

S变换时频域滤波方法在主动源资料处理中的应用研究^{*}

张 帅¹, 杨润海^{1♣}, 王 彬¹, 孙守才², 庞卫东¹, 姜金钟¹, 高尔根³

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 防灾科技学院 地球科学学院, 河北 三河 065201;
3. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230000)

摘要: 主动源探测中源检距较大的接收台站, 由于信号能量较弱及各种干扰的存在, 有效信号湮灭于干扰信号之中, 导致信噪比降低。利用S变换时频域滤波方法分别对一维、二维加噪数据进行数值模拟计算, 发现该方法可对随机信号进行有效识别, 输出信号与原始信号互相关程度提高。再将此方法与频率滤波方法应用于宾川主动源高兴台数据处理中, 结果表明: S变换时频域滤波方法能够在主动源资料处理中对噪声形成有效压制, 提高地震信号信噪比, 且效果优于频率域滤波方法。

关键词: S变换; 主动源; 时频域滤波; 信噪比

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)01-0080-08

0 引言

宾川主动源发射站自2012年建成以来, 积累了长期的观测资料, 在探测地壳浅部结构和波速变化方面开展了应用探索(王伟涛等, 2017), 取得了多方面的研究成果。如张云鹏等(2017)对2011年以来云南宾川地震信号发射台的所有流动观测数据进行整理, 构建了统一的数据库; 蒋生森等(2017)提出了一种利用信号记录中噪声特征的主动源数据筛选方法RMS方法, 服务于气枪数据的自动化处理; 陈佳等(2017)利用主动源信号对云龙 $M_s 5.0$ 地震前后波速变化特征进行了对比研究; 叶泵等(2017)利用主动源数据对宾川地区的地壳的各向异性进行了研究; 向涯等(2017)将气枪主动源信号与天然地震信号的传播特征进行了对比研究。这些都为主动源的探测研究奠定了较好的研究基础(王彬等, 2015)。这种探测技术手段的革新对监测地球介质波速的时空变化, 研究区域地层构造及地震的孕育过程意义重大(杨微, 2014)。

地震活动与活动构造密切相关, 包含了丰富的构造信息(杨润海等, 2014)。在利用气枪主动源技术进行区域尺度地球内部介质结构及其变化的探测中(胡久鹏等, 2018), 介质波速的精细化计算依赖于地震信号信噪比和分辨率(陈蒙等, 2013)。地震信号从震源激发、传播到最后被检波器接收的过程中会受到噪声的干扰, 在低信噪比(SNR)情况下, 甚至会被噪声掩盖(刘自凤等, 2015)。由于地球介质极其复杂, 地震波在地球内部传播时会不断散射和衰减(陈颢等, 2017), 导致有效信号基本湮灭于干扰信号之中(邓攻等, 2015); 人们生产生活产生的各种干扰导致噪声水平增加, 采集数据时会导致地震信号信噪比下降, 分辨率降低。

如何能从低信噪比的地震信号中提取有效信号是所有处理的前提。滤波是常用去噪手段之一, 传统的滤波方法都是基于全局的频率域滤波方法, 因此难以分析信号的局部特性(李伶俐等, 2012)。经过不断的发展和改进, 通过增加窗函数可以实现信号的局部分析, 如短时傅里叶变换, 小波变换, Gabor变换(Gabor, 1946), Wigner-

^{*} 收稿日期: 2018-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金(41574059, 41474048, 41174043), 云南省科技计划项目——宾川主动源试验区地壳介质应力场时空变化(ZX2015-01)及云南省地震局青年项目“传帮带”(C2-201704)联合资助。

♣通讯作者: 杨润海(1965-), 正高级工程师, 主要从事地震学方面的研究. E-mail: runhaiyang@163.com.

Ville 时频分析等 (郑成龙, 王宝善, 2015), 但当有效信号与干扰信号频带没有差别时, 传统的频率域滤波方法达不到理想的效果。

S 变换是一种对非平稳信号进行时频分析的有效方法, 它能将一维时域信号映射成时频面上的二维信号 (陈学华, 贺振华, 2005)。Zheng 等 (2018) 将该方法应用到安徽长江流域气枪信号的处理中, 取得了很好的效果。由于 S 变换具有其独特的多尺度聚焦性, 可直接与 Fourier 谱联系, 保持频率的绝对相位 (刘喜武等, 2006a), 且其基本变换函数无须满足容许性等条件 (Stocwell *et al*, 1996), 即变换的核函数的时频窗随着频率的变化来调节其时长与频宽 (武国宁等, 2011)。但 S 变换中窗函数形态固定, 导致其在应用中受到一定的限制, Mansinhan 等 (1997) 给出非对称窗口的 GST 以改进 S 变换, 并用于分析 Wolf 太阳黑子序列和地震数据。S 变换时频分析方法应用比较广泛, 如 Q 值估计方法 (刘国昌等, 2011) 利用 S 变换分析地震信号的振幅谱, 并结合整形正则化方法对信号频谱比做光滑处理, 以此来估计 Q 值; 刘喜武等 (2006b) 提出基于 S 变换的能量衰减分析方法, 用于油气检测以及指示油气层厚度分布的研究。本文利用 S 变换时频域滤波方法对主动源资料进行弱信号增强处理, 并通过与其它处理方法对比来验证它的适用性。

1 时频域滤波方法原理

1.1 S 变换

S 变换是一种介于短时傅里叶变换与连续小波变换的一种时频域变换方法, 能够兼顾分析信号的时空域的分布情况, 其计算公式可通过短时傅里叶变换或小波变换推导, 本文主要选取短时傅里叶变换。假设地震信号为 $x(t)$, Stockwell 等 (1996) 提出的 S 变换形式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) G(\tau - t) \exp(-2\pi i f t) dt \quad (1)$$

式中: τ, t 表示时间; f 表示频率。

其中高斯窗函数的定义为:

$$G(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-t^2 f^2}{2}\right) \quad (2)$$

由式 (1) 可见, S 变换是由短时傅里叶变换通过

加一个高斯窗函数变构而成, 其具体形式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(\tau - t)^2 f^2}{-2}\right) \exp(-2\pi i f t) dt \quad (3)$$

式中: 信号 $x(t)$ 可以由 $S(\tau, f)$ 无损重构。

S 反变换的形式是:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(\tau - t)^2 f^2}{-2}\right) \exp(-2\pi i f t) \right] dt d\tau \right\} \exp(2\pi i f t) df \quad (4)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \exp(2\pi i f t) df \quad (5)$$

式中: $X(f)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换, 可表示为:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-2\pi i f t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\pi, f) d\tau \quad (6)$$

S 变换的良好性质之一在于它是完全可逆的。在时间上求和可得到函数的傅里叶变换 (刘保童等, 2010), 它不仅能表示信号的时间和频率局部特征, 而且可以自动调节频率实现多分辨率分析, 同时与傅里叶谱保持直接的联系, 也不受容许性条件的限制。

1.2 时频域滤波器设计原理

S 变换最主要的优势就是可以将信号转换到时频域中进行处理, 时频域中有效信号往往与干扰信号在时间或者频率分布上有差别, 通过设置时频滤波器滤除。采用 S 变换时频域滤波去噪的一般步骤是: ①对原始信号进行 S 变换得到时频谱, 对信号进行时频域分析确定有效信号分布范围。②在设计时频滤波器对有效信号进行时间和频率控制时, 通过将时频窗内的值设置为 1, 时频窗外的值设置为 0, 保证有效信号通过而干扰信号被滤除。但时频窗内也存在一些表现为较小振幅值的干扰信号, 可通过振幅的阈值进行控制, 找到较小振幅值的干扰信号, 将其设置为 0, 进一步去除干扰信号, 保证有效信号输出。在时频域中, λ 通常选取幅值较小的量为控制因子, 这样可以避免对有效信号输出的影响。③信号经过时频域滤波后再进行 S 反变换到时间域中, 即完成整个的滤波去噪过程。

假设地震信号 $x(t)$ 的 S 变换可表示为:

$$S(\pi, f) = St[x(t)] \quad (7)$$

设时频滤波器为:

$$H(t, f) = \begin{cases} 1, & t \in [t_1, t_2], f \in [f_1, f_2] \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 代表时间; f 代表频率。

阈值滤波器为:

$$C(e) = \begin{cases} 1, & e \geq \lambda \\ 0, & e < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

则阈值滤波公式为:

$$F(t, f) = S(t, f) \times H(t, f) \times C(e) \quad (10)$$

根据式 (10), 在时频域滤波后, 再经 S 反变换将 $F(t, f)$ 转换到时间域中完成滤波过程。

在主动源数据中选择信噪比较高的记录进行叠加, 得到叠加数据时间域模板, 将叠加数据变换到时频域进行阈值滤波, 在时频域中通过能量阈值控制进行干扰信号的筛查得到滤波模板, 通过模板滤波器对信号在时频域中进行滤波, 滤波完成后将信号反变换到时间域。

假设地震信号为 $x_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 选择部分信噪比较高的信号进行叠加:

$$D(t) = \text{sum}[x_1(t_1, t_2) + x_2(t_1, t_2) + x_3(t_1, t_2) + x_4(t_1, t_2) + \dots + x_n(t_1, t_2)] \quad (11)$$

将 $D(t)$ 变换到时频域中, 则

$$Dst(t, f) = ST[D(t)] \quad (12)$$

阈值滤波器为:

$$C(e) = \begin{cases} 1, & e \geq \lambda \\ 0, & e < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

则滤波模板为:

$$G(t, f) = Dst(t, f) \times C(e) \quad (14)$$

对原始数据 $x_i(t)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 求时频谱 $S(\tau, f)$, 则对原始数据进行模板滤波得:

$$R(t, f) = S(\tau, f) \times G(t, f) \quad (15)$$

再将时频信号 $R(t, f)$ 反变换到时间域达到滤波的目的。在两种时频域滤波器的设计过程都需要有效信号的时频范围有明确的界定, 才能达到很好的滤波效果。

2 数值模拟计算

2.1 一维信号加噪模拟计算

数值模拟正演过程: 已知归一化标准地震信号如图 1a 所示, 采样频率为 100 Hz, 采样点 2 000, 采样时间 20 s。按照等间隔将信号信噪比进行不同比例随机噪声加载, 从高到低加噪后各道的信噪比分别为 11, 9, 7, 5, 3, 1, -1, -3, -5, -7, -9, -11。图 1b 为标准信号加

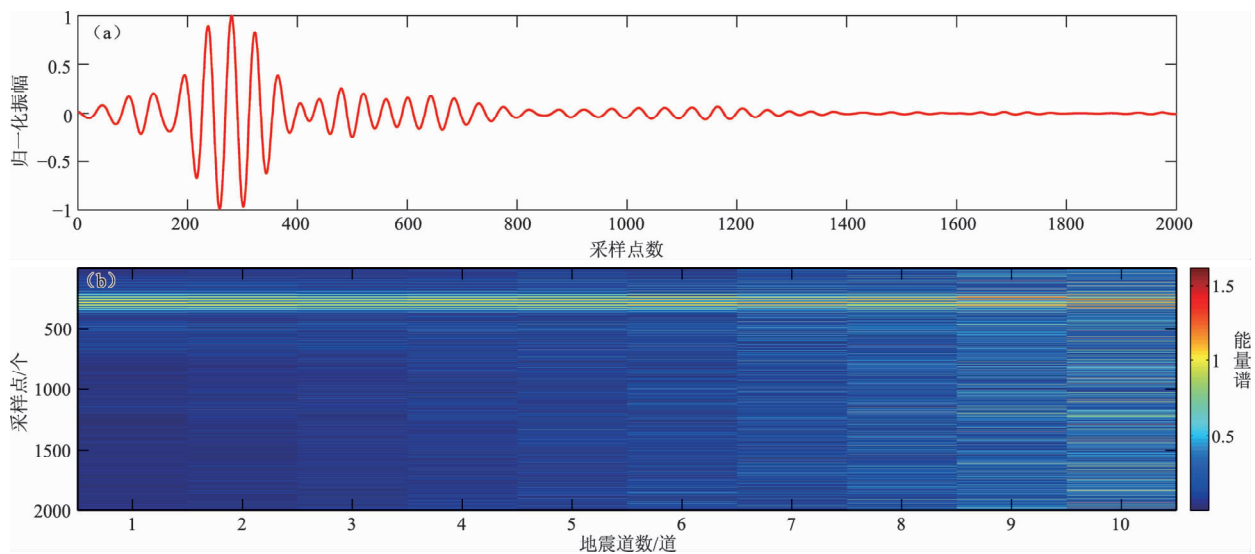


图 1 标准地震信号 (a) 及加不同比例随机噪声信号 (b)

Fig. 1 Standard seismic signal (a) and adding random noise in different proportions to original signal (b)

噪后图像, 可以看到信噪比越低, 有效信号的识别越低, 尤其是到第 10 道信号, 有效信号完全湮灭于噪声之中。

根据上述 S 变换时频域滤波的基本处理流程, 对加噪信号进行 S 变换时频域滤波处理。经

S 变换处理后的地震信号与原始的地震信号吻合度非常高, 波形的一致性较高, 如图 1a 所示。通过对比图 2b 和 2c, 可以看到有效信号强度区域与原始数据基本一致, 并且“同相轴”的分辨率较高。

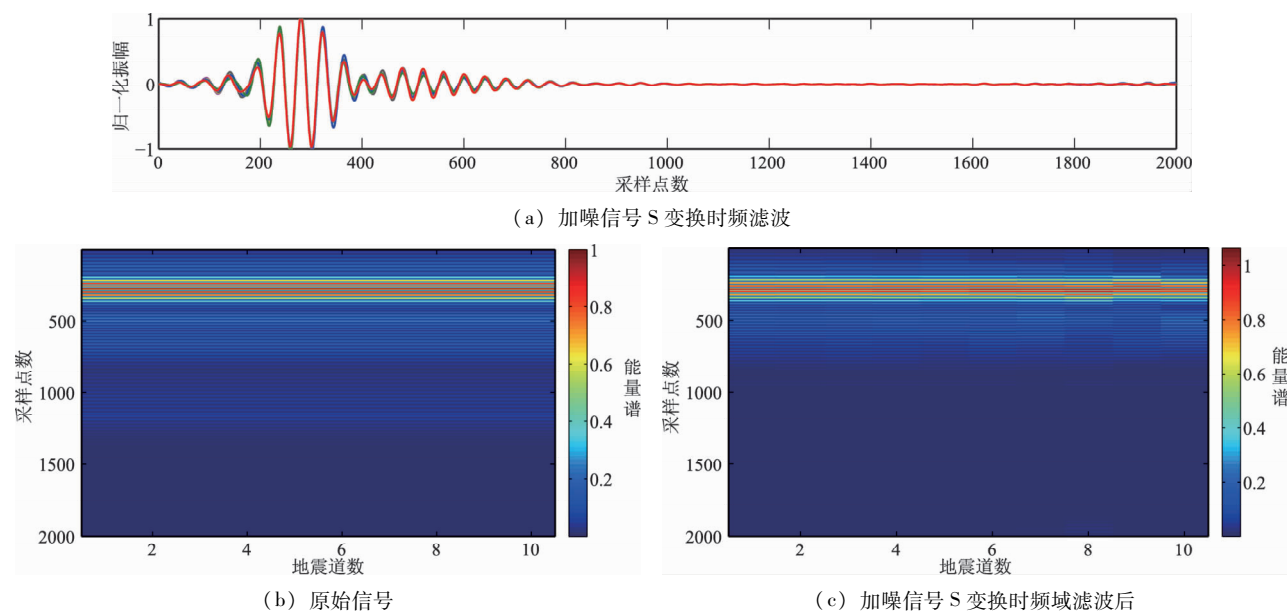


图 2 加噪信号处理前后效果对比

Fig. 2 Contrast diagrams before and after denoising signal processing

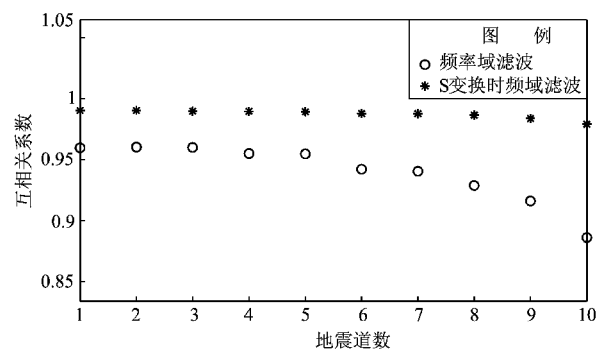


图 3 两种滤波方法处理前后互相关分析对比

Fig. 3 Comparison of correlation analysis before and after two filtering methods processing

从图 3 可以看到, 随着信噪比的降低, 其处理后的相关系数也是逐渐降低, 即使信噪比最差的第 10 道信号经 S 变换时频域滤波处理后, 互相关系数也能达到 0.98 以上。S 变换时频域滤波后的信号的互相关系数比频率域滤波后信号的互相关系数明显高很多, 说明 S 变换时频域滤波方法在提高信号信噪比方面效果明显。

2.2 二维信号加噪模拟计算

建立一个二维地震信号, 由图 4a 所示。加高斯白噪声将信号的信噪比降到 -8 dB, 并且将 50, 51, 100, 101, 600, 601 道加上随机信号, 如图 4b 所示。

对加噪信号进行 S 变换时频域滤波后如图 5a 所示, 虽然信号信噪比降到很低, S 变换时频域滤波方法还是能够达到很好的处理效果。由图 5b 可看出, 处理后的信号互相关系数基本都达到 0.9。但包含随机信号的 6 道信号, 处理后相关系数很低, 说明 S 变换时频域滤波无法去除这类随机信号, 但能够明显地将它们识别出来, 随机信号中并不存在有效信号, 可以考虑直接将其剔除。

3 实际资料处理

气枪震源的优势是多方面的, 重复性强是其中重要的一个特点。根据王宝善等 (2016) 研究结果可知, 同一台站不同时间得到的波形的相似性往往能达到 0.99, 相似性极高, 因此进行不同

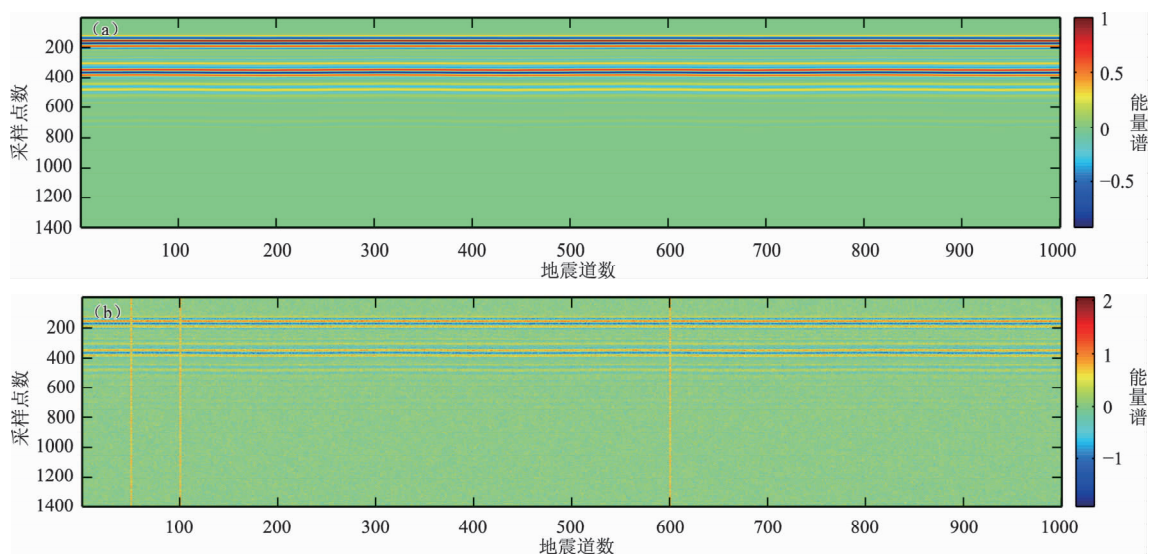


图4 原始二维地震信号 (a) 及加噪信号 (b)

Fig. 4 Original 2-D signal (a) and add random signal to it (b)

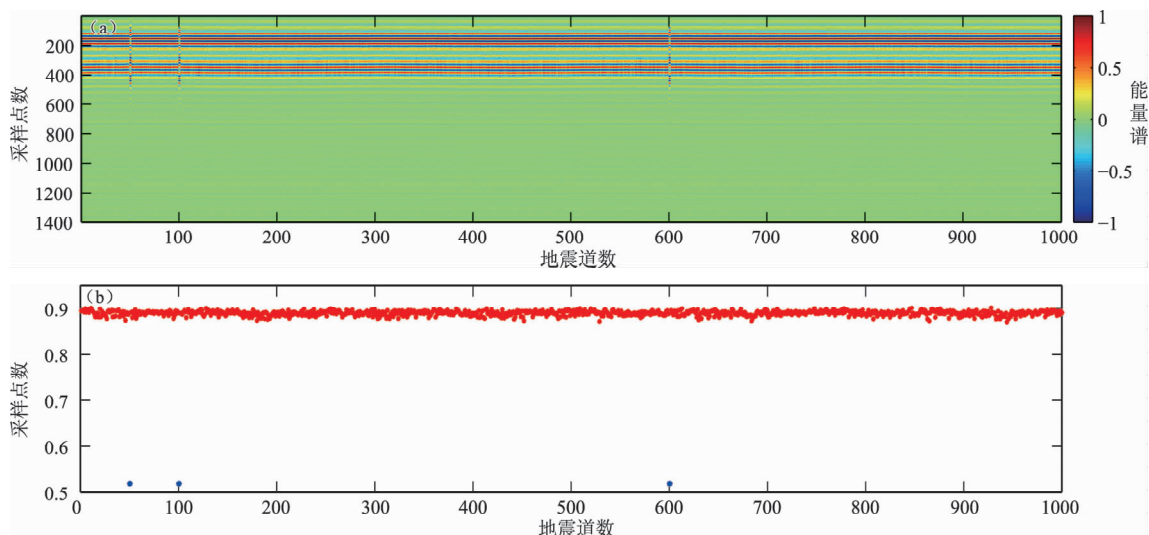


图5 加噪信号经S变换时频域滤波后信号 (a) 及滤波处理前后互相关对比分析 (b)

Fig. 5 Denoising signal is transformed by S-transform time-frequency filtering (a) and cross correlation analysis before and after filtering processing (b)

时间的数据叠加能在一定程度上提高信号信噪比。

为了进一步验证S变换时频域滤波方法的实用性,对同一台站不同时间的数据进行叠加提高信噪比,但当信号的整体信噪比极低时,叠加信号也并不能满足震相识别及走时精确计算等处理要求,因此要对叠加信号做进一步的滤波处理。本文采用S变换时频域滤波设计模板滤波,取宾川主动源高兴台(5325)的数据进行3 501次信号叠加,如图6a所示。从图中可见,有效信号分布在2~15 s,再对叠加信号进行时频域转换,

如图6b所示。在图6b的基础上进行时频域阈值控制,需要选取合适的滤波因子 λ ,这里取 $\lambda = 0.05$,得到滤波模板如图6c所示。从图中可以看到,信噪比明显提高,可以清晰识别P波和S波的震相,时间精度提高,并且可识别2倍S波的时间出现的尾波。

本文重点选取高兴台(53251)不同时间的有效信号(图7a)进行处理。高兴台东邻宾川,距离宾川气枪震源发射站约27 km,由于距离相对较远,其地震信号的信噪比较低。

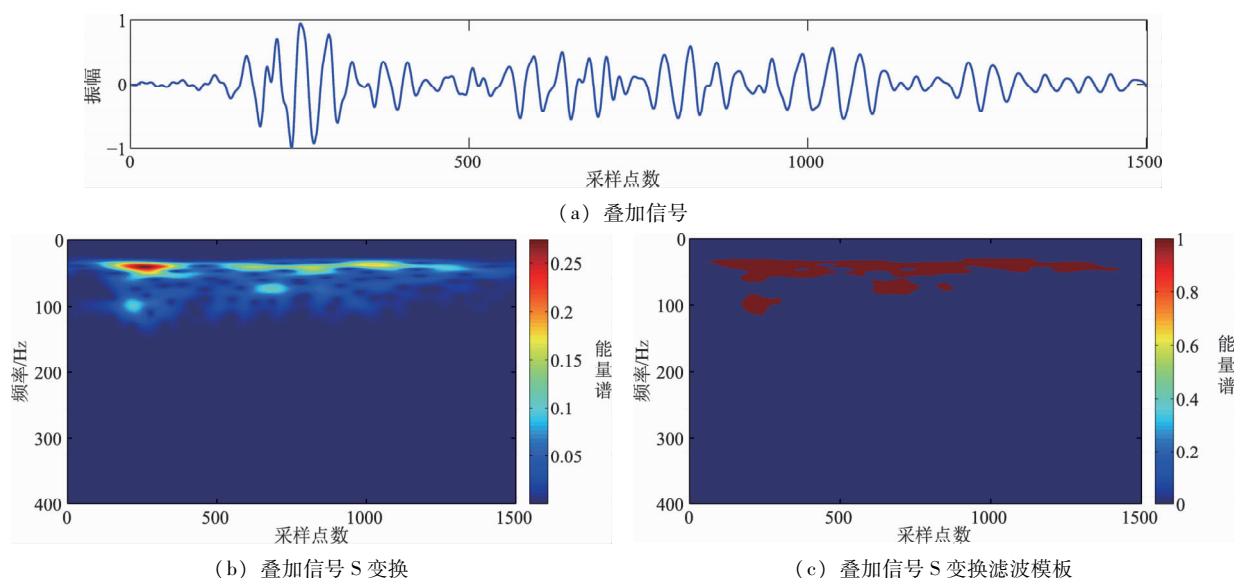


图6 创建滤波模板

Fig. 6 Creating filter templates

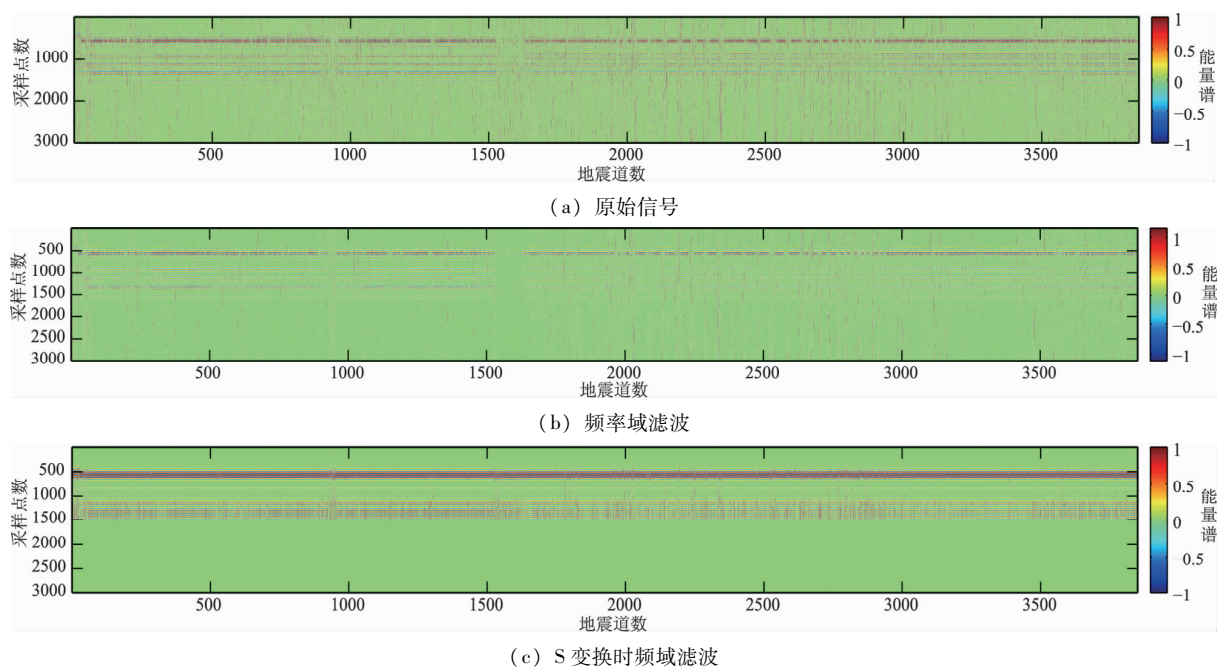


图7 不同滤波方法对原始数据处理前后效果对比

Fig. 7 Comparison of effects before and after processing the raw data by different filtering methods

首先对原始信号进行频率域滤波处理,见图7b。从图中可以看到,部分有效信号也被去除,信噪比依然很低,改善效果不明显。再通过S变换时频域滤波进行处理见图7c。通过对比发现一些明显的线性干扰被去除,同相轴的连续性增强,地震信号信噪比提高。对两种方法处理前后进行互相关分析,如图8所示。从图中可以看到,经S变换时频域滤波处理后信号的互相关系

数明显增高。有效信号被明显增强,频带较宽、地质特征明显、波阻抗易于追踪、地震剖面的信噪比被明显加强,处理效果表明S变换时频域滤波方法优于频率域滤波方法。

通过S变换时频域滤波处理之后,发现依然存在一些互相关系数在0.6以下的信号,这是由于一些信噪比较低的信号的随机噪声较大所导致。

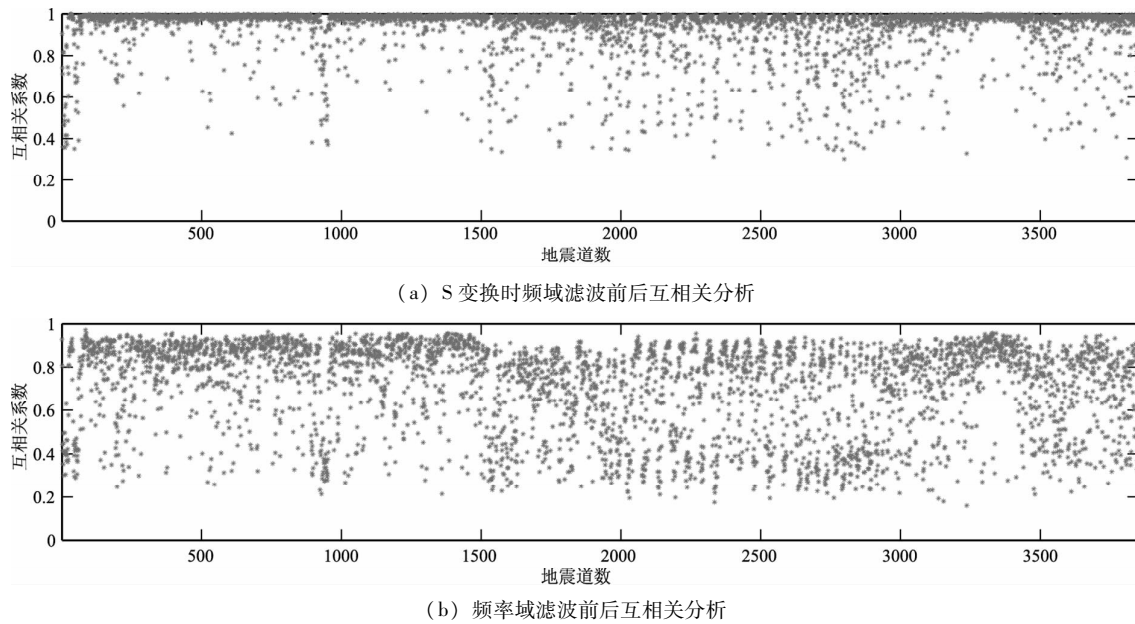


图8 两种方法处理前后互相关对比分析

Fig. 8 Comparison of cross correlation analysis before and after processing by two methods

4 结论与讨论

气枪主动源探测的最终目的是为了探测地球介质波速的时空变化,这种精细的波速变化计算需要地震信号满足高信噪比和高互相关系数,其中信号滤波是把弱有效信号增强的关键技术。在地震波走时变化的监测中,走时计算是根据2个台站的波形互相关来计算时延估计。如果信号的信噪比不满足要求就会导致时延误差变大,最终影响波速的计算。因此提高信号信噪比是进行走时变化监测的关键点之一。

本文针对主动源探测中部分资料信噪比较低的情况,利用S变换时频域滤波进行处理。主要步骤为选取部分信号信噪比高的接收信号进行叠加,得到信噪比较高的信号滤波模板,并以此滤波模板对原始数据进行批处理。通过一维、二维数据进行模拟计算,数据处理结果显示:S变换时频域滤波方法在主动源资料处理中能够提高地震资料信噪比,压制线性及非线性等干扰,处理效果明显好于频率域滤波。

在模拟信号中,即使模拟信号的信噪比为-10 dB,有效信号也完全湮灭于随机噪声中,通过S变换时频域滤波依然能够达到很好的滤波效果,并且信噪比最低的信号经处理后其互相关系数达

到0.98以上。在模拟信号中加入随机信号,能够对随机信号进行有效识别。

在实际的信号处理中,用两种方法对主动源信号进行处理,处理结果表明S变换时频域滤波方法优于一般的频率域滤波方法。对信号进行S变换时频域滤波之后,我们发现依然有一些相关系数较小的信号存在,这是由于信号本身的信噪比较低,包含的随机噪声较大所导致。这说明该方法对信噪比较低的信号的处理还是有一定的局限性。

参考文献:

- 陈佳,叶泵,高琼,等. 2017. 利用气枪震源信号研究2016年云龙M_s5.0地震前后波速变化特征[J]. 地震研究, 40(4): 550-556.
- 陈蒙,王宝善,王伟涛. 2013. 利用气枪地震资料研究燕山隆起带南部地区地壳S波速度及泊松比结构[J]. 地球物理学进展, 28(1): 102-110.
- 陈学华,贺振华. 2005. 改进的S变换及在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 20(4): 449-453.
- 陈颢,王宝善,姚华建. 2017. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J]. 中国科学:地球科学, 47(10): 1153-1165.
- 邓攻,梁锋,李晓婷. 2015. S变换谱分解技术在深反射地震弱信号提取中的应用[J]. 地球物理学报, 58(12): 4594-4604.
- 胡久鹏,王伟涛,王宝善. 2018. 利用反投影方法计算陆地有限水体气枪震源激发过程[J]. 地球物理学报, 61(3): 1000-1013.
- 蒋生森,王宝善,张云鹏,等. 2017. 噪声对气枪信号叠加效果的影响及自动数据筛选方法[J]. 地震研究, 40(4): 534-542.

- 李玲俐,王清东,沈文渊. 2012. S变换在面波去噪中的应用[J]. 地震学报, 34(6): 830–840.
- 刘保童,刘启源,吴玉林. 2010. S变换数值计算方法比较的实验研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 22(3): 16–19.
- 刘国昌,陈小宏,杜婧. 2011. 基于整形正则化和S变换的Q值估计方法[J]. 石油地球物理勘探, 46(3): 417–422.
- 刘喜武,刘洪,李幼铭. 2006a. 基于广义S变换研究地震地层特征[J]. 地球物理学进展, 21(2): 440–451.
- 刘喜武,年静波,刘洪. 2006b. 基于广义S变换的地震波能量衰减分析[J]. 勘探地球物理进展, 29(1): 20–24.
- 刘自凤,苏有锦,王宝善. 2015. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究, 38(4): 591–597.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 2016. 利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J]. 中国地震, 32(2): 168–179.
- 王彬,吴国华,苏有锦. 2015. 宾川地震信号发射台的选址、建设及初步观测结果[J]. 地震研究, 38(1): 1–6.
- 王伟涛,王宝善,蒋生森,等. 2017. 利用气枪震源探测大陆浅部的地震学研究回顾与展望[J]. 地震研究, 40(4): 514–524.
- 武国宁,曹思远,马宁. 2011. S变换的时频分析特性及其改进[J]. 地球物理学进展, 26(5): 1661–1667.
- 向涯,王彬,杨润海,等. 2017. 气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究[J]. 地震研究, 40(4): 605–612.
- 杨润海,王彬,庞卫东. 2014. 云南地区中小震分布的活动构造意义[J]. 地震研究, 37(4): 603–606.
- 杨微. 2014. 区域尺度主动源探测技术及试验研究[J]. 国际地震动态, (1): 42–43.
- 叶泵,杨军,李孝宾. 2017. 利用主动源研究宾川地区地壳各向异性[J]. 地震研究, 40(4): 565–571.
- 张云鹏,李孝宾,王伟涛,等. 2017. 云南宾川地震信号发射台的流动观测数据服务系统及数据质量评估[J]. 地震研究, 40(4): 525–533.
- 郑成龙,王宝善. 2015. S变换在地震资料处理中的应用及展望[J]. 地球物理学进展, 30(4): 1580–1591.
- Garbor D. 1946. Theory of communication[J]. The Journal of the institute of Electrical Engineers, 93(3): 429–457.
- Mansinha L, Stockwell R G, Lowe R P. 1997. Local S-spectrum analysis of 1-D and 2-D data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 103(3–4): 329–336, doi: 10.1016/S0031–9201(97)00047–2.
- Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. 1996. Localization of the complex spectrum: the S-transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 44(4): 998–1001, doi: 10.1109/78.492555.
- Zheng C L, Tian X F, Yang Z X, et al. 2018. Application of S-transform threshold filtering in Anhui experiment air gun sounding data denoising[J]. Geodesy and Geodynamics, 9(4): 320–327.

Application and Study of S-Transform Time-Frequency Domain Filtering Method in Active Seismic Source Data Processing

ZHANG Shuai¹, YANG Runhai¹, WANG Bin¹, SUN Shoucai²,
PANG Weidong¹, JIANG Jinzhong¹, GAO Ergen³

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. School of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract

In the active seismic source detection, the receiving station with a large source ranging has a weak signal energy and various interferences, and the effective signal is extinguished in the interference signal, resulting in a decrease in the signal-to-noise ratio of the signal. The S-transform time-frequency domain filtering method is used to simulate the 1-D and 2-D noise-added data respectively. It is found that this method can effectively identify random signals and improve the correlation between the output signal and the original signal. Then, the S-transform time-frequency filtering method and frequency filtering method are applied to filter the data of Gaoxing station in Binchuan active source. The results show that the S-transform time-frequency domain filtering method can effectively suppress noise in active source data processing and improve the signal-to-noise ratio of seismic signals, and the effect is better than that of frequency domain filtering method.

Keywords: S-transform; active seismic source; time-frequency domain filtering; signal to noise ratio