的常数,该常数对最终检测信号的影响是在时间轴上有一个偏移,这对面波信号幅值的测量是不影响的,因此在本文中 $k_0(\omega_0)\Delta$ 的影响是可忽略的。

2.1 相位匹配滤波器的检测实例

本文选用了发生在内华达地区的一次核爆事件作为被检测信号。该次核爆发生于1984年01月31日15点30分,其震级为4.1,资料来自区域台站ANMO和LON的记录,本文选用了长周期垂向分量所记录的数据。图5是没有经过仪器响应校正的原始记录波形。由于事件震级较小,瑞利波信号被噪声和其它信号所淹没,用普通带通滤波器无法检

测出瑞利波信号。通过已获得的以上两个台站的频散曲线,设计相位匹配滤波器对原始波形进行压缩,图6是最终获得的瑞利波检测信号。从图中可以看出经过相位匹配滤波器处理后,提高了面波的信噪比,实现了对微弱信号的面波检测。

在抽取压缩信号时,采用了以压缩信号的最大幅值为中心具有一定宽度的时间窗,如何选择该时间窗的宽度非常重要,它既要包括由于观测频散曲线与真实频散曲线之差引起的压缩信号的宽度,又要去掉我们不感兴趣的信号,在本文中这一宽度主要是通过处理过程中的人机对话加以确定的。

2.2 相位匹配滤波器检测效果验证

最后,将压缩得到的信号利用反相位匹配滤波

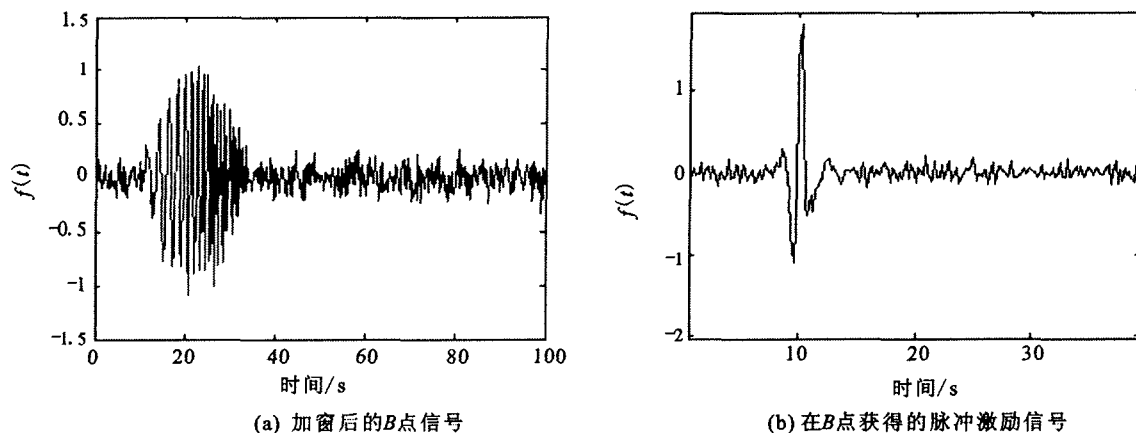


图 3 理论面波检测信号

Fig. 3 Detection of surface wave signals in theory.

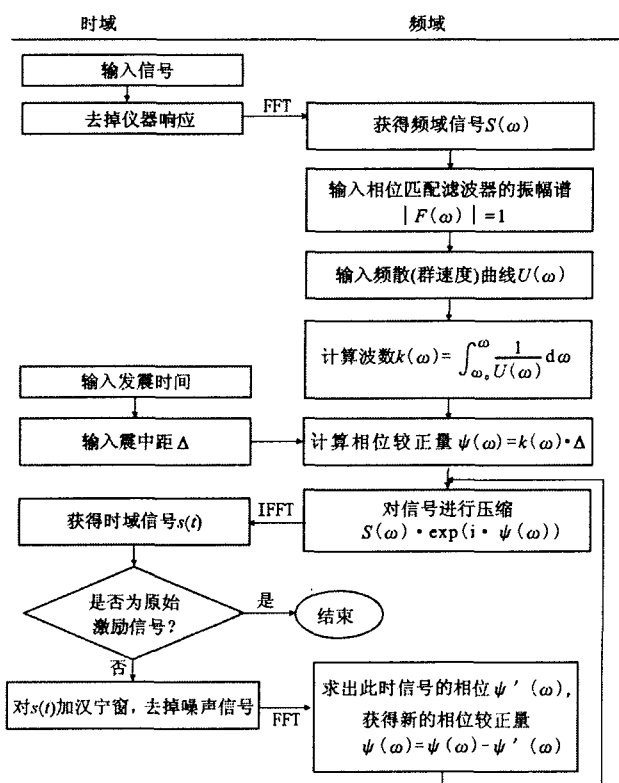


图 4 相位匹配滤波器的计算机流程图

Fig. 4 The flow chart of computer code used in the phase-matched filter.

器重新在时域展开,测量面波的最大幅值,根据有关公式计算面波震级。为了验证相位匹配滤波器的检测效果,文中选用了发生在内华达地区的 18 次核爆事件(表 1),用相位匹配滤波器对其面波信号进行检测,然后根据 Rezapour 和 Pearce [5] 在 1998 年提出的如下区域面波震级计算公式,计算了以上核爆事件 20 秒周期的面波震级,在本文中用 M_s^{R+P} 表示:

$$M_s = \log \frac{A}{T} + \frac{1}{3} \log(\Delta) + \frac{1}{2} \log(\sin(\Delta)) + 0.0046 + 2.370 \quad (6)$$

式中 A 是面波信号单峰值,单位为 nm ; T 是面波信号周期,单位为 s ; Δ 是事件震中距,单位是度。该公式已经被 IDC(International Data Center)采纳,用以计算面波震级 M_s 。计算震级与 ISC 公报中公布的面波震级的比较见表 1。

从上表中可以看出,通过相位匹配滤波器检测获得的面波信号震级与 ISC 公报给出的面波震级很接近,大多数事件的以上两项面波震级误差在 ± 0.5 范围之内,只有个别事件的面波震级误差比较大,这可能是由于 ISC 给出的是台网震级,而本文中计算的是单台面波震级,因此个别事件的以上两项面波震级误差较大是合理的。从表 1 的比较结果可以得出,相位匹配滤波器可提高面波信号的信噪比,实现对微弱面波信号的检测。

3 小结

本文详细介绍了相位匹配滤波器的基本原理及设计方法,用于检测周期在 10~50 s 小震级事件面波信号。文中将这一方法用于发生在内华达地区的一系列核爆事件中,在 ANMO 和 LON 两台站上获得的面波幅值检测结果用于面波震级计算,该面波震级计算结果与 ISC 公报中公布的面波震级进行比较,结果表明通过该方法可提高面波信号的信噪比,实现对微弱面波信号的检测。但是,面波信号的检测结果与观测频散曲线的精度有直接关系,如果观测频散曲线与真实频散曲线很接近,通过相位匹配滤波器可完全去掉频散的影响,得到较理想的脉冲激励信号,因此观测频散曲线的精度对最终的面

表 1 内华地区面波震级计算比较

日期	时间	纬度/°	经度/°	M_b	M_s -HFS	M_s -NEIS	$M_s^{R+P}(20)$ ANMO	$M_s^{R+P}(20)$ LON
1981-11-12	14:59:50.00	37.1082	-116.0490	5.4	4.0	4.1	4.1	4.3
1982-01-28	15:59:53.00	37.0913	-116.0512	5.9	4.3	4.5	4.8	4.7
1982-05-07	18:17:00.00	37.0691	-116.0455	5.7	4.0	4.2	4.0	4.4
1982-06-24	14:14:59.00	37.2362	-116.3702	5.6	5.2 *	4.5	4.1	4.6
1982-08-05	14:00:00.00	37.0842	-116.0065	5.7	4.2	4.2	4.7	4.4
1984-05-01	19:05:00.00	37.1062	-116.0224	5.4	4.4	4.2	4.4	4.5
1985-06-12	15:15:00.00	37.2479	-116.4891	5.5	4.5	4.5	4.4	4.5
1985-09-27	14:15:00.00	37.0898	-116.0018	4.7	4.1	4.1 *	3.1	3.4
1986-04-10	14:08:30.00	37.2183	-116.1831	5.0	4.1	4.1 *	3.3	3.4
1986-04-22	14:30:00.00	37.2641	-116.4402	5.4	4.2 *	4.2	4.3	4.3
1986-06-05	15:04:00.00	37.0983	-116.0155	5.4	4.2 *	4.2	4.2	4.3
1986-09-30	22:30:00.00	37.3001	-116.3074	5.6	4.5 *	4.5	4.2	4.5
1986-11-14	16:00:00.00	37.1004	-116.0481	5.8	4.5	4.5	4.4	4.5
1987-04-18	13:40:00.00	37.2479	-116.5091	5.5	4.6 *	4.0	4.5	4.4
1987-04-30	13:30:00.00	37.2330	-116.4231	5.5	4.4	4.4	4.4	4.6
1987-08-13	14:00:00.00	37.0610	-116.0453	5.9	4.4	4.2	4.6	4.7
1987-09-24	15:00:00.00	37.2280	-116.3747	5.7	4.2	4.3	4.4	4.6
1988-08-17	17:00:00.00	37.2972	-116.3065	5.6	4.1	4.2	4.2	4.4

注：(1) 表中 HFS、NEIC、ISC 分别代表不同的作者确定的面波震级；
(2) 表中面波震级加上标“*”号表示公报中没有给出 HFS 或 NEIC 计算的面波震级时，用 ISC 计算出的面波震级代替。

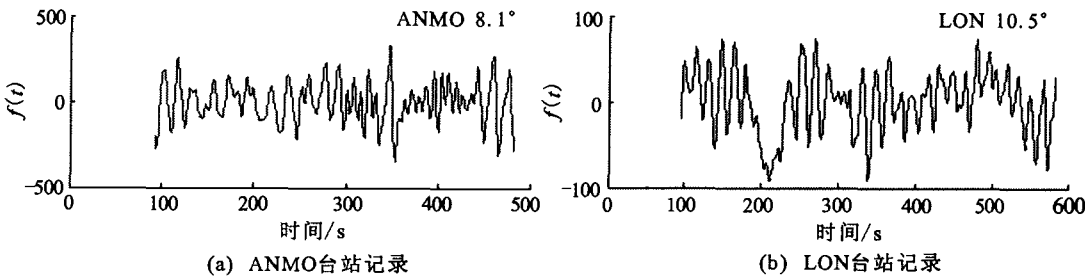


图 5 LZ 通道上记录的内华达试验场 1984 年 1 月 31 日的核爆炸事件
Fig. 5 The raw signals of nuclear explosion at Nevada test site on Jan. 31, 1984.

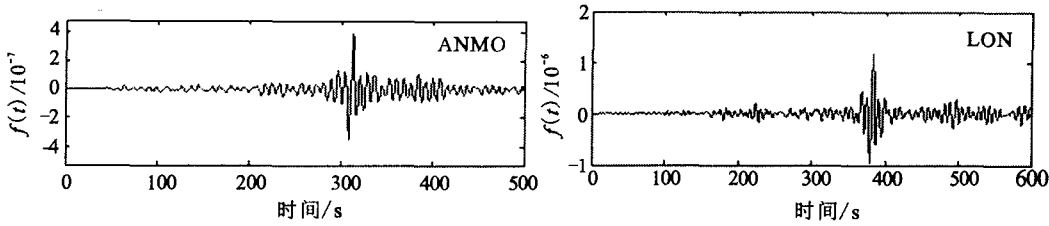


图 6 瑞利波最终检测结果
Fig. 6 The result of detection from the phase-matched filter.

波检测结果至关重要。

【参考文献】

[1] Baumgardt D R, Young G B. Regional seismic waveform discriminants and case-based event identification using regional arrays[J]. Bull. seism. Soc. Am., 1990, 80 (Part B): 1874-1892.

[2] Joswing M, Schulte-Theis H. Master event correlation of weak local earthquakes by dynamic waveform matching[J]. Geophys. J. Int., 1993, 113: 562-574.

[3] Bakun W H, Johnson LR. Short period spectral discriminants for explosions[J]. Geophys. J. R. astr. Soc., 1970, 22: 139-152.

[4] Herrin E, Goforth T. Phase-matched filters; application to the study of rayleigh waves[J]. Bull. seism. Soc. Am., 1977, 67(5): 1259-1275.

[5] Rezapour M, Pearce R G. Bias in Surface-wave Magnitude M_s due to Inadequate Distance Corrections[J]. Bull. seism. Soc. Am. 1998, 88: 43-61.