

# 时间-频率域联合局部 SVD 压制随机噪声

魏 瑶,何兵寿

(中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

**摘 要:**全局奇异值分解(SVD)算法存在难以处理非水平同相轴问题的先天局限,局部 SVD 算法在一定程度上能克服这一局限,但时间域局部 SVD 技术的去噪效果受制于时窗参数的准确性,频率域局部 SVD 技术则会损坏部分频带内的有效信号。对于宽频带随机噪声,单独使用上述任何一种方法都难以取得满意的压制效果。综合两种方法特点,研究时间-频率域联合局部 SVD 去噪方法:依据资料特点对输入数据进行合理的时窗划分;在时间域对时窗内数据进行同相轴拉平处理并进行时间域局部 SVD 去噪;将经上述处理的各时窗数据变换到频率域并构建 Hankle 矩阵,采用 SVD 技术对该矩阵进行去噪处理并变换回时间域。算法克服了单域处理的局限性,在有效压制随机噪声的同时,保护高低频有效信号。模型与实测资料的应用效果证明了联合去噪方法的有效性。

**关键词:**随机噪声;噪声压制;同相轴;奇异值分解;联合去噪

中图分类号:P631.4

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)03-0045-08

## Local Singular Value Decomposition for Random Noise Suppressing in Time-frequency Domain

Wei Yao, He Bingshou

(Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Technology, Ministry of Education,  
Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** Although local singular value decomposition (SVD) could overcome global SVD's deficiency in coping with non-level events to some extent, the denoising effect of local SVD in time domain was strongly influenced by filtering window parameters and local SVD in frequency domain damaged the energy of partial effective frequency band. For wide frequency random noise, satisfactory suppression effect could not be obtained by just taking any one of the two above methods. This paper focused on the study on local SVD denoising methods in time-frequency domain by combining the two methods. According to its characteristics, the input data was divided into several windows. The data in each window in time domain was processed by aligning non-level events and local SVD denoising in time domain was conducted. Then the processed data was transformed to frequency domain and Hankle matrix was constructed. After the matrix went through denoising processing with SVD, the data was transformed back to time domain. The algorithm, which overcame the limitations of traditional SVD, could effectively suppress random noise and protect high and low frequency signals. The results of modeling and field data processing reveal the validity of joint denoising.

**Key words:** random noise; noise suppressing; events; singular value decomposition; joint denoising

随机干扰压制是地震资料处理的重要环节,目前常用的随机干扰压制方法主要有:①多项式拟合技

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41174087,41204089);国家重大科技专项项目(2011ZX05005-005);国家高技术研究发展计划("863"计划)项目(2013AA064201)

作者简介:魏 瑶(1992—),女,山西长治人,硕士研究生,主要从事地震勘探资料处理技术研究. E-mail:wyaodg2014@163.com  
何兵寿(1973—),男,甘肃民勤人,教授,博士后,主要从事叠前偏移、逆时偏移和多波地震技术研究,本文通信作者. E-mail:hebingshou@sina.com

术<sup>[1]</sup>,应用适当方法对有效信号进行拟合,并对拟合后的信号进行增强以压制随机干扰,这种方法不受同相轴斜率和曲率的限制,但对信号有一定的改造作用;②  $f-x$  域预测滤波<sup>[2]</sup>,假设相邻地震道的有效信号具有相干性,通过一个预测算子来预测相干信号,从而实现随机噪声的压制。这种方法对噪声的压制效果取决于预测算子的精度;③小波域去噪<sup>[3-5]</sup>,依据信号和随机干扰在小波域的区别压制随机噪声,但对于与有效信号处于同一频带的随机干扰,去噪效果并不理想。

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是近年发展起来的地震资料去噪处理领域的一项新技术。20 世纪 80 年代末, Sergio 等<sup>[6]</sup>首先将 SVD 应用于 VSP 上、下波场分离,随后 Bekara 等<sup>[7]</sup>将 SVD 用于增强地震资料的信号, Jackson 等<sup>[8]</sup>详细阐述了 SVD 在地震资料处理中的应用原理,均在一定的假设前提下取得较好处理效果,陆文凯<sup>[9]</sup>、詹毅等<sup>[10]</sup>也进行了类似的研究工作。

奇异值分解法去噪是一种基于特征值提取的方法,它利用信号与噪声的能量可分性实现噪声场与有效信号场的分离。在二维空间中,有效信号分布具有较强的相关性,而随机噪声相关性差,奇异值分解法去噪正是通过对地震道的相关性分析,识别隐含在随机干扰背景下的有效信号,进而提取有效信号以达到滤除随机噪声的目的。

时间域 SVD 算法对水平同相轴有好的去噪效果,但同相轴倾斜或弯曲时,需要首先将非水平同相轴校正为水平同相轴,当各同相轴的斜率不一致时,这一工作变得繁琐且复杂,限制了其应用。为克服这一局限, Trickrtt<sup>[11]</sup>等提出了在频率域实现 SVD 压制随机噪声的方法,频率域 SVD 避免了有效波同相轴水平这一假设,因而拓宽了 SVD 技术的应用范围,但当有效信号频带较宽时,频率域 SVD 技术在压制随机噪声的同时也会衰减部分有效信号。本文在分析时间域全局 SVD 算法、时间域局部 SVD 算法和频率域局部 SVD 算法的基础上,研究时间-频率域联合局部 SVD 随机噪声压制技术,给出联合去噪的原理与实现流程,时间-频率域联合去噪方法采用时间域局部 SVD,对时窗内倾斜同相轴进行拉平处理,同时结合频率域局部 SVD 技术联合去噪,本文方法在理论数据与实际资料的处理中均取得了良好效果。

## 1 奇异值分解法去噪原理

### 1.1 时间域全局 SVD 算法

设二维地震信号为  $\mathbf{X}$ ,道数为  $m$ ,采样点数为  $n$ ,则此地震记录可用矩阵  $\mathbf{X}$  表示,其元素为  $x_{ij}$  ( $i$  为道号,  $j$  为时间或频率采样点号),即:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

则  $m \times n$  阶矩阵  $\mathbf{X}$  的 SVD 分解可转换为  $m \times m$  阶正交阵  $\mathbf{U}$ ,  $m \times n$  阶对角阵  $\mathbf{S}$  及  $n \times n$  阶正交阵  $\mathbf{V}$  的乘积,其表达式为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T. \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{U}$  的列向量由  $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$  的特征值向量构成;  $\mathbf{V}$  的列向量由  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  的特征值向量构成; 对角矩阵  $\mathbf{S}$  的主对角线为奇异值,且为非零元素,以递减的顺序依次排列在对角矩阵中。对角矩阵主对角线上的奇异值越大,在构成地震数据的过程中所占的成分比也会随之增大,根据要求选取特定的前  $p$  个奇异值参与数据重构,得到目标信号。

### 1.2 时间域局部 SVD 去噪

当地震道集中有效信号的横向相干性较强、同相轴水平连续时,时间域全局 SVD 即可取得理想的随机噪声压制效果,但当同相轴以倾斜、孤立状态存在时,应用全局 SVD 处理难以达到精度要求。在实际资料处理中,必须采用时间域局部 SVD 克服这一缺陷,其基本思路为:首先将输入的地震数据划分为若干个时窗,对时窗内数据进行拉平处理,利用拉平信号在横向上具有较强的相干性,对其进行 SVD 滤波,通过时窗滑动对全部数据实现去噪处理。

其中,拉平有效信号是时间域局部 SVD 算法的关键,具体方法如下。

假定时窗内的数据用矩阵  $\mathbf{B}$  表示,即

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1l} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{kl} & b_{k2} & \cdots & b_{kl} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: $k$  表示道数, $l$  表示每道采样点数, $b_{ij}(i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, l)$  表示第  $i$  道第  $j$  个样点值。

以时窗数据的叠加结果  $\mathbf{R}$  作为初始参考道<sup>[12]</sup>,即

$$\mathbf{R} = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_l]^T, r_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_{ij}. \quad (4)$$

运用互相关计算,求取各道相对于参考道的时移值,对有效信号进行第一次拉平,然后用公式(4)重新求取参考道  $\mathbf{R}$ ,重复多次以获取较理想的参考道。

### 1.3 频率域局部 SVD 去噪

随机噪声是一种频带分布较宽的干扰波,在频率域一般不具相干性,而对于同一工区,地震信号在频率域往往具有良好的相干性。因此可以在频率域实现局部 SVD 去噪技术,其基本思路是:首先对时空域滑动窗内地震数据进行傅里叶变换,利用滑动窗内每一频率切片构造 Hankle 矩阵,对构造的 Hankle 矩阵进行 SVD 降秩重构,最后再反傅里叶变换回时间域,即得去噪后的信号。

其中,利用频率切片构造 Hankle 矩阵的方法如下:

设有频率切片序列  $\mathbf{F} = [f(1), f(2), \dots, f(k), \dots, f(N)]$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为数据长度,用上述数据构造如下  $p \times q$  阶 Hankle 矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} f(1) & f(2) & \cdots & f(q) \\ f(2) & f(3) & \cdots & f(q+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(p) & f(p+1) & \cdots & f(N) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: $p + q - 1 = N$ ,  $p \geq q$ ,  $\mathbf{H}(i, j) = f(i + j - 1)$ 。Hankle 矩阵元素在逆对角线方向相等。

## 2 时间-频率域联合 SVD 去噪

### 2.1 时间域局部 SVD 去噪的模型试验

为验证时间域局部 SVD 去噪技术的效果,在模拟地震记录中加入随机噪声,严重降低了地震信号的信噪比。无噪声理论数据如图 1(a)所示,既包含水平同相轴,也包含倾斜、不连续等多种同相轴,图 1(b)为其添加随机噪声后的结果,对该数据采用时间域 SVD 技术进行去噪处理以分析时间域 SVD 算法的优缺点。

图 1(c)为时间域全局 SVD 去噪结果,图 1(d)为时间域局部 SVD 去噪结果,图 1(e)为时间域全局 SVD 去除的噪声,图 1(f)为时间域局部 SVD 去除的噪声。其中图 1(d)的去噪参数如下:时窗大小 10 道  $\times$  50 ms,空间滑动步长 7 道,时间滑动步长 30 ms,去噪结果由第一个奇异值重构得到。

由图 1 可见,全局 SVD 能够有效地压制随机噪声,保留水平连续同相轴。但当信号不连续时,全局 SVD 的处理结果中出现了假象;当同相轴发生倾斜时,全局 SVD 在压制随机噪声的同时,也损坏了有效信号(图 1(e))。时间域局部 SVD 技术则可克服上述缺陷,但受时窗参数的影响,部分倾斜同相轴能量衰减严重(图 1(f))。

### 2.2 频率域局部 SVD 去噪的模型试验

应用频率域局部 SVD 技术对图 1(b)含噪数据进行处理,应用效果如图 2 所示,去噪参数如下:时窗大小 16 道  $\times$  64 ms,空间滑动步长 10 道,时间滑动步长 50 ms,去噪结果由前三个奇异值重构得到。图 2(a)

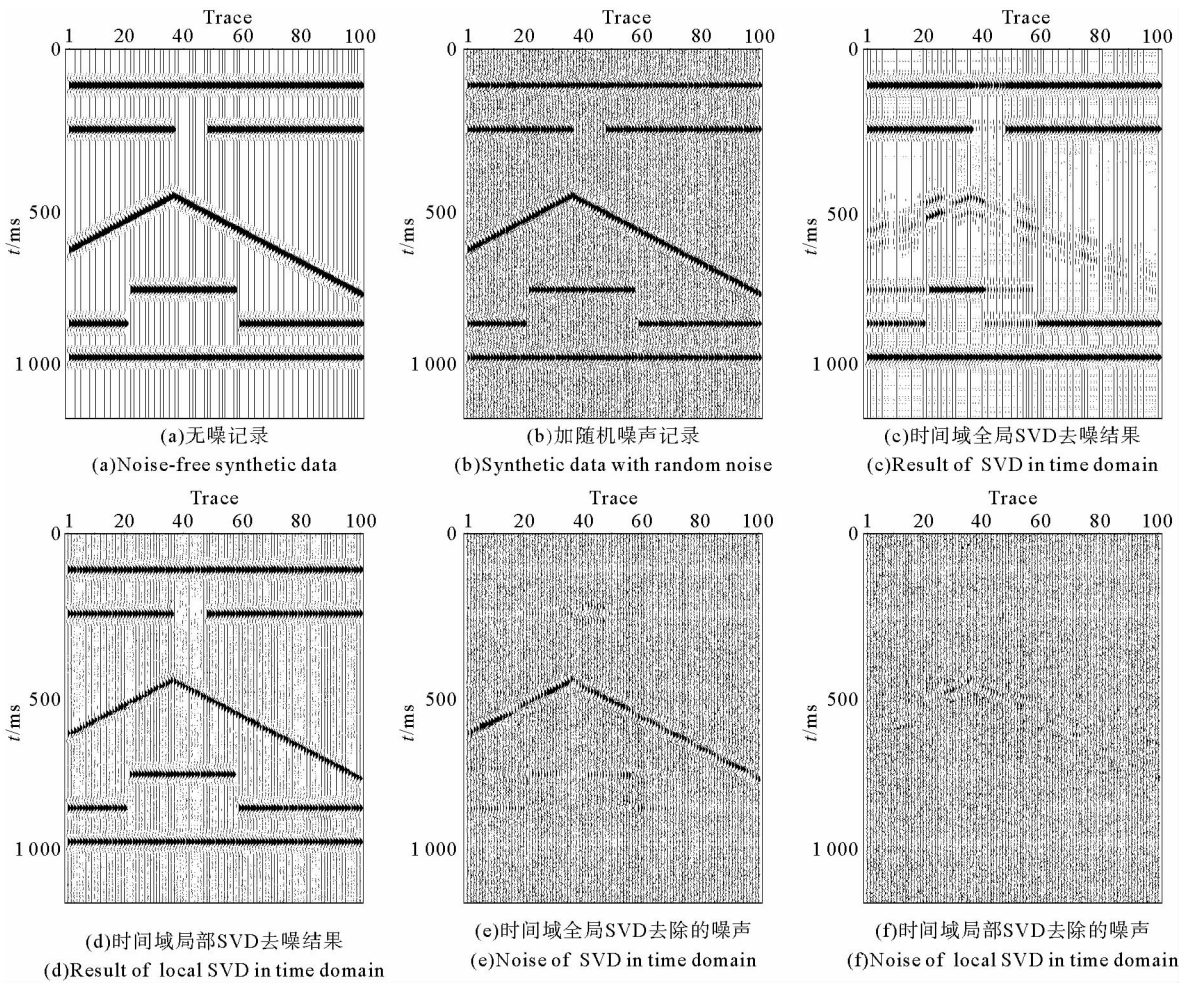


图 1 理论数据时间域去噪结果

Fig. 1 Results of synthetic data in time domain

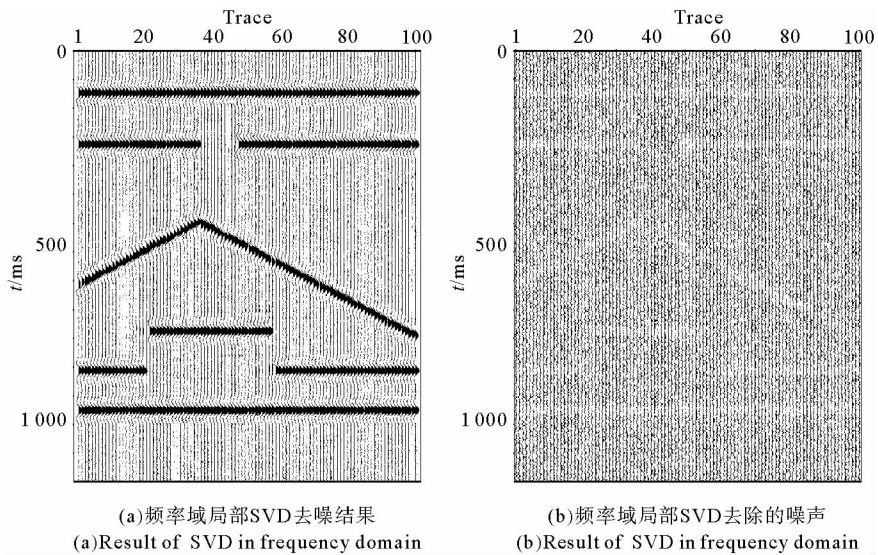


图 2 理论数据频率域去噪结果

Fig. 2 Results of synthetic data in frequency domain



是应用频率域局部 SVD 处理的结果,图 2(b)是去除的噪声,可以看出强噪声得到了压制,有效信号保存比较完整。与时间域局部 SVD 处理结果(图 1(d))对比,图 2(a)中有效信号的能量不受同相轴倾斜率的限制,具有高保真性。同时,频率域局部 SVD 去除的噪声中,看不到明显的倾斜同相轴信息,较图 1(f)有大的改观。但部分噪声仍均匀分散在道集中,没有剔除干净,资料信噪比欠佳。

### 2.3 时间-频率域联合局部 SVD 去噪

时间域局部 SVD 和频率域局部 SVD 均为优化的 SVD 算法,它们在随机噪声的压制中发挥了重要作用,解决了有效信号倾斜、不连续情况下严重失真的问题,但在实际资料的处理中仍对倾斜或弯曲同相轴有局限性。

因此,本文研究了时间-频率域联合局部 SVD 法,结合两种变换域的特性,同时利用信号在时间域和频率域的相关性进行去噪,适用于多种同相轴并存的情况,去噪效果优于单域处理。时间-频率域联合局部 SVD 法,首先对输入的道集信号进行时间域局部 SVD 去噪,然后将信号变换到频率域,同时对时间域 SVD 处理后的数据进行频率域局部 SVD 去噪,以达到彻底压制随机噪声的目的,具体步骤如下:

①根据地震记录中有效信号的分布特点,将数据划分为若干时窗,对时窗内数据依次进行拉平处理、SVD 分解重构(重构时  $p = 1$ )、反拉平处理,对所有时窗内的数据都做上述处理,即可得到去除随机噪声的道集记录;

②对去噪后的地震记录重新划分时窗,将时窗内数据变换到频率域;

③对时窗内提取的每一频率切片依次构建 Hankle 矩阵、SVD 分解重构(重构时  $p = 3$ )、反 Hankle 矩阵变换,通过时窗滑动实现频率域信号去噪,最后再反变换回时间域即为目标信号。

应用时间-频率域联合局部 SVD 对图 1(b)含噪数据进行处理,应用效果如图 3 所示。去噪参数如下:时间域时窗大小 30 道  $\times$  90 ms,空间滑动步长 25 道,时间滑动步长 50 ms,取第一个奇异值进行数据重构;频率域时窗大小 64 道  $\times$  128 ms,空间滑动步长 42 道,时间滑动步长 100 ms,去噪结果由前三个奇异值重构而得。由图可知,时间-频率域联合局部 SVD 有其独特的优越性,在去除随机噪声的同时能很好地保护有效信号,同相轴连续性增强,信噪比提高,效果优于单域处理。

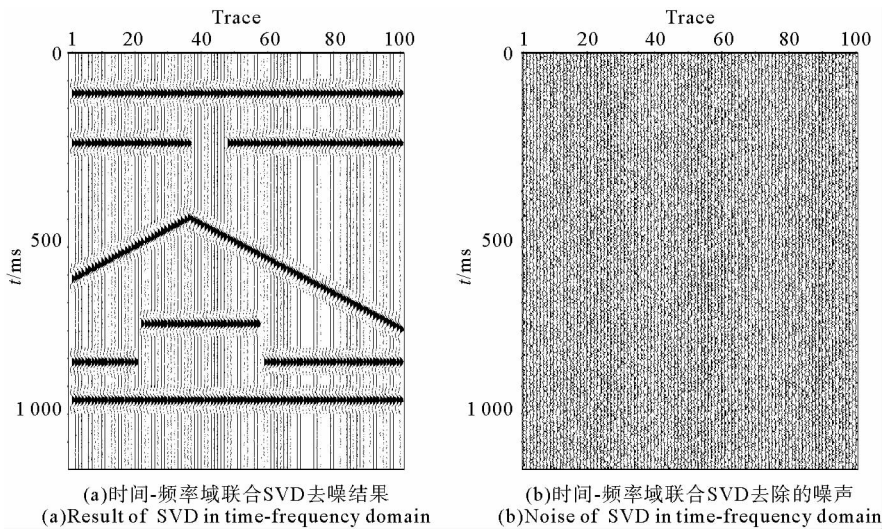


图 3 理论数据时频域联合去噪结果

Fig. 3 Results of synthetic data in time-frequency domain

### 2.4 实际资料应用效果分析

基于理论模型的应用分析,将本文方法应用于实际地震资料,分析其应用效果。图 4(a)为某工区地震实测记录运用常规去噪处理后的 CDP 道集,分别应用时间域局部 SVD、频率域局部 SVD、时间-频率域联合

SVD 对其去噪后的道集如图 4(b), 4(c), 4(d), 其他处理流程及参数设置均相同。显然运用本文方法压制随机干扰后, 同相轴清晰, 连续性增强, 更易于追踪, 在保证有效信号不失真的同时极大提高了地震资料的信噪比, 记录质量得到明显改善。

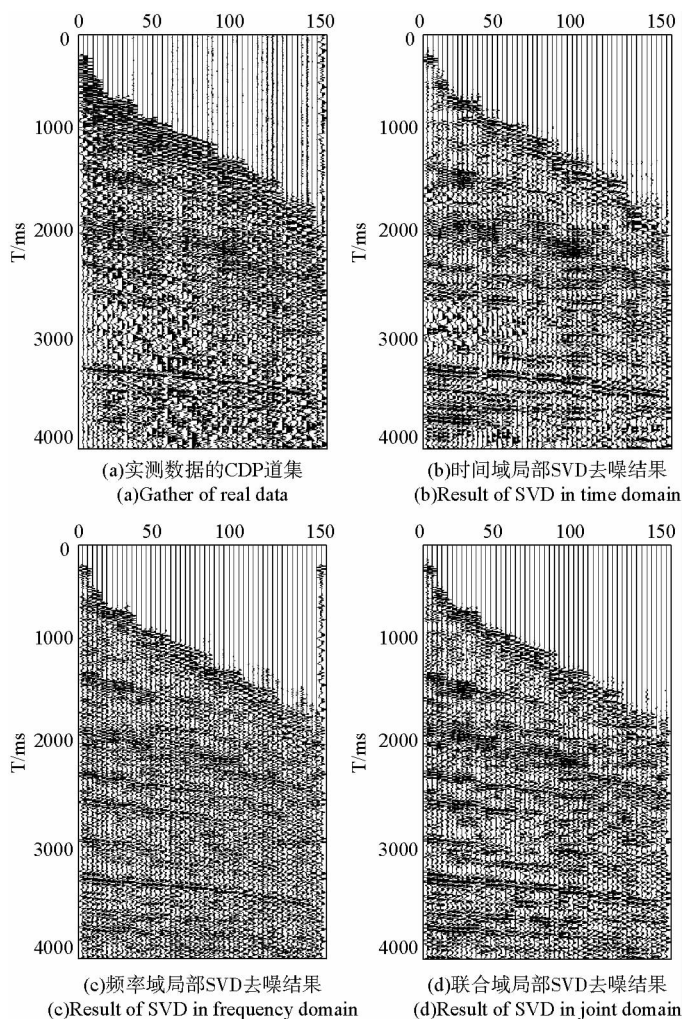


图 4 实测资料叠前去噪结果对比

Fig. 4 Comparison of field seismic results for pre-stack denoising

图 5 为不同方法去噪后的振幅谱, 根据振幅谱也可看出, 时间域局部 SVD 和频率域局部 SVD 都不同程度地压制了随机噪声, 但时间域由于受滤波时窗参数的影响, 在 100~150 Hz 频段内的压制效果不佳, 频率域局部 SVD 处理中则损坏了部分有效信号的能量。运用时间-频率域联合局部 SVD 法去噪, 高低频随机噪声都得到了有效压制, 同时最大限度地减少了对有效信号能量的损坏, 提高了地震资料的信噪比和分辨率。

由图 6 对不同去噪方法后的叠加剖面进行对比可知, 采用本文方法去噪, 部分细节及不连续同相轴都在叠加剖面中保留下来, 地震信息清晰完善, 叠加效果显著。

### 3 讨论与结论

主要研究了奇异值分解法压制随机噪声技术, 在分析时间域局部 SVD 和频率域局部 SVD 去噪技术的基础上, 提出了时间-频率域联合局部 SVD 去噪技术, 该技术能够实现宽频带随机干扰的压制, 同时保护有效信号少受损伤, 为随机干扰的压制提供新的手段与工具。通过时间-频率域联合局部 SVD 在模型与实测

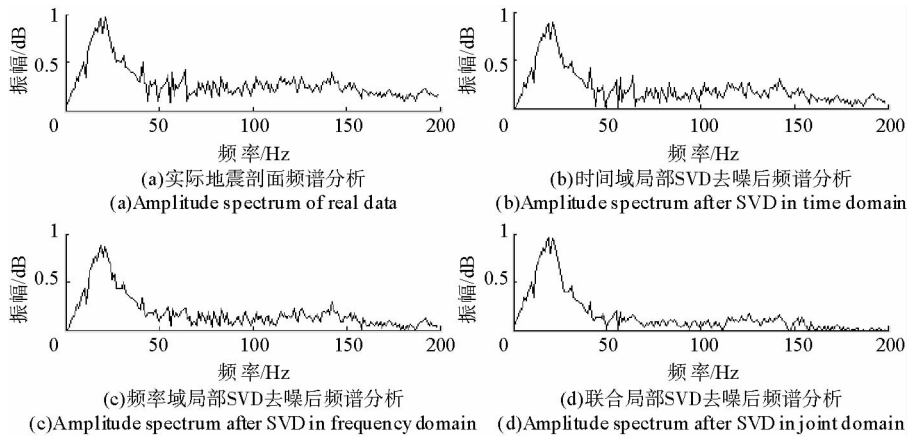


图 5 不同方法去噪后的振幅谱

Fig. 5 Amplitude spectrum after different method denoising

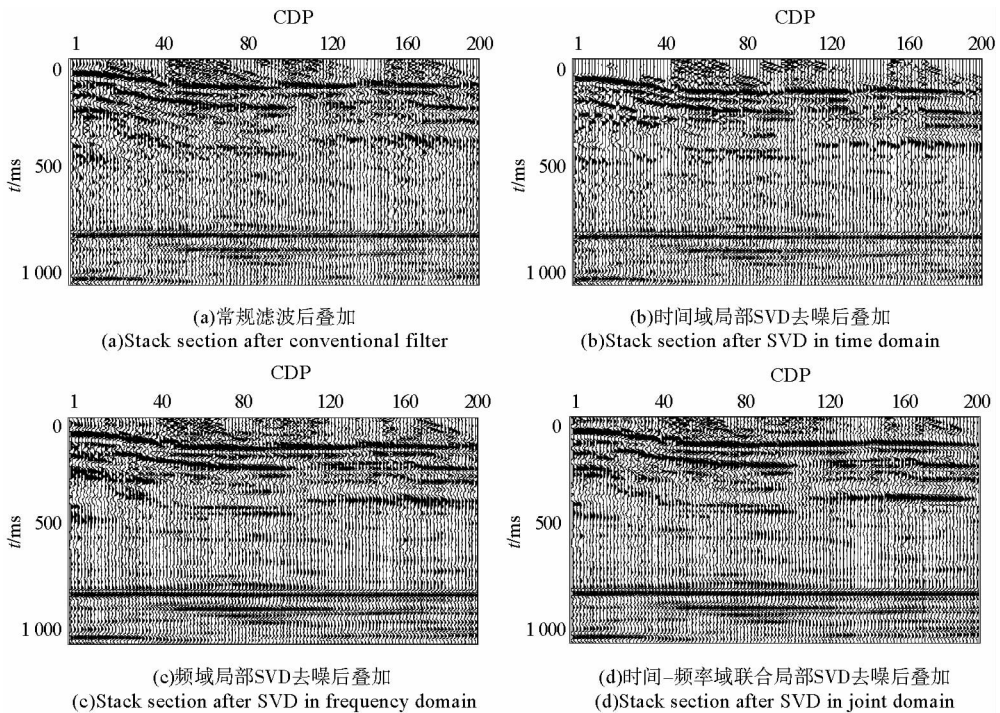


图 6 实测资料去噪后的叠加剖面

Fig. 6 Stack section of real data after denoising

资料去噪处理中的应用,得出如下结论:

1) 运用时间域局部 SVD 法去噪,时窗大小的选取至关重要,时窗选取较大时能够更大限度压制随机干扰,但时窗选取过大会使得信号的局部相干性受到限制;时窗选取太小,则会形成小时窗内随机噪声具有相干性的假象,使得部分随机干扰难以滤除。

2) 由于随机噪声在地震资料中的分布较广,依靠单一的去噪处理技术往往不能达到勘探精度的要求,本研究采用时间-频率域对地震资料,实现联合局部 SVD 随机噪声压制,将时间域、频率域 SVD 的优势互补,进行叠前去噪,在有效压制随机噪声的同时,适应同相轴能量的横向变化,具有高保真性,处理效果优于单一的压噪技术。

参考文献:

- [1]黄雪继,谭未一,刘来祥. 多项式拟合技术在地震数据处理中的应用[J]. 西部探矿工程,2012,24(11):139-144.  
Huang Xueji,Tan Weiyi,Liu Laixiang. The application of polynomial fitting in seismic data processing[J]. West-China Exploration Engineering,2012,24(11):139-144.
- [2]康冶,于承业,贾卧,等.  $f-x$  域去噪方法研究[J]. 石油地球物理勘探,2003,38(2):136-138.  
Kang Ye,Yu Chengye,Jia Wo,et al. A study on noise-suppression method inf-xdomain[J]. Oil Geophysical Prospecting,2003,38(2):136-138.
- [3]Ouadfeul S A,Aliouane L. Random seismic noise attenuation data using the discrete and the continuous wavelet transforms [J]. Arabian Journal of Geosciences,2014,7(7):2531-2537.
- [4]Zhang R,Trad D,Ulrych T J. Hybrid, wavelet transform based,noise attenuation[J]. Integrated Computer-Aided Engineering,2005,12(1):91-98.
- [5]张宇,张关泉. 小波变换用于去除高频随机噪声[J]. 石油地球物理勘探,1997,32(3):327-338.  
Zhang Yu,Zhang Guanquan. High-frequency random noise elimination using wavelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting,1997,32(3):327-338.
- [6]Sergio L M,Freire S L M,Ulrych T J. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling[J]. Geophysics,1998,53(6):778-785.
- [7]Bekara M,Baan M V D. Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data[J]. Geophysics,2007,72(2):59-65.
- [8]Jackson G M,Mason I M,Greenhalgh S A. Principal component transforms of triaxial recordings by singular value decomposition[J]. Geophysics,1991,56(4):528-533.
- [9]陆文凯,牟永光. 一种改进的 SVD 滤波器[J]. 石油地球物理勘探,1996,31(5):736-741.  
Lu Wenkai,Mou Yongguang. An improved SVD filter[J]. Oil Geophysical Prospecting,1996,31(5):736-741.
- [10]詹毅,赵波. 自动追踪 SVD 压制线性干扰方法的改进[J]. 石油地球物理勘探,2008,43(2):158-160.  
Zhan Yi,Zhao Bo. Improvement of suppressing linear interference by automatically tracing SVD[J]. Oil Geophysical Prospecting,2008,43(2):158-160.
- [11]Trickett S. F-xy eigenimage noise suppression[J]. Geophysics,2003,68(2):751-759.
- [12]陈美年,何兵寿. 局部奇异值分解法压制随机干扰[J]. 中国煤炭地质,2009,21(8):51-55.  
Chen Meinian,He Bingshou. Local singular value decomposition for random noise suppressing[J]. Coal Geology of China,2009,21(8):51-55.

(责任编辑:高丽华)