

文章编号: 1004—5589 (2016) 04—1101—08

基于峰值因子最大化的鬼波压制方法

叶林, 韩立国, 李洪建, 张威, 李宇, 于晨霞

吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要: 针对传统拖缆采集得到的海上地震资料受鬼波影响而导致频带宽度变窄, 笔者提出一种去鬼波方法, 可以压制鬼波效应, 拓宽频带。首先在频率-空间域推导出镜像数据生成公式, 并基于峰值因子最大化的参数搜索方法来估计最优的鬼波延迟时间, 将最优的鬼波延迟时代入镜像记录生成公式, 获得最优的镜像记录, 利用联合反褶积算法得到最优的去鬼波结果。将本文中的方法应用于模拟的变深度采集数据和海上实测的变深度采集数据, 证实该方法可以有效地压制鬼波, 消除频谱中的陷波点, 得到宽频数据。

关键词: 变深度采集; 峰值因子; 联合反褶积算法; 陷波点

中图分类号: P631.443 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.04.021

Deghosting method based on maximization of peak factor

YE Lin, HAN Li-Guo, LI Hong-jian, ZHANG Wei, LI Yu, YU Chen-xia

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Aiming at the frequency bandwidth of the marine seismic data acquired by conventional streamer acquisition narrowing down, which is affected by ghost, this paper put forward a deghosting method which can suppress the ghost and widen the frequency band. Firstly, the formula to produce mirror records was derived in frequency-space domain and the authors estimated the best delay time of ghost by using parameter search method based on maximization of peak factor. Then the optimal delay time was taken into the formula to produce formula and obtain optimal mirror data. Ultimately, the optimal deghosted output can be calculated by using joint deconvolution algorithm. Applying the method to simulative variable depth data and marine variable-depth streamer data, it was showed that this deghosting method could suppress the ghost, reduce the spectral notches and acquire wider-band data.

Key words: variable-depth streamer acquisition; peak factor; joint deconvolution algorithm; notch

0 引言

海上地震勘探过程中, 地震记录的频带受到虚反射影响而存在陷波点, 从而导致频带宽度变窄, 地震剖面的分辨率降低。为了得到宽频地震数据, 笔者结合实际生产的需要, 研究了国内外有关拓宽

地震资料频带的方法, 其中包括上下缆采集技术^[1-3], 双检采集技术^[4,5]以及立体震源采集技术^[6]等。

作为一种常见的宽频采集技术, 变深度拖缆采集利用频带中陷波点的多样性来获得充足的低频信息, 变深度采集以及相关的去鬼波方法是近几年研

收稿日期: 2016-05-30; 改回日期: 2016-06-07

基金项目: 国家高新技术发展规划(863计划)重大项目课题(2014AA06A605)。

通讯作者: 韩立国(1961-), 男, 教授, 主要从事复杂地震波场、正反演与成像、地震属性与地球物理信号分析研究。

E-mail: hanliguo@jlu.edu.cn

研究的热点。Robert^[7]等人提出了变深度采集(斜缆采集)技术^[8,9],即拖缆的深度随着偏移距的增加而变化。浅部检波器接收高频信息以保证震源子波频谱宽度,深部检波器接收低频信息以丰富低频信息。由于不同深度的检波器所对应的陷波点不同,所以最终频谱结果陷波点得到补偿。Soubaras提出了利用联合反褶积方法压制虚反射的思想,并在墨西哥等地有效地拓宽了实测数据的频带。

本文中,笔者联系海上地震勘探的生产实际,在前人关于去噪^[10]和去多次波^[11-14]等研究的基础上推导出变深度拖缆镜像记录的生成算法,并在联合反褶积去鬼波算法中运用峰值因子来搜寻最优化的鬼波延迟时间,从而压制鬼波效应。通过将本文提出的方法应用于模拟数据和实测数据,可以发现去鬼波效果较好。

1 方法原理

令沉放在某一深度 z_i 处的拖缆所接收到的总波场为 $p(x, z_i, t)$, 上行波场为 $u(x, z_i, t)$, 下行波场为 $d(x, z_i, t)$ 。显然,深度 z_i 处的拖缆所接收到的总波场为上行波场和下行波场之和:

$$p(x, z_i, t) = u(x, z_i, t) + d(x, z_i, t) \quad (1)$$

对公式(1)进行关于时间变量 t 的一维傅立叶变换得:

$$P(x, z_i, \omega) = U(x, z_i, \omega) + D(x, z_i, \omega) \quad (2)$$

如图1所示为波场传播示意图,沉放深度为 z_1 的实际拖缆所接收到的总波场、上行波场和下行波

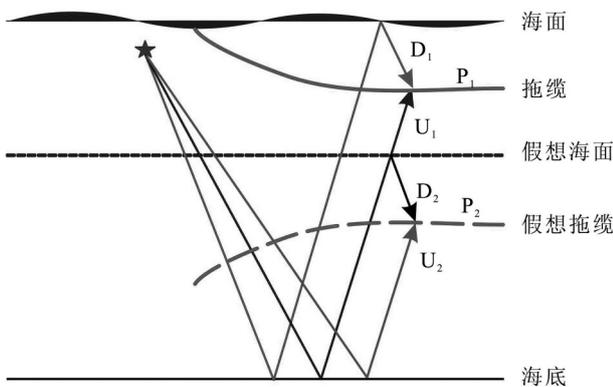


图1 波场传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wave field propagation

场分别为 $p(x, z_1, t)$ 、 $u(x, z_1, t)$ 、 $d(x, z_1, t)$, 关于假想海平面对称的沉放深度为 z_2 的镜像拖缆所接收到的总波场、上行波场和下行波场分别为 $p(x, z_2, t)$ 、 $u(x, z_2, t)$ 、 $d(x, z_2, t)$ 。以上6个分量所对应的一维傅立叶变换分别是 $P(x, z_1, \omega)$ 、 $U(x, z_1, \omega)$ 、 $D(x, z_1, \omega)$ 、 $P(x, z_2, \omega)$ 、 $U(x, z_2, \omega)$ 、 $D(x, z_2, \omega)$, 在图1中分别对应 P_1 、 U_1 、 D_1 、 P_2 、 U_2 、 D_2 。当公式(2)中的 $i=1$ 时,得到原始记录的频率-空间域表达式:

$$P(x, z_1, \omega) = U(x, z_1, \omega) + D(x, z_1, \omega) \quad (3)$$

当公式(2)中的 $i=2$ 时,得到镜像记录的频率-空间域表达式:

$$P(x, z_2, \omega) = U(x, z_2, \omega) + D(x, z_2, \omega) \quad (4)$$

同时,要求镜像记录的下行波场与原始记录的上行波场相等,即:

$$D(x, z_2, \omega) = U(x, z_1, \omega) \quad (5)$$

由于下行波场是由上行波场经过海水表面反射得到的,已知海水表面反射系数为 -1 ,故下行波场可由上行波场与波场延拓算子表示:

$$\begin{cases} D(x, z_1, \omega) = -U(x, z_1, \omega) \cdot e^{-j^*k \cdot (z_2 - z_1)} \\ D(x, z_2, \omega) = -U(x, z_2, \omega) \cdot e^{-j^*k \cdot (z_2 - z_1)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, k 为波数: $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\omega}{c}$, c 为地震波在海水中的传播速度。将公式(5)代入公式(6)的第二个式子中得:

$$U(x, z_2, \omega) = -U(x, z_1, \omega) \cdot e^{j^*k \cdot (z_2 - z_1)} \quad (7)$$

将公式(5)、(6)、(7)式代入公式(3)、(4)式中,可得:

$$P(x, z_1, \omega) = U(x, z_1, \omega) \cdot [1 - e^{-j^*k \cdot (z_2 - z_1)}] \quad (8)$$

$$P(x, z_2, \omega) = U(x, z_1, \omega) \cdot [1 - e^{j^*k \cdot (z_2 - z_1)}] \quad (9)$$

在频率-空间域中原始地震记录和镜像记录都可以用沉放深度为 z_1 处的拖缆所接受到的上行波场 $U(x, z_1, \omega)$ 来表示。联立公式(8)、(9)可得

镜像数据计算公式,即在原始记录的基础上施加一个算子:

$$P(x, z_2, \omega) = P(x, z_1, \omega) \cdot [-e^{j^k(z_2-z_1)}] \quad (10)$$

令 $J(x, \omega)$ 为镜像算子,则镜像算子的表达式为:

$$J(x, \omega) = -e^{j^k(z_2-z_1)} \quad (11)$$

原始地震记录和镜像记录又可以用 z_1 处的上行波场 $U(x, z_1, \omega)$ 和鬼波算子 $G(x, \omega)$ 表示:

$$\begin{cases} P_1(x, z_1, \omega) = U(x, z_1, \omega) \cdot G_1(x, \omega) \\ P_2(x, z_2, \omega) = U(x, z_1, \omega) \cdot G_2(x, \omega) \end{cases} \quad (12)$$

公式(12)中:

$$\begin{cases} G_1(x, \omega) = 1 - e^{-jk(z_2-z_1)} = 1 - e^{-j\omega \cdot \Delta t} \\ G_2(x, \omega) = 1 - e^{jk(z_2-z_1)} = 1 - e^{j\omega \cdot \Delta t} \end{cases} \quad (13)$$

其中 Δt 是上行波与下行波之间的时间延迟。频率-空间域下的镜像记录又可以表示为:

$$P(x, z_2, \omega) = P(x, z_1, \omega) \cdot (-e^{j\omega \cdot \Delta t}) \quad (14)$$

上述问题的最小平方解是:

$$U(x, \omega) = \frac{[G_1(x, \omega)]^* \cdot P_1(x, \omega) + [G_2(x, \omega)]^* \cdot P_2(x, \omega)}{[G_1(x, \omega)]^2 + [G_2(x, \omega)]^2} \quad (15)$$

其中括号上方的*代表复共轭。理论上,镜像缆地震记录中先接收到鬼波,然后再接收到一次波,其中一次波的时间与原始缆接收一次波的时间是一致的,从而通过公式(15)可以计算得出去鬼波记录。但在实际勘探过程中,影响鬼波的延迟时间的因素有检波器深度、出射角、偏移距和介质速度等。所以如果仅仅考虑检波器深度对鬼波延迟时间的影响,这样会导致生成的镜像记录不准确,进而导致基于以上公式的联合反褶积算法压制鬼波的效果不佳。

笔者在前人研究的基础上提出一种基于峰值因子来搜寻最优化鬼波延迟时间的方法,旨在搜寻最佳的鬼波延迟时间,从而利用联合反褶积公式算得

最优化的去鬼波记录。首先,粗略地估计每一道鬼波延迟时间的搜索范围,由于鬼波延迟时间与震源和检波器在海水中的沉放深度有关,所以设定第 i 道鬼波延迟时间 Δt_i 搜索范围为:

$$\Delta t_i \in (0.5 \frac{2z_i}{v}, 1.2 \frac{2z_i}{v}) \quad (16)$$

公式(16)中 z_i 为检波器的深度; v 为子波在海里传播的速度。然后将该范围内的每一个延迟时间代入公式(14)中得出最优的镜像记录,再代入公式(15)中求出去鬼波后的上行波场,将得到的上行波场 $U(x, z_1, \omega)$ 进行傅里叶反变换得到 $u(x, z_1, t)$,再分析去鬼波信号 $u(x, z_1, t)$ 的峰值因子,定义峰值因子 C 的计算公式如下:

$$C = \frac{\max[u(x, z_i, t)] - \min[u(x, z_i, t)]}{rms[u(x, z_i, t)]} \quad (17)$$

公式(17)中: rms 表示均方根计算。最后将峰值因子最大值所对应的去鬼波结果作为最终的处理结果,也就是说该去鬼波结果对应最优化的鬼波延迟时间。因此可将上述问题看成是最优化问题,建立以下目标函数:

$$I = \max(C) \quad (18)$$

通过设定确定的步长,在可行域中搜寻最优解。

2 数值模拟

2.1 峰值因子对去鬼波结果的影响

为验证用峰值因子作为衡量标准的去鬼波方法的有效性,笔者模拟了一次波和鬼波数据,鬼波的延迟时间为 25 ms,如图 2 中的第一道所示。设置鬼波延迟时间的搜索范围: $\Delta t \in (12.5 \text{ ms}, 30 \text{ ms})$,每一次搜索都利用公式(14)得到一个频率-空间域的镜像记录,再利用公式(15)得到一个去鬼波结果,总计搜索 50 次,对应的去鬼波结果见图 2 中第 2~51 道。通过公式(17)计算每一次去鬼波结果的峰值因子,画出峰值因子随鬼波延迟时间变化的曲线(图 3)。明显看到峰值因子最大值对应的鬼波延迟时间是 25 ms,对应的最优去鬼波结果是图 2 中第 37 道,该道鬼波得到较好压制,去鬼波结果中只剩一次波。所以,峰值因子的

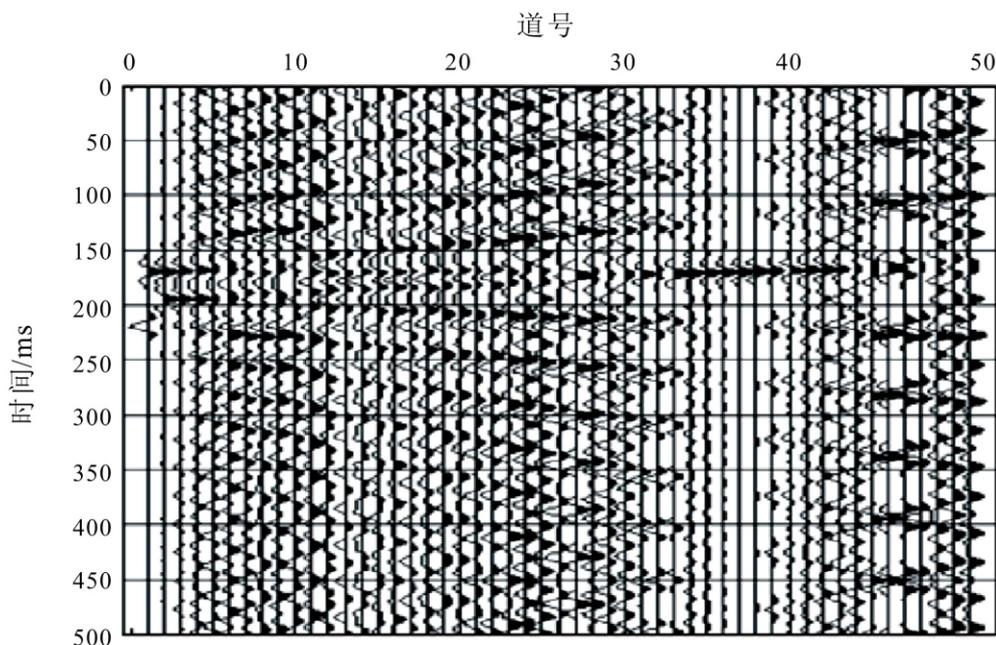


图2 鬼波延迟时间对去鬼波结果的影响

Fig. 2 Influence of delay time on deghosted results

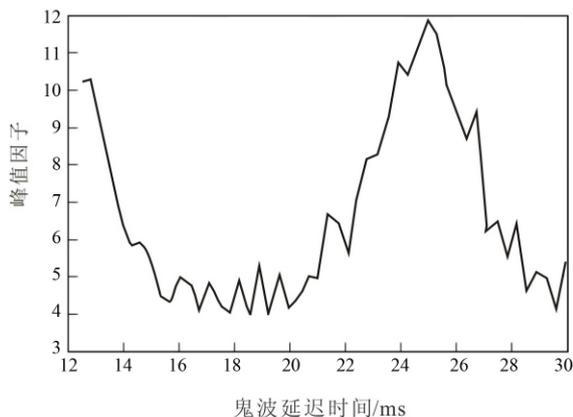


图3 峰值因子随鬼波延迟时间的变化曲线

Fig. 3 Curve of peak factors with delay time

大小是一个衡量去鬼波结果好坏的有效标准，通过这种方法可以有效地压制鬼波。

2.2 变深度采集模拟数据试算

为检验最优化联合反褶积去鬼波算法压制鬼波的效果，对一个层状模型的变深度拖缆单炮记录进行测试。正演模拟时，采用主频为 50 Hz 的雷克子波，记录道数为 150，道间距为 4 m，采样间隔为 0.5 ms，记录时间长度为 1.4 s，单边放炮，拖缆深度为 6 ~ 50 m。

图 4 为理想无鬼波状态下的地震记录和频谱，去鬼波效果以图 4 作为参考。原始单炮记录切除直达波后如图 5a 所示，可以明显看到 0.42 s 处有一海底界面反射的一次波，在一次波同相轴后面紧跟着经海表面反射的鬼波同相轴。随着偏移距的增大，鬼波和一次波逐渐分开。通过本文方法对每道的最优鬼波延迟时间进行估计，利用估计的最优延迟时间去鬼波，得到去鬼波后的单炮记录如图 5b 所示。可以看到紧随一次波后的鬼波同相轴得到压制，反射波同相轴变得更加清晰，与图 4a 无鬼波地震记录基本一致。但去鬼波后的单炮记录中引入了一些串扰噪声，这是因为模拟的鬼波和一次波振幅之间相差系数并不等于 -1，而在计算过程中只考虑了鬼波延迟时间对去鬼波结果的影响，忽略了鬼波和一次波之间的振幅差异对去鬼波结果的影响，导致噪音的引入。

从原始单炮的频谱图（图 6a 红色箭头所指处）可以看到一些频率成分缺失或者很弱，存在明显的陷频特征，这都是鬼波引起的。而且随着炮检距的增大，第一个陷波点频率在逐渐减小。图 6b 为去鬼波后单炮记录的频谱，与去鬼波前单炮频谱（图 6a）对比可以发现，由鬼波所引起的陷

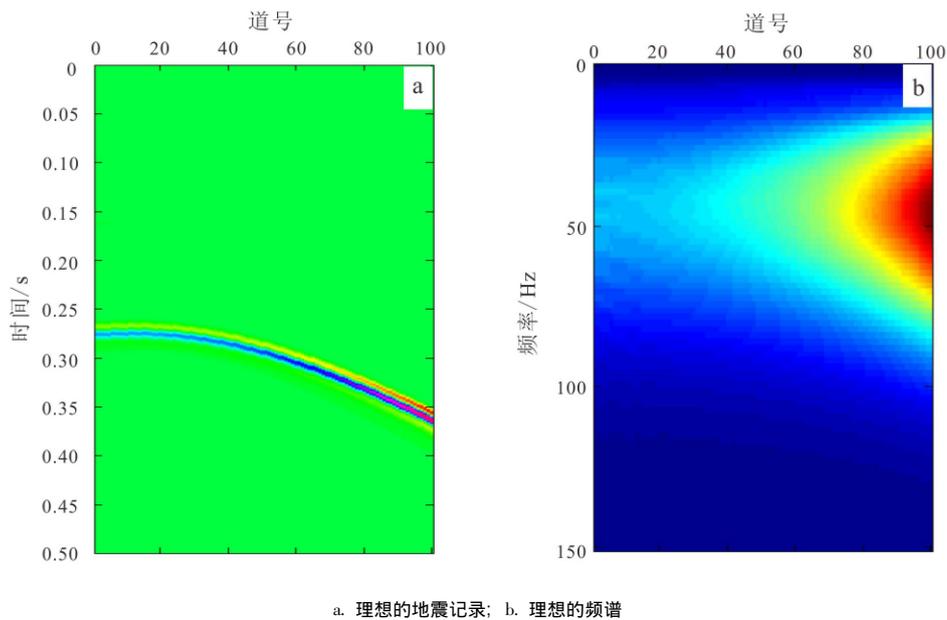


图 4 理想的地震记录和理想的频谱
Fig. 4 Ideal seismic record and spectrum

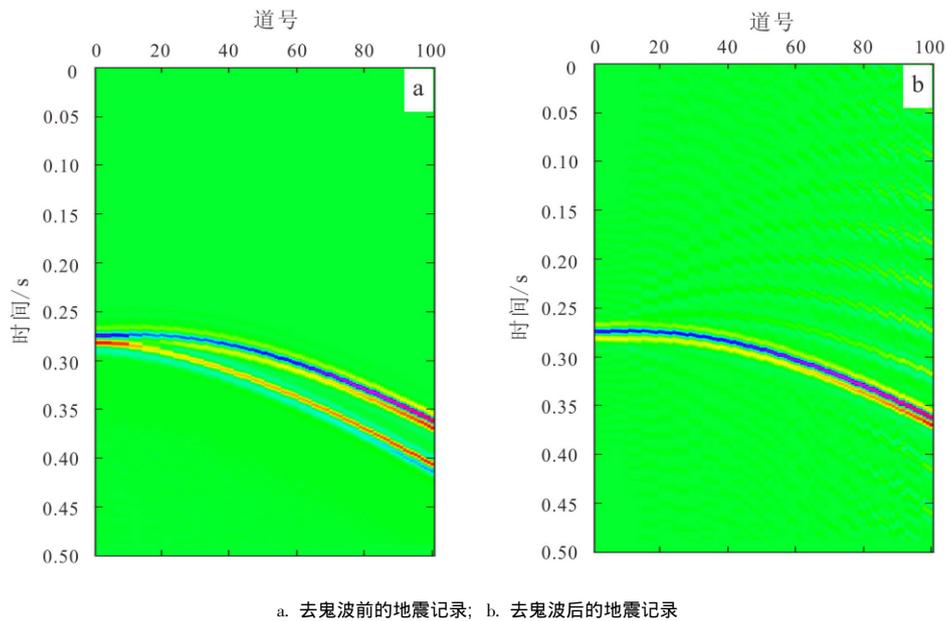


图 5 模拟数据去鬼波前后地震记录对比
Fig. 5 Comparison of simulated data and deghosted output

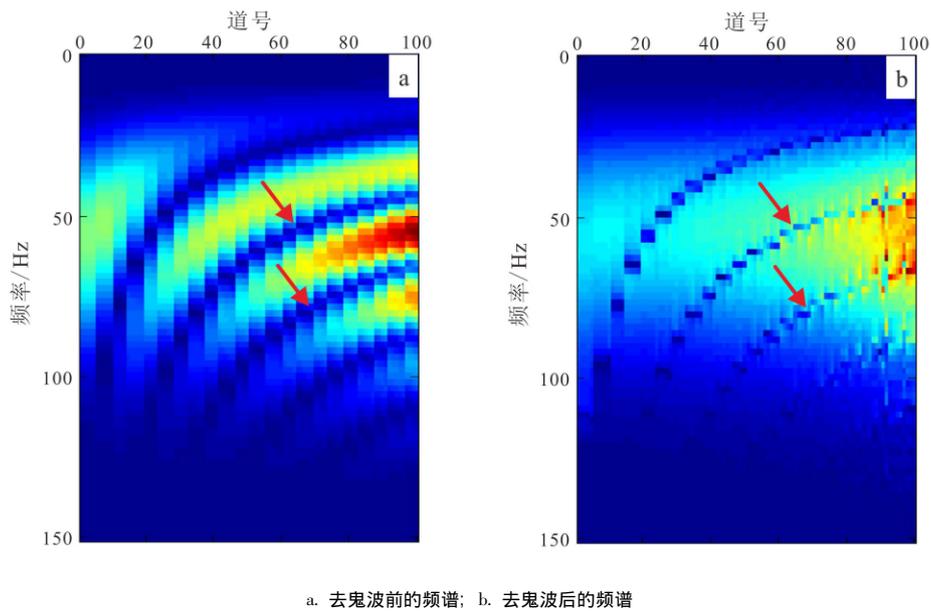
波点在鬼波去除后得到了消除,和图 4b 相比,频谱的能量得到了补偿。可见本文的去鬼波方法有效地压制了鬼波,并且拓宽了单炮记录频谱的频带。

2.3 实测变深度采集数据试算

为进一步验证该方法的适用性,选取某海上区

块的变深度采集资料进行算法测试。采样间隔为 2 ms,道间距为 12.5 m,拖缆沉放深度为 5 ~ 50 m,采样总时间为 7.2 s,震源沉放深度为 5 m。

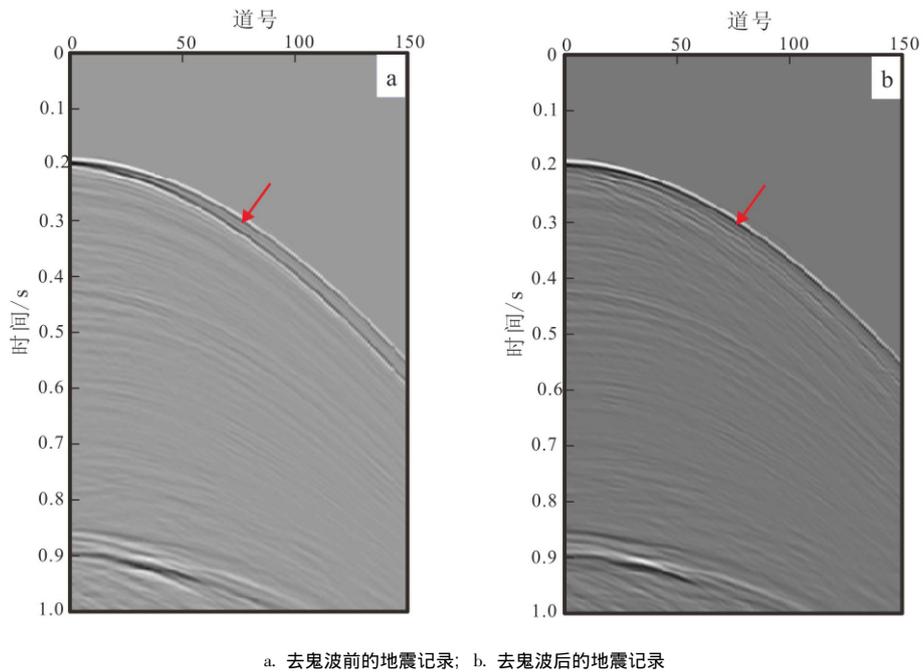
海上实际单炮记录进行预处理后(包括滤波去噪、多次波压制等步骤)如图 7a 所示,可以明显看



a. 去鬼波前的频谱; b. 去鬼波后的频谱

图6 图5 (a) 和图5 (b) 的频谱对比

Fig. 6 Comparison of wavefield spectrum of figure 5 (a) and 5 (b)



a. 去鬼波前的地震记录; b. 去鬼波后的地震记录

图7 实测数据去鬼波前后地震记录对比

Fig. 7 Seismic record comparison of measured data before and after deghosting

到，一次波同相轴后面紧跟着与之相位相反的鬼波同相轴。利用本文所提出的方法对原始炮记录进行去鬼波处理，得到去鬼波后的单炮记录如图7b所示。对比图中箭头所指区域可以发现，紧随一次波

后的鬼波被明显地压制，而且整个炮集记录变得更加清晰，地震资料质量得到明显的提高。

如图8所示，对压制鬼波前后单炮记录的频谱进行对比分析发现该方法通过压制鬼波基本消除了

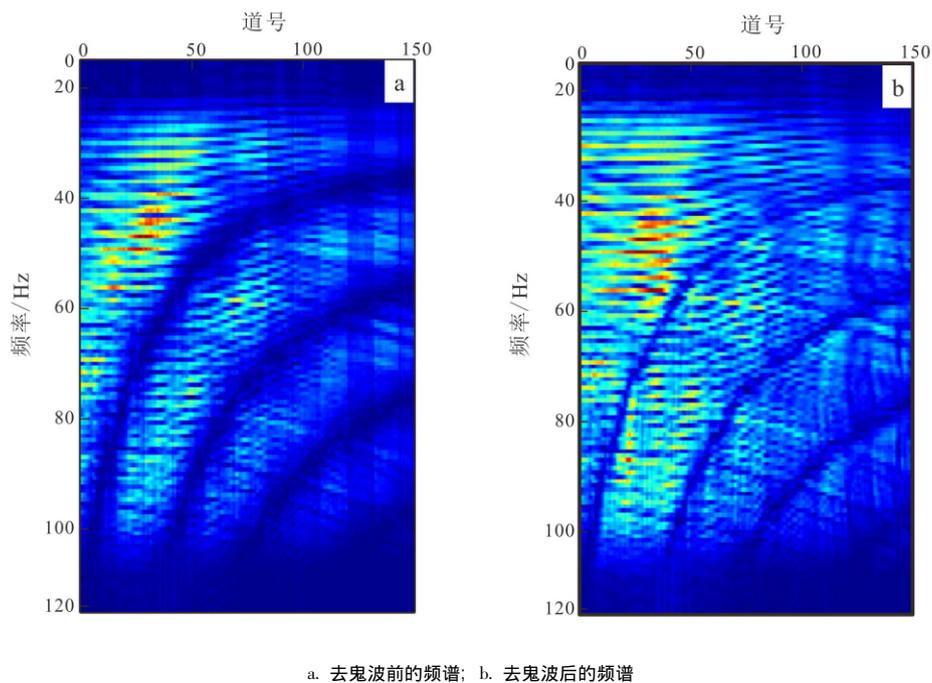


图8 实测数据去鬼波前后频谱图对比

Fig. 8 Spectrum comparison of measured data before and after deghosting

频谱中鬼波引起的陷频特征, 而且使整个频谱的低频能量明显增强, 同时高频成分也得到了拓宽。

3 结论

(1) 本文提出了一种应用于海上变深度拖缆数据的基于峰值因子搜索最优化鬼波延迟时的去鬼波方法。该方法优化了传统的联合反褶积去鬼波算法。

(2) 通过定义峰值因子搜寻最优的鬼波延迟时间, 可以通过原始的炮记录计算得出最优的镜像记录, 利用联合反褶积公式可以计算得出最优化的去鬼波结果。

(3) 通过将该方法应用于模拟数据和海上实测数据, 证实了该方法能够有效地压制海上变深度拖缆数据中由海水表面引起的虚反射, 从而消除了频谱中的陷波点, 达到拓宽频带的目的。

参考文献:

[1] 赫建伟, 侯志平, 万欢, 等. 海上上下缆地震采集资料特点分析 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10 (4): 431-436.

HE Jian-wei, HOU Zhi-ping, WAN Huan, et al. The analysis of seismic data characteristics by over/under

towed-streamer acquisition [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10 (4): 432-436.

[2] 刘春成, 刘志斌, 顾汉明. 利用上/下缆合并算子确定海上上/下缆采集的最优沉放深度组合 [J]. 石油物探, 2013, 52 (6): 623-629.

LIU Chun-cheng, LIU Zhi-bin, GU Han-ming. The determination of optimal sinking depths of over/under streamers in offshore survey by merge operator [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52 (6): 623-629.

[3] 赵仁永, 张振波, 轩义华. 上下源、上下缆地震采集技术在珠江口的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46 (4): 517-521.

ZHAO Ren-yong, ZHANG Zhen-bo, XUAN Yi-hua. Application of over/under streamer and over/under source seismic acquisition in the Pearl River Mouth Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46 (4): 517-521.

[4] 王振华, 夏庆龙, 田立新, 等. 消除海底电缆双检地震资料中的鸣震干扰 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43 (6): 626-635.

WANG Zhen-hua, XIA Qing-long, TIAN Li-xin, et al. Elimination of singing interference in OBC dual-geophone seismic data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43 (6): 626-635.

[5] 张振波, 轩义华, 刘宾, 等. 双检与上下缆地震数据

- 联合成像 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49 (5): 884-891.
ZHANG Zhen-bo, XUAN Yi-hua, LIU Bin, et al. Joint imaging of dual-sensor and over-under streamer data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49 (5): 884-891.
- [6] 徐淑合, 于静, 胡立新, 等. 多级延迟爆炸震源的研究与应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38 (4): 341-349.
XU Shu-he, YU Jing, HU Li-xin, et al. Study and application of multi-level-delayed explosive source [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38 (4): 341-349.
- [7] Soubaras R, Dowle R. Variable-depth streamer: a broadband marine solution [J]. Marine Seismic, 2010, 28 (12): 85-96.
- [8] 张振波, 李东方. 斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49 (3): 451-456.
ZHANG Zhen-bo, LI Dong-fang. Variable-depth steamer seismic acquisition and processing in Pearl River Mouth Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49 (3): 451-456.
- [9] 张振波, 李东方, 轩义华, 等. 白云凹陷深水复杂构造区斜缆地震资料处理关键技术及应用 [J]. 石油物探, 2014, 53 (6): 657-664.
ZHANG Zhen-bo, LI Dong-fang, XUAN Yi-hua, et al. Variable-depth streamer seismic data processing in deepwater complex structure area of Baiyun Sag [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53 (6): 657-664.
- [10] 李阳, 吕庆田, 韩立国, 等. 串联去噪技术在金属矿地震勘探中的应用 [J]. 世界地质, 2012, 31 (2): 406-411.
LI Yang, LÜ Qing-tian, HAN Li-guo, et al. Application of serial denoise method in seismic exploration of metal mine [J]. Global Geology, 2012, 31 (2): 406-411.
- [11] 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, 57 (9): 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, 57 (9): 484-487.
- [12] 王通, 王德利, 冯飞, 等. 三维自由表面多次波去除方法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44 (6): 2034-2041.
WANG Tong, WANG De-li, FENG Fei, et al. 3D surface-related multiple elimination [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44 (6): 2034-2041.
- [13] 贾连凯, 吴时国, 董冬冬, 等. 南海南部深水多次波模拟分析与压制处理 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45 (2): 611-629.
JIA Lian-kai, WU Shi-guo, DONG Dong-dong, et al. Seismic multiple model analysis and processing skills in the deepwater area of southern South China Sea [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45 (2): 611-629.
- [14] 张振波, 轩义华, 刘宾. 基于各向异性理论的深水区地震资料叠前处理技术 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44 (3): 1031-1038.
ZHANG Zhen-bo, XUAN Yi-hua, LIU Bin. The pre-stack seismic data processing technology series based on anisotropic theory and its application in South China Sea deepwater Baiyun 6-1 structure [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44 (3): 1031-1038.