

文章编号: 1004 — 5589 (2017) 02 — 0595 — 07

拉东域基于最小二乘反演的斜缆数据鬼波压制方法

张威¹, 韩立国¹, 李洪建², 叶林¹, 张齐¹

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
2. 中国石油化工股份有限公司 石油物探技术研究院, 南京 211103

摘要: 斜缆采集资料中鬼波的陷频特征限制了地震记录的频带宽度和分辨率, 给地震资料反演、解释带来困难。通过压制鬼波, 可获得高分辨率的宽频数据。基于拉东域的水平拖缆鬼波压制方法, 结合斜缆鬼波随偏移距变化的特点, 推导出一次波和鬼波在频率-拉东域的逆变换算子, 建立检波器处总波场和海表面处上行波场之间新的关系式, 利用最小二乘反演精确求解获得海表面处上行波场, 并延拓得到拖缆处鬼波压制后的记录。通过考虑鬼波延迟时间受偏移距和出射角的影响, 弥补鬼波延迟时间估计中存在的误差, 无需进行反演迭代求取最优鬼波延迟时间, 提高了计算效率。合成数据及海上实际斜缆数据测试结果表明, 研究方法能较好地压制鬼波, 达到拓宽地震记录频带的目的。

关键词: 斜缆; 去鬼波; 拉东域; 最小二乘反演; 拓宽频带

中图分类号: P631.443 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2017.02.026

De-ghosting of variable-depth streamer data based on least squares inversion in Radon domain

ZHANG Wei¹, HAN Li-guo¹, LI Hong-jian², YE Lin¹, ZHANG Qi¹

1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Geophysical Research Institute of SinoPEC, Nanjing 211103, China

Abstract: The ghost notches limited the frequency bandwidth and resolution of seismic records in variable-depth streamer data, which increase the difficulties of inversion and interpretation of seismic data. By suppressing the ghost, high-resolution broadband data can be obtained. Based on the de-ghosting method of flat-streamer in Radon domain, combining the characteristics of the ghost varied with offset, the authors derive the inverse transform operator for primary wave and ghost wave in frequency-Radon domain and build the new relationship between the total wavefield at the cable and the up-going wavefield at the sea surface. The up-going wavefield at the sea surface can be calculated by the least squares inversion method, and can be extrapolated to obtain the deghosted data at the cable. By considering the influence of emerging angle and offset on the ghost delay time, the error in the ghost delay time estimation is compensated. This method does not need to perform inverse iteration to obtain the optimal ghost delay time, which improves the computational efficiency. Test results on synthetic and field data show that the proposed approach can remove ghost better and broaden the bandwidth of seismic data.

Key words: variable-depth streamer; de-ghosting; Radon domain; least squares inversion; broaden bandwidth

收稿日期: 2016-09-07; 改回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家高新技术发展规划 (“863”计划) 主题项目课题 (2014AA06A605).

通讯作者: 韩立国 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震数据处理解释研究. E-mail: hanliguo@jlu.edu.cn

0 引言

在海洋地震勘探中,由于海水表面的影响,检波器接收到的记录包括来自地下反射界面上行波场和上行波场经海水表面反射到达检波器的下行波场(鬼波)。由于鬼波和一次波相互干涉,产生虚假同相轴,使得地震资料分辨率降低、频带变窄^[1,2]。

由于鬼波和多次波相对于一次波都具有一定的延迟时间,鬼波的压制方法很大程度上可以借鉴多次波的压制方法。孙海龙等^[3]基于波场延拓去除多次波,取得了较好的压制效果;梁全有等^[4]将拉东变换应用到深水地震多次波压制中,对海洋深水大偏移距数据取得了较好的效果;赫建伟等^[5]将波场延拓方法应用于上下缆鬼波的压制中,得到高分辨率、高信噪比的宽频地震数据;Masoomzadeh等^[6]在拉东域实现了对水平拖缆鬼波的压制。

近年来,斜缆数据鬼波的压制受到国内外学者的关注。Soubaras^[7]首先提出常规偏移和镜像偏移联合反褶积方法来压制斜缆鬼波。Poole^[8]基于频率域拉东变换公式,推导出一次波和鬼波逆变换算子,通过反演求解得到鬼波压制后的地震记录。Wang等^[9,10]通过bootstrap方法反演求取最优鬼波延迟时间,在 $f-xy$ 域和 $\tau-p$ 域实现了对鬼波的压制,该方法需要加窗来保证反演结果的精确性。Masoomzadeh等^[11]对海水反射系数进行估计,在拉东域实现了去鬼波,该方法能应用于3D宽方位角采集中心横向测线偏移距不规则情况下的鬼波压制。King等^[12]考虑起伏海表面对鬼波延迟时间的影响,最优估计鬼波延迟时间,可进一步优化鬼波压制的效果。在国内,唐进等^[13]分析了斜缆地震采集的宽频机理,并与传统拖缆采集进行了对比。许自强^[14]在频率-波数域实现了最优化联合反褶积对鬼波的压制,测试表明该算法能有效压制斜缆鬼波,拓宽地震资料的频带,提高剖面的分辨率。

本文基于水平拖缆拉东域鬼波压制方法,结合斜缆采集的特点,考虑出射角和偏移距对鬼波延迟时间的影响,准确估计鬼波的延迟时间,实现对鬼波的精确预测,利用最小二乘反演得到鬼波压制后的波场。最后,将该方法应用于模拟数据和实际斜缆数据,结果表明该方法能有效压制鬼波,拓宽地震资料的频带。

1 方法原理

对于水平缆采集,检波器接收到的波场 $d(x, t)$ 可看做海底反射的上行波场 $u(x_i, t)$ 与该上行波场经过海表面反射到达检波器的下行波场之和,得到关系式:

$$d(x, t) = u(x, t) + R \cdot u(x, t - \Delta\tau) \quad (1)$$

式中: R 为海表面反射系数; $\Delta\tau$ 为鬼波相对于一次波的延迟时。

结合频率域线性拉东反变换^[15],可将式(1)变形为:

$$D(x, \omega) = \sum_{m=1}^M V(p_m, \omega) \cdot (\exp(-j\omega p_m x) + R \cdot \exp(-j\omega(p_m x + \Delta\tau))) \quad (2)$$

式中: $V(p, \omega)$ 表示检波器处上行波场 $u(x, t)$ 频率域线性拉东变换的结果, $\Delta\tau = \frac{2z}{v_w \sqrt{1 - (v_w \cdot p)^2}}$; z 为检波器沉放深度; v_w 表示海水速度。通过最小二乘反演求解式(2)可得到检波器处的上行波场,即鬼波压制后的波场。

对于斜缆而言,由于检波器沉放深度随着偏移距的变化,鬼波的延迟时间也随之变化。因此,式(2)并不适用于斜缆鬼波的压制。

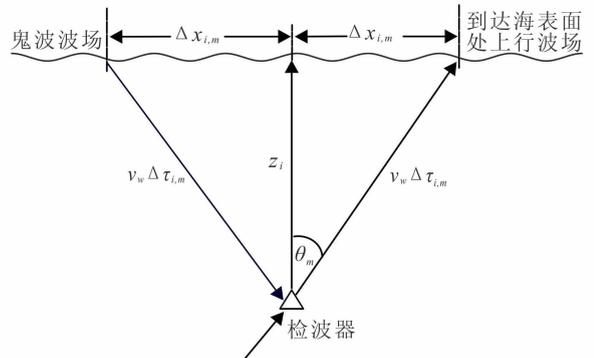


图1 拖缆处总波场和海表面上行波场的关系
Fig. 1 Relationship between total wavefield at the cable and up-going wavefield at the sea surface

如图1所示,斜缆第 i 道 z_i 处的检波器接收到总波场 $d(x_i, t)$,可以看做海表面 $x_i + \Delta x_{i,m}$ 处上行波场回传到检波器的波场与海水表面 $x_i - \Delta x_{i,m}$ 处上行波场经海表面反射到达检波器的下行波场之

和。通过对式(2)进行改进,得到斜缆鬼波压制在拉东域的表达式:

$$D(x_i, \omega) = \sum_{m=1}^M V_0(p_m, \omega) \cdot \exp(-j\omega(p_m(x_i + \Delta x_{i,m}) - \Delta\tau_{i,m})) + R \cdot \sum_{m=1}^M V_0(p_m, \omega) \cdot \exp(-j\omega(p_m(x_i - \Delta x_{i,m}) + \Delta\tau_{i,m})) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sin\theta_m = p_m \cdot v_w, & \Delta x_{i,m} = z_i \cdot \tan\theta_m \\ \Delta\tau_{i,m} = \frac{z_i}{\cos(\theta_m) \cdot v_w} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: $V_0(p, \omega)$ 表示海表面上行波场 $u_0(x, t)$ 频率域线性拉东变换的结果; v_w 为海水速度; x_i 表示第 i 道的偏移距; p_m 为射线参数或慢度; θ_m 表示出射角; $\Delta x_{i,m}$ 、 $\Delta\tau_{i,m}$ 在图1有所表示。

将式(3)表示为矩阵形式,得到线性拉东方程:

$$D = L \cdot V_0 \quad (5)$$

式中: $L = L_u + R \cdot L_d$, L_u 、 L_d 分别为一次波和鬼波的逆变换算子。采用最小二乘反演方法^[16]求解式(5)中海表面处上行波场 $V_0(p, \omega)$, 建立目标函数:

$$\text{Min}: I(V_0) = L \cdot V_0 - D^2 \quad (6)$$

由于共轭梯度法^[17]具有简便、存储量需求小和收敛速度快等特点,利用该方法求解目标函数:

- ① 给定初始计算向量 $V_0^{(0)}$;
- ② 计算 $r^{(0)} = D - L \cdot V_0^{(0)}$, 取 $g^{(0)} = r^{(0)}$;
- ③ for $k = 0$ to $n - 1$ do

$$\text{A. } \alpha_k = \frac{r^{(k)T} r^{(k)}}{g^{(k)T} L g^{(k)}};$$

$$V_0^{(k+1)} = V_0^{(k)} + \alpha_k g^{(k)}; r^{(k+1)} = D - L V_0^{(k+1)};$$

- B. 若 $r^{(k+1)} \leq \varepsilon$ 或 $k + 1 = n$, 则输出近似解

$V_0^{(k+1)}$, 停止; 否则, 转 C;

$$\text{C. } \beta_k = \frac{r^{(k+1)2}}{r^{(k)2}};$$

$$\text{D. } g^{(k+1)} = r^{(k+1)} + \beta_k g^{(k)};$$

end do

在得到海表面上行波场 V_0 后, 利用式(7)将对海表面的上行波场进行延拓, 得到拖缆处的上行波场 $U(x, \omega)$, 经傅里叶反变换可得拖缆处去鬼波后的炮集记录。

$$U = L_u \cdot V_0 \quad (7)$$

2 数据测试

2.1 数值算例

图2为两层水平层状模型, 第一层速度为1500 m/s, 第二层速度为2000 m/s。利用有限差分方法对二维波动方程进行正演模拟, 边界条件选取PML边界条件; 为了模拟海表面自由反射的情况, 在上边界处不加任何衰减边界条件。模拟时采用主频为50 Hz的雷克子波, 记录道数为100, 道间距为4 m, 采样间隔为0.5 ms, 记录长度为0.5 s, 单边放炮, 震源沉放深度为6 m, 拖缆沉放深度范围为6~50 m。

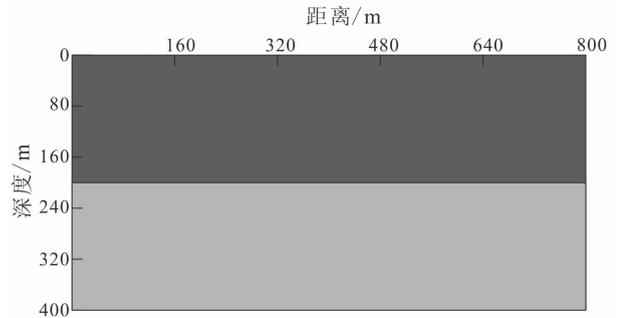


图2 水平层状速度模型

Fig. 2 Horizontally layered velocity model

模拟的斜缆单炮记录如图3a所示, 由于海水表面的反射, 可以明显看到一次波后面紧跟着与之相位相反的错误同相轴, 即鬼波。由于斜缆检波器沉放深度随着偏移距的增大而增大, 鬼波同相轴与一次波同相轴逐渐分开。可以看到, 鬼波的存在对一次波同相轴造成损害, 使得地震记录分辨率降低。

利用本文方法对模拟的单炮记录进行去鬼波处理, 图3b为鬼波压制后的上行波记录, 图3c为残差数据, 即压制的鬼波。对比鬼波压制前后的记录, 可以看到鬼波得到很好地压制。

对比鬼波压制前(图4a)、后(图4b)单炮记录的频谱图, 可以看到, 图4a中一些频率成分

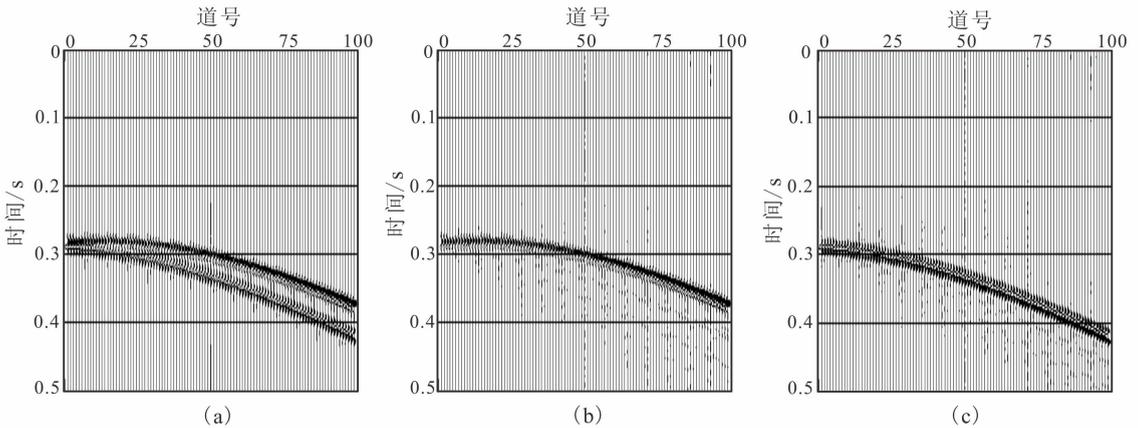


图3 模拟的单炮记录 (a)、鬼波压制后的单炮记录 (b) 及压制的鬼波记录 (c)

Fig. 3 Simulated shot records (a), shot records after deghosting (b) and deghosting records (c)

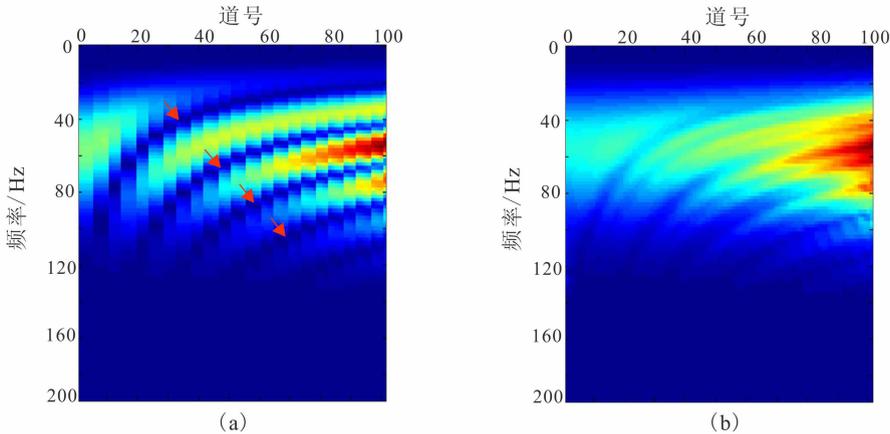


图4 模拟单炮记录的频谱 (a) 及去鬼波后单炮记录的频谱 (b)

Fig. 4 Spectrum of simulated shot records (a) and deghosted shot records (b)

能量缺失或者很弱 (红色箭头所指处), 这都是鬼波所引起的陷频现象。经过鬼波压制后, 陷波点能量得到了补偿, 频谱能量得到了恢复。取第 50 道数据进行分析 (图 5), 本文方法消除了陷波现象, 无论是低频能量还是高频能量都得了提升, 有效拓宽了频带。

2.2 实际斜缆采集数据测试

利用某海上区块的斜缆采集资料进一步测试该方法的有效性。实际资料的采集参数: 拖缆沉放深度范围为 5 ~ 50 m, 道间距 12.5 m, 采样总时间为 7.2 s, 采样间隔 2 ms, 震源沉放深度为 5 m。

经过直达波切除、滤波去噪和多次波压制等预处理, 图 6a 为实际斜缆采集的单炮记录 (选取 1.6 ~ 4.8 s, 1 ~ 480 道), 图 6b 为鬼波压制后的单炮记录, 图 6c 为压制的鬼波。图 7 为鬼波压制前

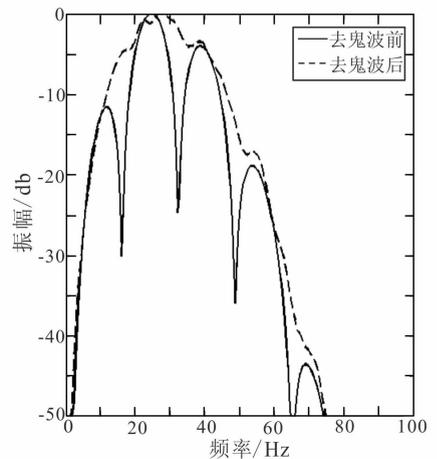


图5 鬼波压制前后振幅谱对比 (第 50 道记录)

Fig. 5 Contrast of amplitude spectrum of the 50th trace before and after deghosting

后的局部放大图（选取 2.4 ~ 3.6 s，150 ~ 300 道）。对比可以看到，鬼波同相轴得到去除，地震

剖面更加清晰，分辨率得到了提高。

图 8a、图 8b 分别为实际海上单炮记录和去鬼

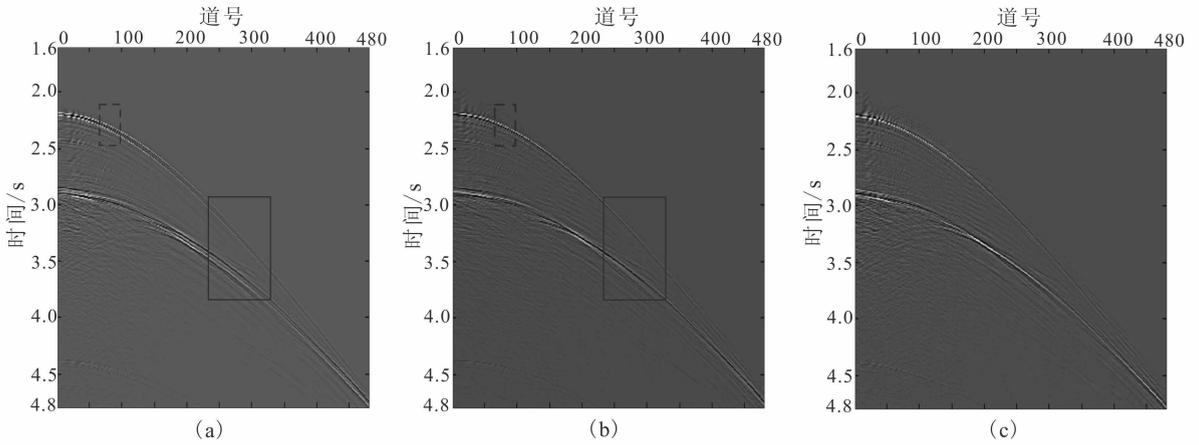


图 6 实际的单炮记录 (a)、鬼波压制后的单炮记录 (b) 及压制的鬼波记录 (c)

Fig. 6 Real shot record (a), shot records after deghosting (b) and deghosting records (c)

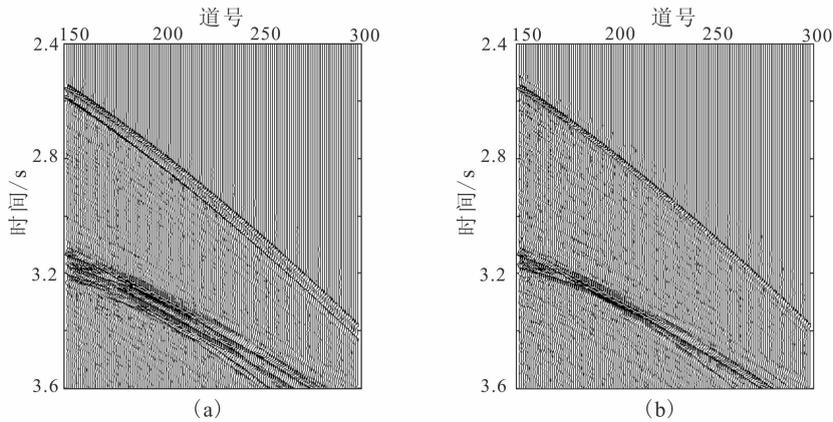


图 7 鬼波压制前 (a)、后 (b) 单炮记录的局部放大图

Fig. 7 Magnification of shot records before (a) and after (b) deghosting

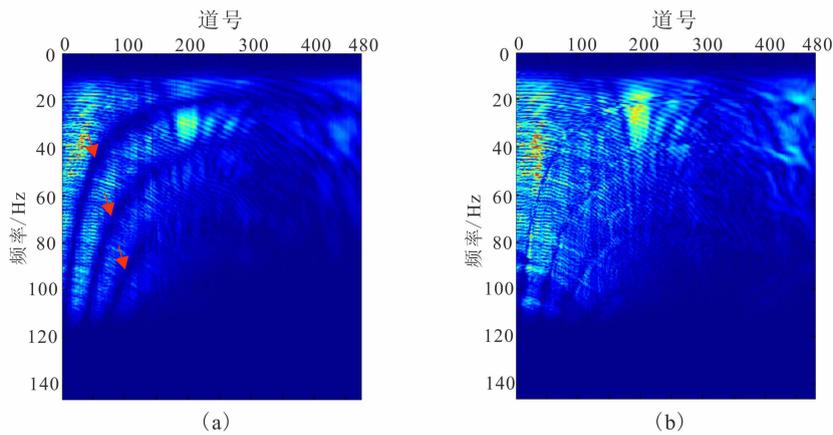


图 8 实际单炮记录的频谱 (a) 及去鬼波后单炮记录的频谱 (b)

Fig. 8 Spectrum of real shot records (a) and deghosted shot records (b)

波后的单炮记录的频谱图。可以看到,本文方法通过压制鬼波,有效消除鬼波所引起的陷频特征(图8a箭头所指处)。

选取鬼波压制前后单炮记录中区域1(图6中

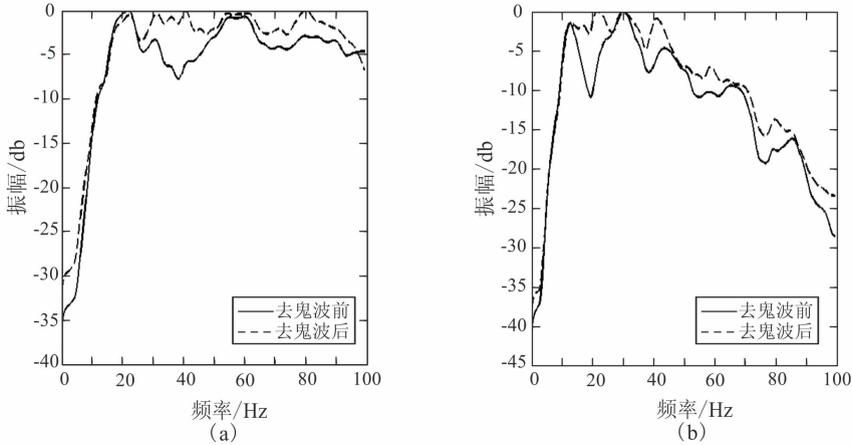


图9 鬼波压制前(实线)、后(虚线)单炮记录中(a)区域1和(b)区域2的振幅谱分析

Fig. 9 Amplitude spectrum of shot records before (solid line) and after deghosting (dotted line) at location 1 (a) and location 2 (b)

3 结论

(1) 拉东域基于最小二乘反演鬼波压制方法能有效地压制斜缆数据中的鬼波,消除了鬼波所引起的陷频特征,拓宽了地震剖面的频带,提高了地震资料的分辨率。

(2) 拉东域基于最小二乘反演鬼波压制方法考虑出射角和偏移距对鬼波延迟时间的影响,精确估计鬼波最优延迟时间,无需对最优鬼波延迟时间进行反演估计,提高了计算效率。

参考文献:

- [1] Kragh E, Muzyert E, Curtis T, et al. Efficient broadband marine acquisition and processing for improved resolution and deep imaging [J]. *The Leading Edge*, 2010, 29 (4): 464-469.
- [2] 吴志强. 海洋宽频带地震勘探技术新进展 [J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49 (3): 421-430.
WU Zhi-qiang. New advances in marine broadband seismic exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49 (3): 421-430.
- [3] 孙海龙, 王德利, 陈鑫, 等. 基于波场延拓的多次波压制技术及其改进 [J]. *世质地质*, 2015, 34 (1):

黑色虚线方框处)和区域2(图6中黑色方框处),进行振幅谱分析对比(图9)。可以看到,经过鬼波的压制,地震剖面的低频和低频能量都得到了提高,频带得到了拓宽。

226-231.

- SUN Hai-long, WANG De-li, CHEN Xin, et al. Method of wave filed extrapolation and its improvement to remove multiples [J]. *Global Geology*, 2015, 34 (1): 226-231.
- [4] 梁全有, 韩立国, 巩向博. 各向异性 Radon 变换在深水地震多次波压制中的应用 [J]. *世界地质*, 2014, 33 (2): 484-487.
LIANG Quan-you, HAN Li-guo, GONG Xiang-bo. Application of anisotropic Radon transform in deep sea seismic multiple wave attenuation [J]. *Global Geology*, 2014, 33 (2): 484-487.
- [5] 赫建伟, 顾汉明, 吴耀乐, 等. 波场延拓最小二乘法去虚反射技术在上下缆采集数据处理中的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2015, 50 (3): 424-430.
HE Jian-wei, GU Han-ming, WU Yao-le, et al. Ghost elimination with extrapolation least square for seismic data acquired by over/under towed-streamers [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2015, 50 (3): 424-430.
- [6] Masoomzadeh H, Woodburn N. Broadband processing of conventional streamer data-optimized de-ghosting in the Tau-P domain [C]. *EAGE Extended Abstracts*, 2013.
- [7] Soubaras R, Lafet Y. Variable-depth streamer acquisition: broadband data for imaging and inversion [J]. *Geophysics*, 2013, 78 (2): 27-39.

- [8] Poole G. Premigration receiver deghosting and redatuming for variable depth streamer data [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013: 4216-4220.
- [9] Wang P, Peng C. Premigration deghosting for marine towed streamer data using a bootstrap approach [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012: 1-5.
- [10] Wang P, Ray S, Peng C, et al. Premigration deghosting for marine streamer data using a bootstrap approach in tau-p domain [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 4221-4225.
- [11] Masoomzadeh H, Hardwick A, Baldock S, et al. Redatuming and deghosting of variable-depth streamer data [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2015: 4520-4524.
- [12] King S, Poole G. Hydrophone-only receiver deghosting using a variable sea surface datum [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2015: 4610-4614.
- [13] 唐进, 杨凯, 顾汉明, 等. 海上变深度缆地震采集宽频机理分析 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30 (5): 2386-2392.
TANG Jin, YANG Kai, GU Han-ming, et al. The broadband mechanism analysis for marine variable-depth streamer acquisition [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (5): 2386-2392.
- [14] 许自强, 方中于, 顾汉明, 等. 海上变深度缆数据最优化压制鬼波方法及其应用 [J]. 石油物探, 2015, 54 (4): 404-413.
XU Zi-qiang, FANG Zhong-yu, GU Han-ming, et al. The application of optimal deghosting algorithm on marine variable-depth streamer data [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54 (4): 404-413.
- [15] 朱恒, 王德利. 抛物 Radon 域地震干涉技术. 世界地质, 2015, 34 (2): 484-490.
ZHU Heng, WANG De-li. Seismic interferometry in parabolic Radon domain [J]. Global Geology, 2015, 34 (2): 484-490.
- [16] 黄建平, 薛志广, 步长城, 等. 基于裂步 DSR 的最小二乘偏移方法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44 (1): 369-374.
HUANG Jian-ping, XUE Zhi-guang, BU Chang-cheng, et al. The study of least-squares migration method based on split-step DSR [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44 (1): 369-374.
- [17] 杨海斌, 梁潇, 常凯, 等. 频域航空电磁法地形影响及校正研究 [J]. 世界地质, 2013, 32 (2): 379-383.
YANG Hai-bin, LIANG Xiao, CHANG Kai, et al. Topography effects on HEM response and the correction method in frequency domain [J]. Global Geology, 2013, 32 (2): 379-383.