

三维地震资料时变空变频谱编辑高分辨率处理方法

徐强¹, 徐爽², 李志娜³

(1. 中海油田服务股份有限公司物探事业部研究院, 天津 300451;

2. 中国石油集团东方地球物理公司研究院, 涿州 072750;

3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘要: 地震资料由于地层吸收衰减等方面原因, 地震剖面的纵向分辨率时常无法满足勘探开发的需求, 因此需要对地震资料进行提频或者优势频带加强等处理。笔者基于时频分析的频率恢复技术, 通过给定三维频率域编辑系数, 并且通过三维空间线性插值、移动步长平滑等处理, 得到对应三维地震数据体每一道数据的频率域频谱优化调整算子。再将频率域算子转时间域与地震数据进行卷积运算, 实现对三维地震数据体振幅谱编辑, 以此进行提高分辨率处理。模拟数据和实际地震资料验证测试表明, 能够有效地对地震数据振幅谱进行优化处理, 对于提高地震资料的分辨率、拓展资料频带、提高主频等具有很好的作用。

关键词: 频率; 振幅谱; 分辨率; 主频

中图分类号: P631.44

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.04.03

0 引言

在不同的勘探阶段, 为了满足不同勘探目的的需要, 需要进行针对性的目标处理。在勘探取得突破后, 需要对油田主要区域进行目标处理, 以满足油田开发的需求。由于地震波在地层中传播时, 会发生吸收衰减, 地震剖面的纵向分辨率常常无法满足开发的需求, 需要对地震剖面进行提高分辨率、拓展频谱等特殊处理^[1-2]。如何有效地提高地震资料的分辨率一直是地震勘探中的重点和难点问题。

针对地层的吸收补偿技术, 常用的方法有反Q滤波、谱白化等, 来补偿频率的衰减和振幅的损失。1982年, Hale^[3]研究了基于岩石物理的非弹性衰减模型, 提出了Q自适应方法并最早实现了反Q滤波在实际资料中的应用。1985年, Bickel等^[4]研究了基于平面波的传播进行反Q滤波计算, 通过设计

时变滤波算子, 实现了时变反Q滤波处理。反Q滤波技术在后续又有很多学者提出了不同的算法^[5-7], 技术得到了很好的发展。

基于时频分析的频率恢复技术是一种在频率域对频带进行拓宽从而提高地震剖面分辨率的一种重要手段。2009年, 高静怀等^[8]考虑到地震子波的时变特征, 基于变子波模型对地震资料进行分段处理, 在提高分辨率的同时较好地保持了地震资料的相对能量。2014年, 尚新民等^[9]考虑到地震子波的时变特征, 基于变子波模型对地震资料进行分段处理, 可以在提高分辨率的同时较好地保持地震资料的相对能量。另外, 还有将希尔伯特-黄变换方法引入到地震资料处理中, 通过统计不同时间、不同频率的能量分布, 求取时频域的补偿因子, 在保持地震资料相对振幅的同时, 一定程度提高了纵向分辨率^[10]。

笔者提出了一种更为简易的三维空变和时变频

收稿日期: 2023-04-18

第一作者: 徐强(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震资料数据处理方法和技术研究, E-mail: xuqiangshidai@163.com。

谱优化处理方法,也是一种基于时频分析的频率恢复技术。通过给定频率域编辑系数,进行三维空间线性插值计算、移动步长平滑处理,实现三维地震数据体每一道都有一个和它对的频率调整算子。再将算子转时间域后与地震数据进行卷积,多个时窗之间进行插值和外推处理,实现三维地震数据体空变、时变的频率优化。通过模拟数据和实际资料的测试,证明本方法能够有效地对频率振幅谱进行优化处理,对于提高资料的分辨率、拓展资料频带、提高主频、弱信号加强等具有很好的作用。

1 方法原理

首先给定某个时间段 T1 到 T2 时间内,多个不同纵测线 INLINE、不同的横测线 CROSSLINE、频率域振幅编辑系数,如表 1 所示。其中 I1、I2...为 INLINE 号, a1、a2、b1、b2...为 CROSSLINE 号。fa11、fa12、fa21、fa22...为频率值, a11、a12、a21、a22...为对应频率值的振幅调整倍数, a1min、a2min、b1min、b2min...为进行频率调整的最小频率值, a1max、a2max、b1max、b2max...为进行频率调整的最大频率值。

对于位置为 INLINE (I1)、CROSSLINE (a1) 的地震道对应的频率编辑系数 fa1(f) (f 为频率采样,从 1 Hz 到最大频率)有三种情况:

第一种情况,当频率 f 小于等于 a1min, fa1(f)=1。

第二种情况,当频率 f 大于等于 a1max, fa1(f)=1。

第三种情况,当频率 f 大于 a1min 小于 a1max,进行线性插值,例如频率 fa11 与 fa12 之间,频率编辑系数:

$$fa1(f) = a11 + (f - fa11) * (a12 - a11) / (fa12 - fa11) \tag{1}$$

同理可以求到位置为 INLINE(I1)、CROSSLINE(a2)的地震道对应的频率编辑系数 fa2(f)。

对相同纵测线 INLINE 在不同横测线 CROSSLINE 之间对应每一个频率采样,进行线性插值。在 INLINE (I1)、CROSSLINE (a1) 和 INLINE (I1)、CROSSLINE(a2) 对应的频率编辑系数进行插值得到 INLINE(I1)、CROSSLINE(j) 点对应的频率编辑系数为:

$$fI1j(f) = fa1(f) + (j - a1) * (fa2(f) - fa1(f)) / (a2 - a1) \tag{2}$$

对应每一个频率采样,INLINE 方向采用线性插值,例如在 INLINE(I1)、CROSSLINE(j) 和 INLINE(I2)、CROSSLINE(j) 进行插值得到 INLINE (i)、CROSSLINE(j) 点对应的频率编辑系数为:

$$fij(f) = fI1j(f) + (i - I1) * (fI2j(f) - fI1j(f)) / (I2 - I1) \tag{3}$$

表 1 频率域振幅编辑系数

Tab.1 Amplitude editing coefficients in the frequency domain

| time | inline | crossline | minimum frequency | maximum frequency | frequency | coefficient | frequency | coefficient | frequency | coefficient |
|-------|--------|-----------|-------------------|-------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| T1-T2 | I1 | a1 | a1min | a1max | fa11 | a11 | fa12 | a12 | ... | ... |
| | I1 | a2 | a2min | a2max | fa21 | a21 | fa22 | a22 | ... | ... |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | I1 | am | ammin | ammax | fam1 | am1 | fam2 | am2 | ... | ... |
| | I2 | b1 | b1min | b1max | fb11 | b11 | fb12 | b12 | ... | ... |
| | I2 | b2 | b2min | b2max | fb21 | b21 | fb22 | b22 | ... | ... |
| | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | I2 | bm | bmin | bmax | fbm1 | bm1 | fbm2 | bm2 | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |

如图 1 为先进行 CROSSLINE 之间线性插值,再进行 INLINE 方向采用线性插值示意图。这样就求得了三维空间频率域编辑系数。

整个工区的每一个地震道都有与其对应的频率域振幅编辑系数,采用移动步长方法平滑频率域振幅编辑系数,例如使用 5 点移动步长平滑,则平滑后

编辑系数 sfij(i)为:

$$sfij(i) = (fij(i-2) + fij(i-1) + fij(i) + fij(i+1) + fij(i+2)) / 5 \tag{4}$$

如图 2 所示,为频率域编辑系数 5 点移动步长平滑前后对比图。

将频率域编辑系数 sfij(f)做傅里叶反变换转

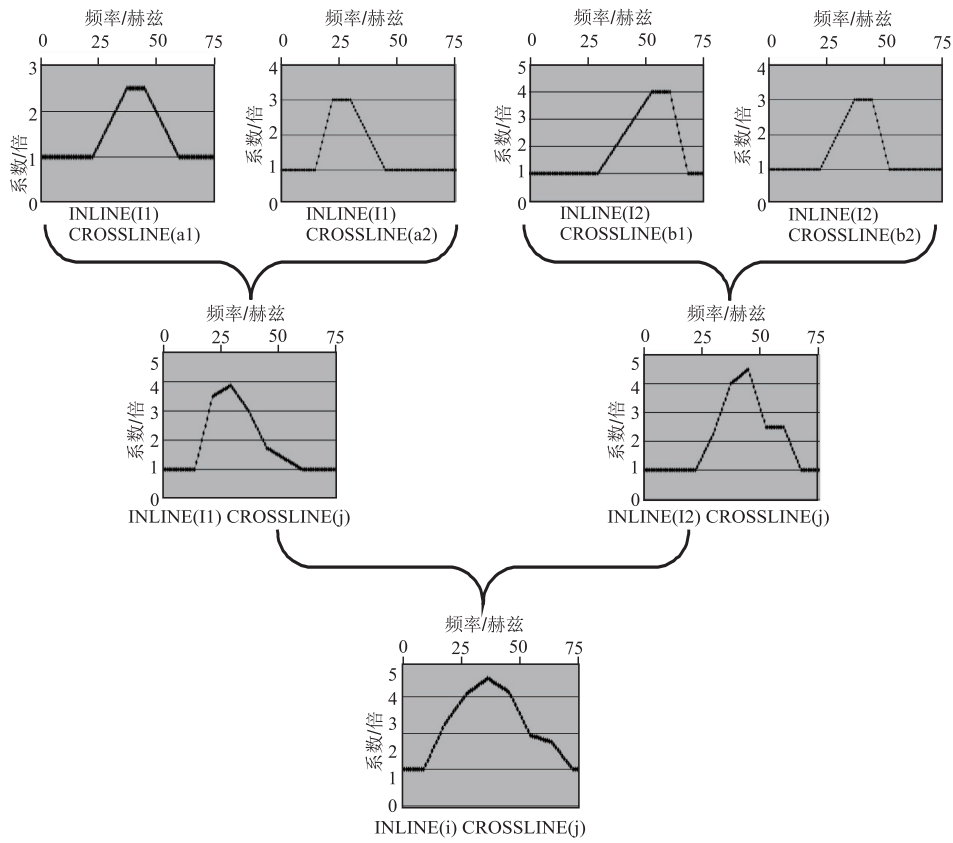


图 1 CROSSLINE 和 INLINE 方向频率域系数线性插值示意图

Fig. 1 Shows the schematic diagram of linear interpolation of frequency domain coefficients in the CROSSLINE and INLINE directions

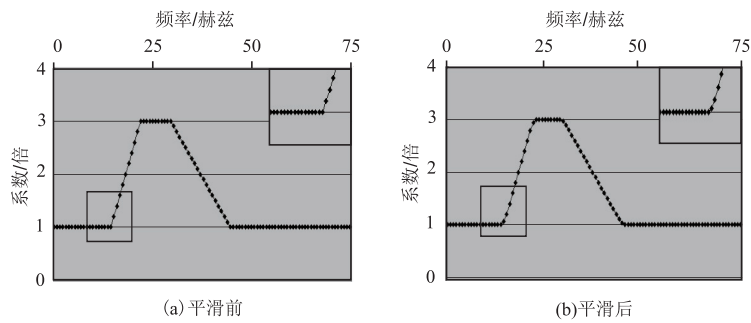


图 2 频率域编辑系数平滑前后示意图

Fig. 2 Shows the before and after schematic diagrams of smoothing the amplitude editing coefficients in the frequency domain

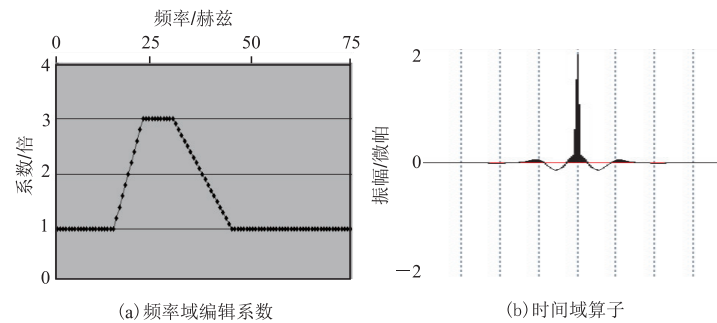


图 3 频率域编辑系数和时间域算子示意图

Fig. 3 Shows a schematic diagram of amplitude editing coefficients in the frequency domain and time-domain operators

换到时间域,得到的时间域算子 $x(n)$ 。如图 3(b) 所示,为频域编辑系数对应的时间域算子。傅里叶反变换计算公式为:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N-1} s f i j(f) e^{j \frac{2\pi n}{N}} \quad (5)$$

其中, N 为算子长度。

将时间域算子 $x(n)$ 与对应的地震道 D 进行褶积运算。得到 $T1$ 到 $T2$ 时间段频率优化调整后地震数据 $DD1$:

$$DD1 = x(n) * D \quad (6)$$

同理,求出下一个时间段 $T3$ 到 $T4$ 时间段频率优化调整后地震数据 $DD2$ 。

最终得到频率优化调整后数据地震数据 $DATA$ 为:

$T1$ 到 $T2$ 时间, $DATA = DD1$ 。

$T2$ 到 $T3$ 时间,进行线性插值,

$$DATA(t) = DD1 * ((T3 - t)/(T3 - T2) + DD2 * ((t - T2)/(T3 - T2)) \quad (7)$$

t 为时间采样。

$T3$ 到 $T4$ 时间, $DATA = DD2$ 。

...

以上为三维地震资料时变空变频谱编辑方法,是一种十分灵活的处理方法。可以用于提高地震资料的高频或者低频能量、提高地震资料的主频,或者工区内某一位置进行优势频带加强等处理。可以用于叠加数据体、共偏移距道集、偏移处理后的共成像点道集数据。

通常需要测试多组频谱编辑系数,依据测试结果测试来优选合适的编辑系数。测试结果的频谱一般应尽可能符合未经衰减的地震数据频谱形态,如图 4 所示未经衰减激发子波的频谱示意图。

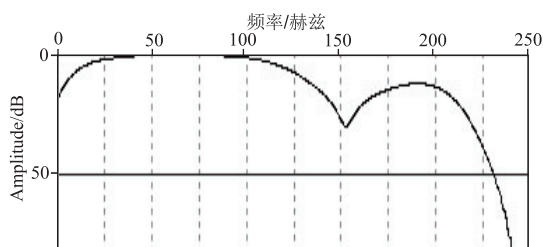


图 4 激发子波的频谱示意图

Fig. 4 Shows spectral diagram of seismic excitation wavelet

2 模型测试

利用正演模型来测试文中频率编辑调整处理的效果。使用主频为 30 Hz 的子波正演了一个具

有四个界面的薄层反射剖面,速度模型如图 5 所示。图 6 为正演的地震记录,图中箭头所指正演模型正极性反射界面,由于 30 Hz 的主频较低,对于速度模型中的四个反射界面,只有三个正极性同相轴显示出来,如蓝色箭头所示,说明纵向分辨率明显不足。

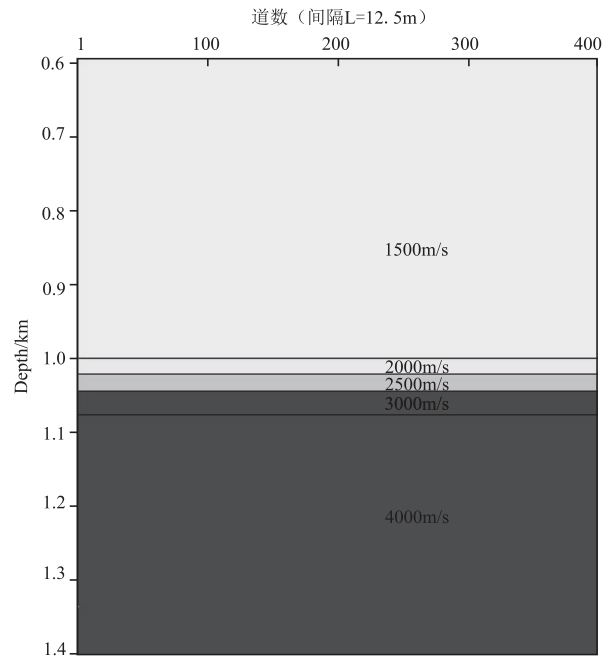


图 5 正演速度模型

Fig. 5 Shows the forward velocity model

使用本文方法进行频率域振幅谱编辑处理,测试三种方案,使用主要参数分别为:

第一种方案: $a_{1min} = 40, a_{1max} = 75, fa_{11} = 50, a_{11} = 2, fa_{12} = 60, a_{12} = 3$;

第二种方案: $a_{1min} = 40, a_{1max} = 75, fa_{11} = 50, a_{11} = 4, fa_{12} = 60, a_{12} = 5$;

第三种方案: $a_{1min} = 40, a_{1max} = 75, fa_{11} = 50, a_{11} = 6, fa_{12} = 60, a_{12} = 7$ 。

对三种方案提频之后地震模型剖面进行对比。如图 6(b) 所示,方案一四个正极性反射界面虽然都有了一定程度的显现,但是第三个反射界面还是不太清晰。如图 6(c) 和图 6(d) 所示,方案二和方案三效果都较好,分辨率得到了改善,同相轴也更加聚焦。通常会利用频谱图进行质控,以图 4 原始子波的频谱示意图为参考。从图 6(e) 三种方案的频谱对比图中也可以看出,虽然三种方案经过频谱编辑后高频能量和主频都得到一定程度的提升。但是在 40 Hz~50 Hz 频率附近,第一种方案(蓝色)振幅偏低,第三种方案(青色)振幅偏高,第二种方案(绿色)

提频后的整体频谱特征较好,与原始子波频谱形态最为相似。因此综合考虑剖面的效果和频谱的对比,针对此正演模型数据,应该优选第二种参数方案。

通过正演模型测试,可以看出,经过本文方法处理后,虽然不能彻底地解决纵向分辨率问题,但在频率编辑调整后,剖面分辨率不足的问题得到了很好地缓解。

3 实际资料应用

以中国某海域的实际地震资料为例,整个工区为浅水环境,水深约 20 m~30 m。使用工区偏移后的叠加数据对本方法进行测试验证。本方法的处理通常是在偏移后的三维叠加数据上进行,图 7 是

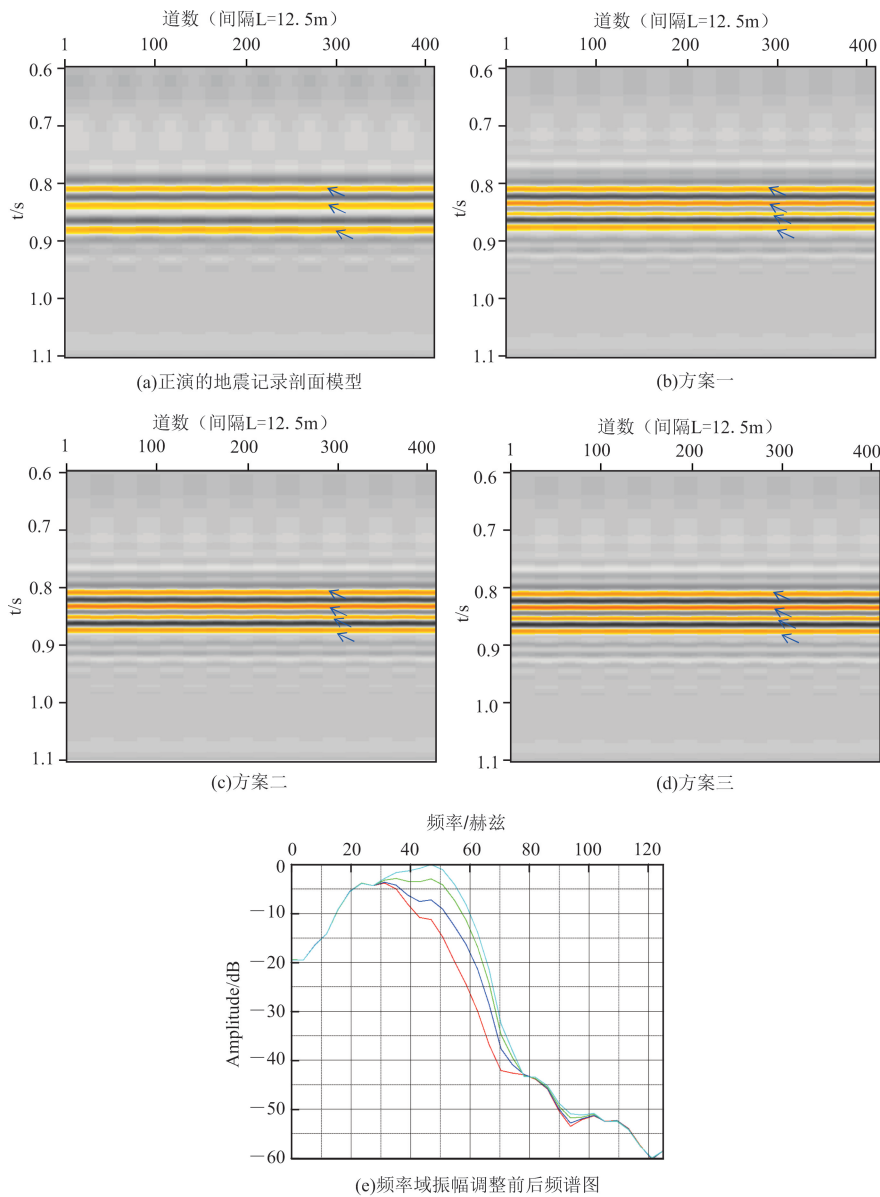


图 6 正演的地震记录剖面模型和三种方案进行频率域振幅谱编辑优化后的正演地震剖面及频谱图

Fig. 6 Shows the seismic record profile model of the forward simulation and the seismic profile and frequency spectrum diagram of the forward simulation after optimizing the frequency domain amplitude spectrum through three schemes

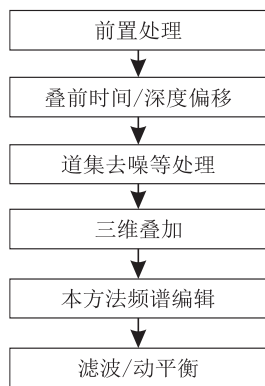


图 7 结合本方法的处理流程示意图

Fig. 7 Shows schematic diagram of the processing flow combined with this method

结合本方法的处理流程示意图。表 2 为工区位置 A 和位置 B 的空变频率域振幅谱编辑参数。图 8(a) 和图 8(b) 为工区位置 A 处经过本方法处理前后的效果对比, 从对比图中可以看到地震剖面的纵向分辨率得到明显提高。从频谱对比图(图 9(a)) 也可以看出在频率 50 Hz~70 Hz 位置, 频谱能量得到提升。工区 B 位置处理效果如图 9(a) 和图 9(b) 所示。可以看到地震剖面的纵向分辨率同样得到很大的提升。尤其是在蓝色箭头位置, 之前无法识别的地震同相轴, 在提频后也很好地显现出来。从频谱对比图(图 9(b)) 也可以看出在频率 40 Hz~60 Hz 位置频谱能量得到明显提升。通过实际数据的测试验证, 该方法可以较好地实现对地震剖面进行频谱编辑, 进而达到提高地震剖面纵向分辨率的目的。

表 2 某海域实际地震资料频率域振幅编辑系数

Tab. 2 Shows the frequency domain amplitude editing coefficients of actual seismic data in a certain sea area

| | time | inline | crossline | minimum frequency | maximum frequency | frequency | coefficient | frequency | coefficient |
|------|----------|--------|-----------|-------------------|-------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| A 位置 | 0.8-1.3s | 1 | 2 500 | 40 | 80 | 55 | 2 | 70 | 4 |
| | | 1 | 4 000 | 40 | 80 | 55 | 2 | 70 | 4 |
| B 位置 | 1.3-1.7s | 1 | 500 | 30 | 65 | 45 | 3 | 60 | 5 |
| | | 1 | 2 000 | 30 | 65 | 45 | 3 | 60 | 5 |

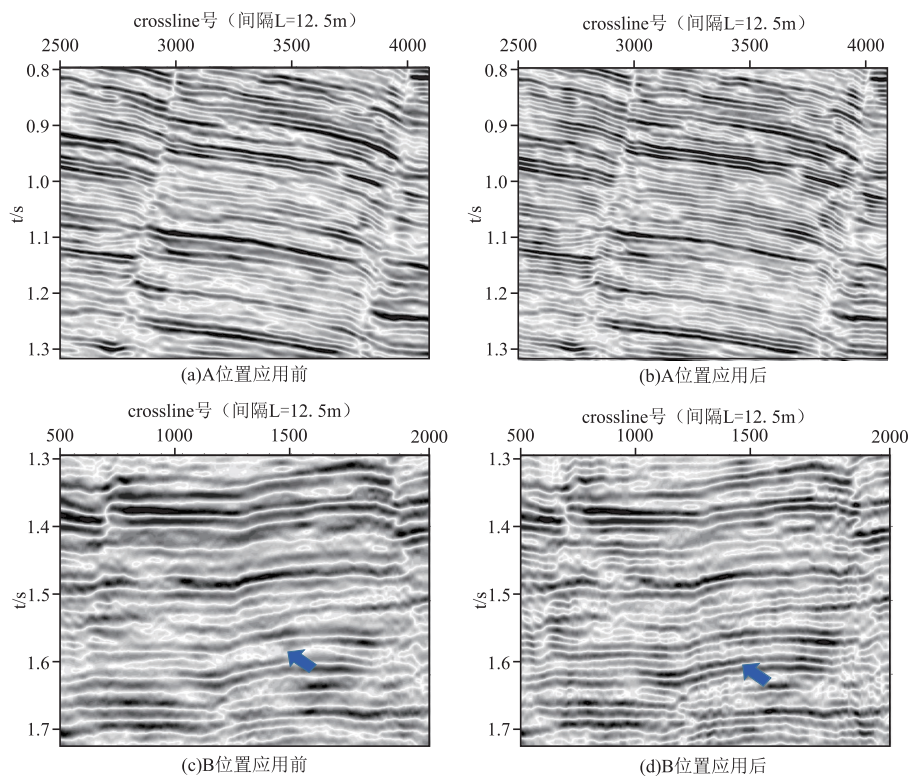
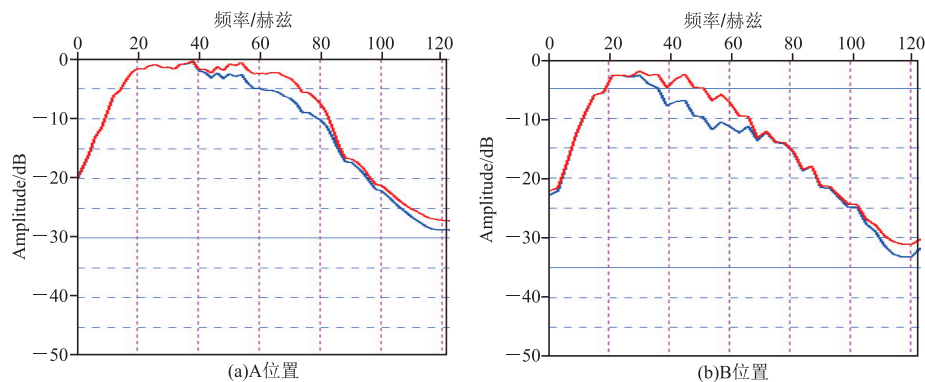


图 8 A 位置和 B 位置处本方法提频前后地震剖面对比图

Fig. 8 Shows the comparison of seismic profiles before and after the application of the proposed method at positions A and B



蓝色为应用前,红色为应用后

图9 A位置和B位置处地震剖面对应的频谱对比图

Fig. 9 Shows the comparison of frequency spectra corresponding to the seismic profiles at positions A and B

4 结论

利用人为给定的频率域编辑系数参数,经过处理后得到时间域的调整算子,再与地震数据褶积运算的方法实现地震数据的空变频谱编辑处理。在实际数据处理时具有十分灵活的控制特点,可以根据需求对地震数据的频谱进行自由编辑,实现提频、提高主频等处理。

本方法的不足是处理人员需要具备一定的地震资料处理经验和对工区的地质认识,以便科学判断地震数据频谱编辑处理效果的合理性。实际资料处理中不宜采用过大的编辑系数,以避免可能出现的同相轴旁瓣增多等假象,影响地震剖面的真实性。

本方法优先推荐用于偏移成像后叠加数据体,因为叠后数据体信噪比较高,提高分辨率效果更好,也可以用于动校正后的共中心点道集数据、偏移后的共成像点道集。

参考文献:

- [1] 王进海,朱敏. 高分辨率资料处理与高信噪比资料[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(4): 587-596.
WANG J H, ZHU M. High-resolution data processing and high signal/noise ratio data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1996, 31(4): 587-596. (In Chinese)
- [2] ZHANG D, CHEN Y K, HUANG W L, et al. Retracted: Multi-step damped multichannel singular spectrum analysis for simultaneous reconstruction and denoising of 3D seismic data[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2016, 13(5): 704-720.
- [3] HALE D. Q-adaptive deconvolution[C]//SEG tech-

nical program expanded abstracts 1982. Society of Exploration Geophysicists, 1982: 82-83.

- [4] BICKEL S H, NATARAJAN R R. Plane-wave Q deconvolution[J]. Geophysics, 1985, 50(9): 1426-1439.
- [5] 曹思远,袁殿. 高分辨率地震资料处理技术综述[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(1): 112-119.
CAO S Y, YUAN D. A review of high-resolution seismic data processing approaches[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(1): 112-119. (In Chinese)
- [6] 高静怀,朱光明,汪文秉,等. 小波变换与地震资料谱白化[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(3): 44-49.
GAO J H, ZHU G M, WANG W B, et al. Wavelet transform and spectrum whitening of seismogram[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(3): 44-49. (In Chinese)
- [7] 徐强. 基于剩余Q值的振幅校正[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊2): 72-75.
XU Q. Amplitude correction based on the residual Q value[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(Suppl 2): 72-75. (In Chinese)
- [8] 高静怀,汪玲玲,赵伟. 基于反射地震记录变子波模型提高地震记录分辨率[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1289-1300.
GAO J H, WANG L L, ZHAO W. Enhancing resolution of seismic traces based on the changing wavelet model of the seismogram[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1289-1300. (In Chinese)
- [9] 尚新民,刁瑞,冯玉苹,等. 谱模拟方法在高分辨率地震资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(1): 75-80.
SHANG X M, DIAO R, FENG Y P, et al. The application of spectral modeling method to high resolu-

- tion processing of seismic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(1): 75—80. (In Chinese)
- [10] 汪小将, 陈宝书, 曹思远. HHT 振幅频率恢复处理技术研究与应用[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 19—22.
- WANG X J, CHEN B S, CAO S Y. A research on HHT amplitude and frequency restoration technique and its application[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(1): 19—22. (In Chinese)

A high-resolution processing method for editing time-varying and spatiotemporal spectra of 3D seismic data

XU Qiang¹, XU Shuang², LI Zhina³

(1. Geophysical R&D institute, COSL, Tianjin 300451, China;

2. BGP Geological Research Center, CNPC, Zhuozhou 072750, China;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China)

Abstract: Due to various reasons, such as absorption and attenuation of seismic data, the longitudinal resolution of the seismic profile sometimes cannot meet the needs of exploration and development so that the seismic data will be processed by increasing frequency or strengthening the dominant frequency band. In this paper, through 3D operator editing, 3D space variant linear difference calculation, and moving step smoothing in the frequency domain, each trace of 3D seismic data volume corresponds to its corresponding spectrum adjustment operator. Then, the operator is converted to the time domain using the seismic data convolution operation method. When time variant adjustment is required, the convolution operation between multiple time windows is processed by difference and extrapolation to realize the space variant and time variant spectrum editing method of 3D seismic data volume. Through the application of analog data and actual data, it is verified that the method in this paper can effectively optimize the programming of frequency amplitude spectrum and has a good role in improving the resolution of data, expanding the frequency band of data, improving the dominant frequency, strengthening weak signals, etc.

Keywords: frequency; amplitude-spectrum; resolution; main-frequency