

文章编号:1673-5005(2013)01-0050-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.01.008

精密控制机械震源特征及信号检测方法

杨 微¹, 王宝善¹, 葛洪魁², 宋丽莉¹, 袁松湧¹, 李鸽翼³

(1. 中国地震局 地球物理研究所地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081;

2. 中国石油大学 非常规天然气研究院, 北京 102249; 3. 云南省大理州宾川县地震局, 云南 大理 671600)

摘要:基于精密控制机械震源(ACROSS)信号与石油工业上的常规可控震源的特征差异,对 ACROSS 信号进行互相关、短时相关、相干和反褶积等四种方法处理分析,并分别从重复性、走时剖面、频谱特征以及信噪比等方面对处理结果进行对比分析研究。结果表明:互相关方法处理结果稳定性好,能较好地突出高能量频率成分,但不适用于在频谱特征里能量相差较大的窄带信号分析;ACROSS 信号与环境背景噪声在频谱上有重叠,短时相关法会放大噪声的作用,其效果较相干和反褶积法显得略差一些;信噪比对相干和反褶积法处理结果的稳定性影响较大,相干和反褶积法适合于具有一定信噪比的 ACROSS 信号检测分析。

关键词:地球物理勘探;地震勘探;信号检测;精密控制机械震源(ACROSS);互相关;短时相关;相干;反褶积

中图分类号:P 315.0

文献标志码:A

Characteristics and signal detection method of accurately controlled routinely operated signal system

YANG Wei¹, WANG Bao-shan¹, GE Hong-kui², SONG Li-li¹, YUAN Song-yong¹, LI Ge-yi³

(1. *Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;*

2. *Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

3. *Binchuan Seismological Bureau, Dali Prefecture, Yunnan Province, Dali 671600, China)*

Abstract: Based on the different characteristics of the conventional vibroseis with accurately controlled routinely operated signal system(ACROSS), the ACROSS signal was processed by the cross-correlation, short-window correlation, cross-coherence and deconvolution. The comparative analysis on the processing results was carried out from repeatability, travel time profile, spectral characteristics, and signal-to-noise ratio (SNR). The results show that the cross-correlation method is characterized by good stability of processing results and can highlight the high-energy frequency components, but it is not applicable for analysis of the narrow frequency band signal with much difference in power spectral characteristics. There is an overlap in the spectrum of ACROSS signal and the ambient background noise. Short-window correlation can enlarge the role of the noise, and the effect of the processing is less than cross-coherence and deconvolution. The SNR has a great impact on the processing results of cross-coherence and deconvolution. The cross-coherence and deconvolution method are suitable for ACROSS signal detection with a certain SNR.

Key words: geophysical prospecting; seismic prospecting; signal detection; accurately controlled routinely operated signal system (ACROSS); cross-correlation; short-window correlation; cross-coherence; deconvolution

精密控制机械震源(accurately controlled routinely operated signal system, 以下简称 ACROSS)是

20 世纪 90 年代以来发展起来的一种新型可控震源^[1-7],该震源是利用两个相同的偏心轮,沿转动轴

收稿日期:2012-11-27

基金项目:十一五国家科技支撑计划“汶川地震断裂带科学钻探”;国家自然科学基金项目(41204047);中央级科研院所基本科研业务专项(DQJB11C04, DQJB12C09)

作者简介:杨微(1982-),男,助理研究员,博士研究生,主要从事主动震源探测方面的研究。E-mail:weiyang05@163.com。

作相反方向的不平衡圆周转动,合成垂直或水平方向的振动力产生地震波。俄罗斯、日本、美国和中国等利用其重复性好和精密可控等优点,应用于地壳结构探测、石油与天然气的开采、CO₂ 气体注入地层、地震断裂带等方面。目前 ACROSS 信号检测方法有很多,例如 Hasada 等^[1]采取“存否”倒谱技术, Alekseev 等^[2-3]采用互相关法, Ikuta 等^[4-5]采用相干法, Saiga 等^[6-7]采用反褶积法, Li 等^[8]采用维格纳-威利分布法 (Wigner-Ville distribution, WVD) 对 ACROSS 资料进行了处理和分析研究。上述方法各有其特点,其效果依赖于资料的频谱特性、信噪比、频带宽度等,为利用 ACROSS 进行地壳结构探测和地下介质变化的监测分析提供了技术手段。笔者简

要概述互相关、短时相关、相干和反褶积方法的基本原理,结合野外试验观测数据,对四种方法的处理效果和适用性开展对比分析研究。

1 常规可控震源与 ACROSS 特征

机械式人工震源具有操作简便、重复性好、可移动性强的优点,是陆地勘探中常用的震源之一,近年来也被应用于研究地下介质的变化^[9-14]。石油工业上的常规可控震源信号是等振幅的调频扫描信号,其显著特点是频带宽、激发信号频谱恒定。图 1(a)是中石油东方地球物理公司生产的 KZ-20 型可控震源激发的信号(扫描时间为 8 s,扫描频带 20~140 Hz)。

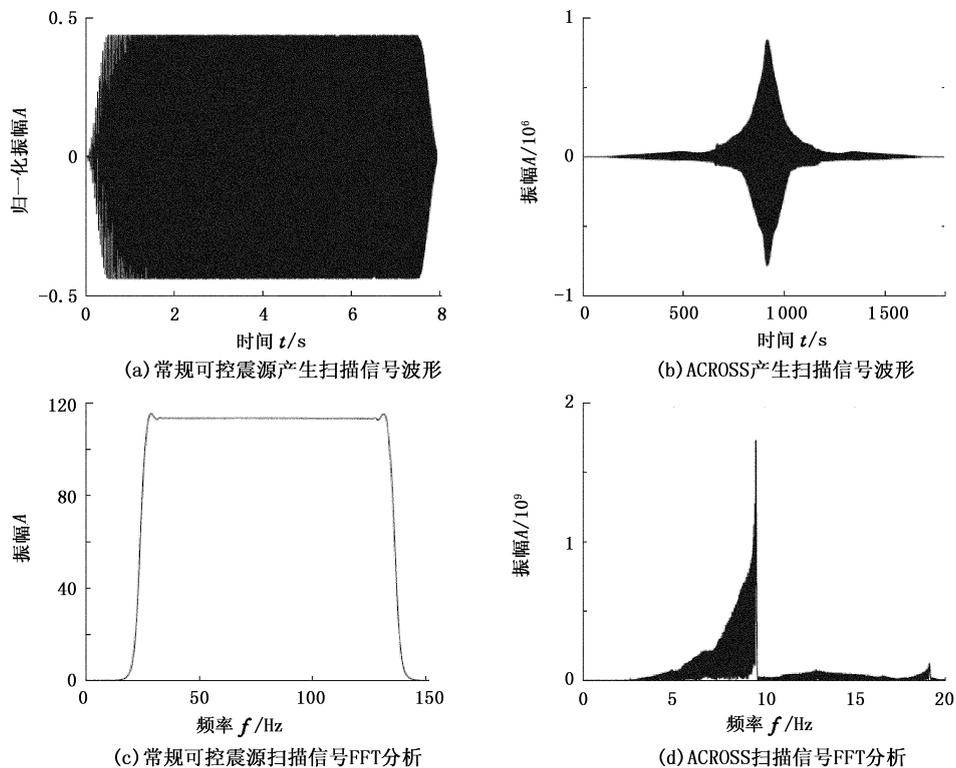


图 1 常规可控震源与 ACROSS 扫描信号波形及 FFT 分析

Fig. 1 Vertical records and amplitude spectrum analysis of vibroseis and ACROSS

从图 1(a)和(c)中可看出,扫描信号在时间域和频率域内的幅值基本不变。与常规可控震源相比(表 1),ACROSS 激发的能量在各扫描频点并非恒值,而是振幅随扫描频率增加呈二次方上升(图 1(b))。在产生冲击作用力相当的情况下,ACROSS 具有激发频率低、扫描频带范围窄(图 1(d))、有效信号传播距离远等特点,Alekseev 等^[1]利用 100 t 的 ACROSS 在 350 km 的探测距离上检测到了有效的深部信息。

表 1 常规可控震源与 ACROSS 特征对比

Table 1 Comparison of vibroseis and ACROSS characteristics

	常规可控震源	ACROSS
振动方向	垂直振动	垂直或水平振动
扫描方式	等振幅的调频扫描	振幅随频率的变化呈二次方改变
频带范围	6~250 Hz	2~10 Hz,当偏心体质量较小时,扫描频率可到几十赫兹
激发频率	高	低
传播距离	几百米~十多公里	几百米~上百公里

2 分析方法

常规可控震源扫描信号的自相关函数可近似为 Klauder 子波^[15],在数据处理上主要采用互相关检测技术,将长时间窗口的记录压缩为一个类似于短时脉冲信号。但是,ACROSS 与常规可控震源产生的扫描信号特征有差异,本文中给出连续扫描信号分析的其他方法,其中常用的有短时相关、相干和反褶积法等。

2.1 互相关法

合成地震记录的褶积模型为

$$x(t) = r(t) * s(t). \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为记录道; $r(t)$ 为地层响应;*表示褶积; $s(t)$ 为扫描源信号。

$$x(t) \otimes s(t) = r(t) * s(t) \otimes s(t). \quad (2)$$

其中 \otimes 表示相关。当扫描信号 $s(t)$ 的自相关函数近似为 Klauder 子波,根据式(2),地层响应函数可近似简化为

$$r(t) \approx x(t) \otimes s(t). \quad (3)$$

2.2 短时相关法

短时相关法源于天然地震领域里利用地震背景噪声来提取两个观测台站之间的格林函数^[16],将整个长记录 $x(t)$ 和扫描源信号 $s(t)$ 分为相对应的多个相邻重叠的数据段 $x_1(n), x_2(n), \dots, x_m(n)$ 和 $s_1(n), s_2(n), \dots, s_m(n)$;分别计算相对应各数据段的地层响应函数 $r_i(n)$,其中 $i=1, 2, \dots, m$ 。

$$r_i(n) \approx x_i(n) \otimes s_i(n), \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

然后对各分段记录的地层响应函数进行叠加得到

$$r(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i(n). \quad (5)$$

2.3 相干法

根据褶积模型和互相关原理,地震记录 $x(t)$ 与源信号 $s(t)$ 之间的相干相关函数 $H(\omega)$ 在频率域里可定义^[17-18]为

$$H(\omega) = \frac{S(\omega)X(\omega)}{|S(\omega)| |X(\omega)|}, \quad (6)$$

再经过 IFFT 变换可获得时域相干函数 $h(t)$ 。

2.4 反褶积法

反褶积法与互相关法一样,基于同样的褶积模型:

$$x(t) = r(t) * s(t). \quad (7)$$

对式(7)进行傅氏变换,可得

$$X(\omega) = R(\omega)S(\omega). \quad (8)$$

则地层响应函数在频率域里可表示为

$$R(\omega) = X(\omega)/S(\omega), \quad (9)$$

再通过 IFFT 变换可获得时域地层响应函数 $r(t)$ 。

通过式(2)可得出,互相关处理方法等效于在频率域里通过了一个扫描信号振幅谱二次方特征窗口的自适应滤波,若扫描信号能量在频率域里相差较大,自相关函数波形的主峰值不突出,旁瓣值压制得也不好,处理后的波形就会突出高能量部分的频率特征。从式(6)和(9)中可知,相干和反褶积法均去除了震源信息,处理后的波形不会受到扫描信号特征的影响,且都保留了震源参考点到接收点之间的格林(传递)函数的相位信息。

在地震信号处理分析中,地震信号中的高频成分能缩短子波的周期,而低频成分可以降低子波的旁瓣值。在扫描信号设计上尽可能增加低频信号的扫描时间和扫描宽度,在数据处理方法上分别尝试互相关、短时相关、相干和反褶积等方法,并开展对比分析研究。

3 野外试验

采用北京港震机电技术有限公司生产的 ACROSS 系统。该震源自重 16 t,沿水平轴旋转,转速为 10 r/s 时,垂直方向上的冲击合力约 10 t。流动地震仪来自中国地震局地震科学探测台阵技术中心,地震计为 GURALP-40T 短周期地震计,灵敏度为 2000 V/(m·s⁻¹),频带范围为 0.5~100 Hz,数据采集器为 REFTEK-130B,采样率为 200 Hz,ACROSS 激发时间和数据采集器时钟均采用 GPS 时间控制和连续授时。详细的试验描述见文献[7]。

李庆忠等^[19]对可控震源的零相位子波频带上、下限与分辨率之间的关系进行了研究,结果表明,扫描信号的频带选择应满足起始频率与终止率之比超过 2 倍频程,以保证子波延续度在一个相位之内。为此选择的扫描频带为 2~10 Hz,扫描周期为 30 min/次,正常运转 26 min,前后均停转 2 min,并尽可能增加低频信号的扫描时间以增强低频信号能量,如图 1(b)。

2009 年 6 月,在四川省绵竹市进行 ACROSS 激发试验。为保证观测数据质量,流动地震台的台基进行了严格的处理,震源和观测台站分布情况见图 2。为保证 ACROSS 激发信号的最大振幅值不超过观测仪器的记录范围,通过现场距离测试,将参考台站安放在离震源 8 m 的地方,观测测线长度为 9.7 km,最小偏移距为 1.5 km,其中 st01-st04 台站之间的台间距大约为 1 km。ACROSS 震源和地震观测设

备均由中国地震局地震科学探测台阵技术中心提供。



图 2 野外试验仪器设备分布示意图

Fig. 2 Location of ACROSS and layout of seismic equipment

4 数据分析

把安放在 ACROSS 旁边的参考台站的垂向记录作为参考信号,并选择震源正常运转时间作为参考信号的时间窗口,将测线上的观测台站的垂向记录分别与参考信号通过互相关、相关叠加、相干和反褶积处理后,再经过 2 ~ 12 Hz 的带通滤波和叠加处理等获得走时剖面图,并对处理获得的波形开展重复性、走时剖面、频谱特征以及信噪比等对比分析。

4.1 震源重复性

将震源运转的时间作为参考信号的时间窗口,

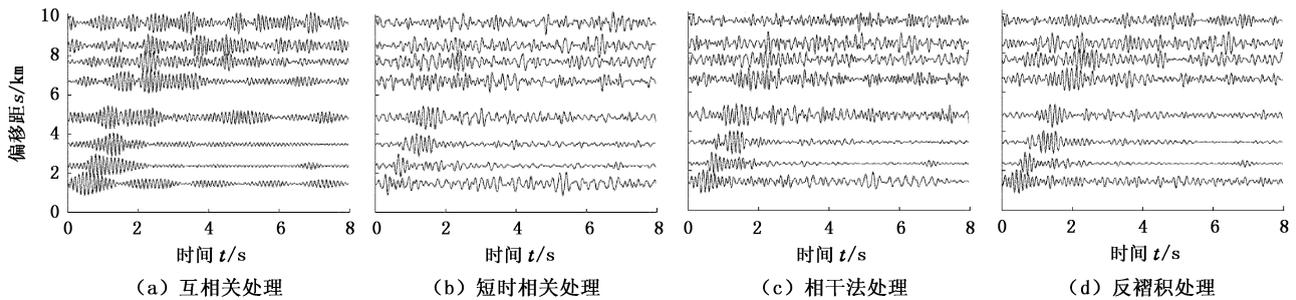


图 4 ACROSS 单次激发走时剖面

Fig. 4 Travel-time profile of ACROSS working once

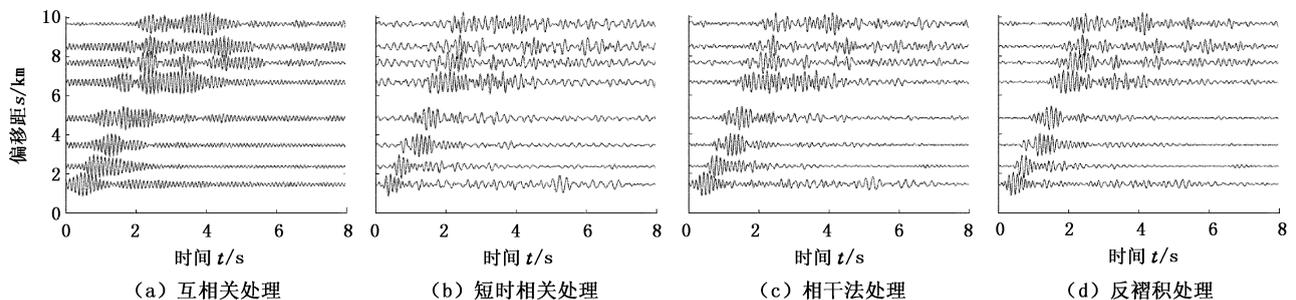


图 5 ACROSS 激发 60 次叠加走时剖面

Fig. 5 Stack travel-time profile of ACROSS working 60 times

通过对比分析,可以看出:①通过多次叠加,记录信噪比明显得到改善,即使在最远的观测台站上也能检测到有效信号;显然,在对 ACROSS 资料处理前,采用多次叠加方法提高记录信噪比是重要的;②

选择其中 1 次激发的垂向记录作为参考信号,对 ACROSS 激发的 60 次信号的垂直分量进行重复性分析(图 3),其相关系数均在 0.985 以上,且只有 1 次激发的相关系数小于 0.99,表明 ACROSS 每次激发产生的振动信号具有很好的重复性,可通过对多次激发信号进行叠加来提高记录的信噪比,并在走时变化观测中能进一步降低震源变化的影响。

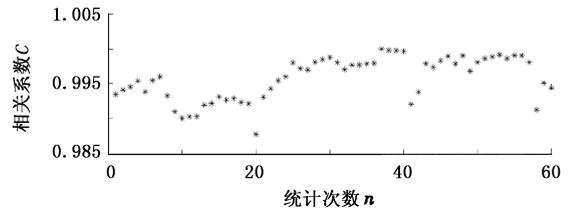


图 3 ACROSS 激发 60 次产生的振动信号垂直分量重复性分析

Fig. 3 Repeatability analysis of vertical component record after ACROSS working 60 times

4.2 走时剖面特征

图 4 和 5 为四种方法处理的 ACROSS 单次激发和 60 次叠加的走时剖面。

互相关处理获得的波形主峰不明显,波形旁瓣收敛较差,震相识别及其走时精确拾取难度大;即使在外界干扰较小、信噪比相对较高的 st02 台站(偏移距为 2.4 km)记录上(图 6),也难以可靠地进行震相

识别和到时拾取;③在短时相关、相干和反褶积处理的记录上,波形主峰较为明显,波形旁瓣收敛较好,

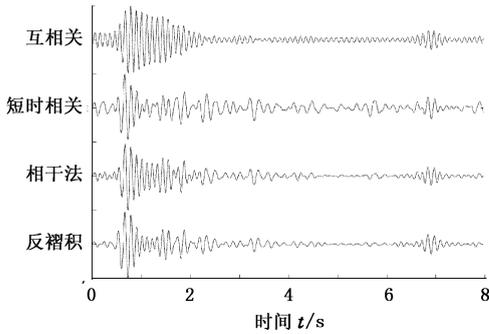


图6 st02台四种方法处理结果对比分析(单次激发)

Fig. 6 Comparative analysis of results by four methods at st02 station

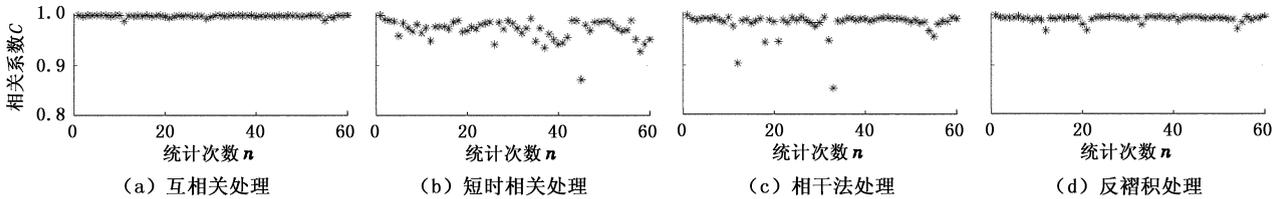


图7 st02台四种方法处理结果重复性分析

Fig. 7 Repeatability analysis of results by four methods at st02 station

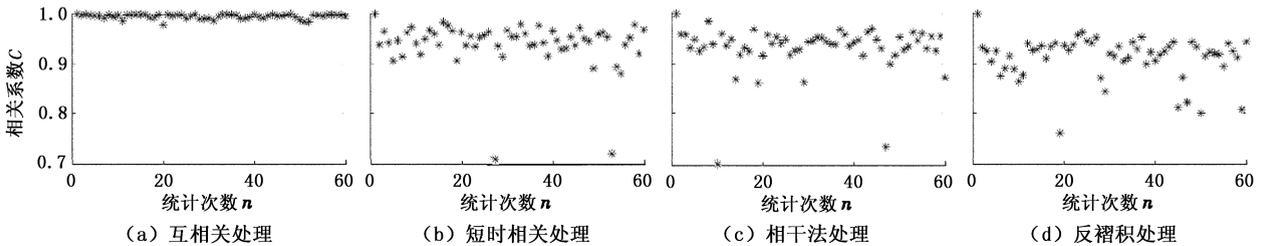


图8 st03台四种方法处理结果重复性分析

Fig. 8 Repeatability analysis of results by four methods at st03 station

4.4 频谱

在震源运转期间,激发的10 Hz能量最强。对互相关、短时相关、相干和反褶积等四种方法处理的结果进行了频谱分析,图9给出了st02台四种方法的频谱分析。

从图中可看出,互相关处理在频谱上的主频成分(8~10 Hz)较为突出,短时相关、相干和反褶积处理的结果在频率成分上比互相关处理结果的频带宽,尤其是在低频成分上有明显的改善,能更好地解释各种处理方法获得的子波波形收敛和旁瓣压制的结果。短时相关法在低频成分上改善得最好,这可能与其算法有关。由于人类活动与环境自然噪声的频段一般为几赫兹到十多赫兹,与震源信号频段有重叠,在数据分段和处理过程中放大了噪声的作用。

且能较可靠地分辨出有效波和波至到时,但三种方法所得到的记录视觉信噪比不同,相干和反褶积方法效果较好,短时相关法次之,但都好于互相关方法。

4.3 台站记录的重复性

对各台站记录经过处理后的结果也进行重复性分析。图7和8分别给出了st02台(2.4 km)和st03台(3.5 km)的四种处理方法的重复性分析结果,可以看出:互相关法处理结果的重复性最好,受噪声影响小;对具有一定信噪比的st02台数据处理结果,短时相关法的重复性最差;随着偏移距的增大(信噪比的降低),反褶积方法处理结果的稳定性受噪声影响较大。

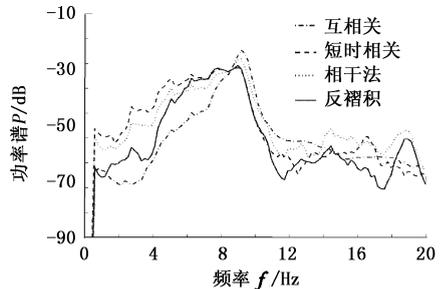


图9 st02台四种方法处理结果频谱分析

Fig. 9 Power spectral density analysis of results by four methods at st02 station

4.5 信噪比

信噪比定义通常有功率信噪比和振幅信噪比两种,本文中采用振幅信噪比的定义,即有效信号的振幅与背景噪声振幅的均方根之比^[20]。利用震源激发的扫描信号与相应的远台记录进行互相关、短时

相关、相干法和反褶积处理的信号检测方法中,所获得的波形对于信号的检测亦可以看作是一种信号,在计算各种方法处理的波形信噪比过程中,所选取的有效信号窗口见图10,噪声窗口(15 s)选在震源停转时间段。

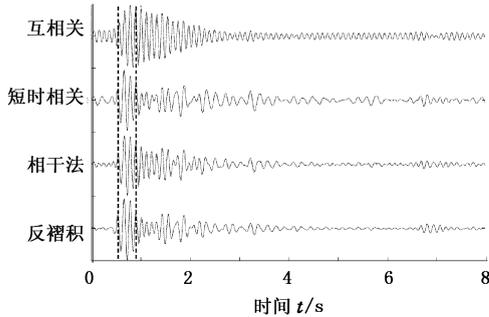


图10 st02台计算信噪比选取有效信号窗口(叠加60次)

Fig. 10 Time window selecting for signal-to-noise ratio at st02 station

表2给出了st01台~st04台单次和60次叠加的信噪比情况,可以看出:①环境噪声水平较高(st01台),互相关处理单次激发的信噪比最高,说明在较强噪声环境,互相关方法的检测能力优于其他方法,但通过多次叠加后,相干和反褶积处理的信噪比也得到了明显的改善;②st02~st04台环境噪声较为安静,互相关、相干和反褶积处理的信噪比均优于短时相关法的处理结果。

表2 四种处理方法信噪比对比

Table 2 Comparative analysis of signal-to-noise ratio by four methods

台站号	互相关		短时相关		相干法		反褶积	
	单次	叠加	单次	叠加	单次	叠加	单次	叠加
st01	6.86	31.12	3.81	12.42	4.16	26.93	3.59	21.73
st02	19.07	28.61	9.43	16.75	26.26	61.09	33.30	96.26
st03	7.71	48.33	4.90	19.15	7.99	42.23	7.10	50.80
st04	4.33	17.59	3.47	11.47	3.53	18.99	5.70	24.94

5 结论

(1) ACROSS 激发的扫描信号具有重复性好、频率低、频带范围窄、传播距离远等特点,为地壳结构探测和地下介质变化的监测提供了一条新的技术,可应用于地震断裂带应力变化,石油、天然气的开采监测等。

(2) 互相关方法处理结果稳定性好,能较好地突出高能量频率成分,类似于进行了具有源信号特征窗口的滤波处理,但不适用于在频谱特征里能量相差较大的窄带信号分析。

(3) ACROSS 信号与环境背景噪声在频谱上有

重叠,短时相关法会放大噪声的作用,在综合分析效果较相干法和反褶积显得略差一些。

(4) 信噪比对相干和反褶积法处理结果的稳定性影响较大,相干和反褶积法适合于具有一定信噪比的 ACROSS 信号检测分析。

致谢 KZ-20型可控震源产生的扫描信号由中国地震局地球物理研究所丁志峰研究员提供;在野外试验过程中,得到中国地震局地球物理研究所、北京港震机电技术有限公司、四川省绵竹市防震减灾局、九龙镇政府和源发花园等单位 and 研究人员的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] HASADA Yoko, KUMAGAI Hiroyuki, KUMAZAWA Mineo. Autoregressive modeling of transfer function in frequency domain to determine complex travel times [J]. Earth Planets Space, 2001, 53(1): 3-11.
- [2] ALEKSEEV A S, CHICHININ I S, KORNEEV V A. Powerful low-frequency vibrators for active seismology [J]. Bull Seismol Soc Am, 2005, 95: 1-17.
- [3] 王洪体, 庄灿涛, 薛兵, 等. 精密主动震源监测[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1808-1815.
WANG Hong-ti, ZHUANG Can-tao, XUE Bing, et al. Precisely and actively seismic monitoring [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2009, 52(7): 1808-1815.
- [4] IKUTA R, YAMAOKA K, MIYAKAWA K, et al. Continuous monitoring of Propagation velocity of seismic wave using ACROSS [J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(13): 1627.
- [5] IKUTA R, YAMAOKA K. Temporal variation in the shear wave anisotropy detected using the accurately controlled routinely operated signal system [J]. J Geophys Res, 2004, 109: B09305.
- [6] SAIGA Atsushi, YAMAOKA Koshun, KUNITOMO Takahiro, et al. Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source [J]. Earth Planets Space, 2006, 58: 993-1005.
- [7] 杨微, 葛洪魁, 王宝善, 等. 由精密控制人工震源监测到的绵竹 5.6 级地震前后波速变化 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1149-1157.
YANG Wei, GE Hong-kui, WANG Bao-shan, et al. Velocity changes observed by the precisely controlled active source for the Mianzhu MS 5.6 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2010, 53(5): 1149-1157.

(下转第 69 页)