doi: 10.11720/wtyht.2019.1045
李慧龙,王征,宋鑫,等.深拖平缆采集资料中鬼波衰减方法探讨[J].物探与化探,2019,43(1):176-182.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1045
Li H L,Wang Z,Song X,et al.The application of broadband processing technology to deep towing flat streamer data[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(1):176-182.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1045

深拖平缆采集资料中鬼波衰减方法探讨

李慧龙,王征,宋鑫,吴超,马德志,石孟常,赵亮
(中海油田服务股份有限公司 物探事业部,天津 300451)

摘 要:鬼波衰减是深拖平缆采集资料处理中非常重要的一步,也是实现宽频处理的关键步骤。为此,笔者分析了深拖平缆资料特点,推导了鬼波的时距曲线方程,在此基础上,介绍了线性Radon域最小平方反演方法衰减鬼波的基本原理,该方法首先通过最小平方方法求得无鬼波的Radon域数据,再应用反变换算子中的一次波算子进行反变换,从而实现了对鬼波的压制。采用该理论对模型数据与实际地震资料进行了试处理,结果表明,深拖平缆资料通过本文的鬼波衰减技术处理后,陷频点得到了补偿,有效频带得到了拓宽,达到了宽频处理的效果。

关键词:宽频;深拖平缆;鬼波衰减;时距曲线方程;Radon域;最小平方
中图分类号:P631.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8918(2019)01-0176-07

0 引言

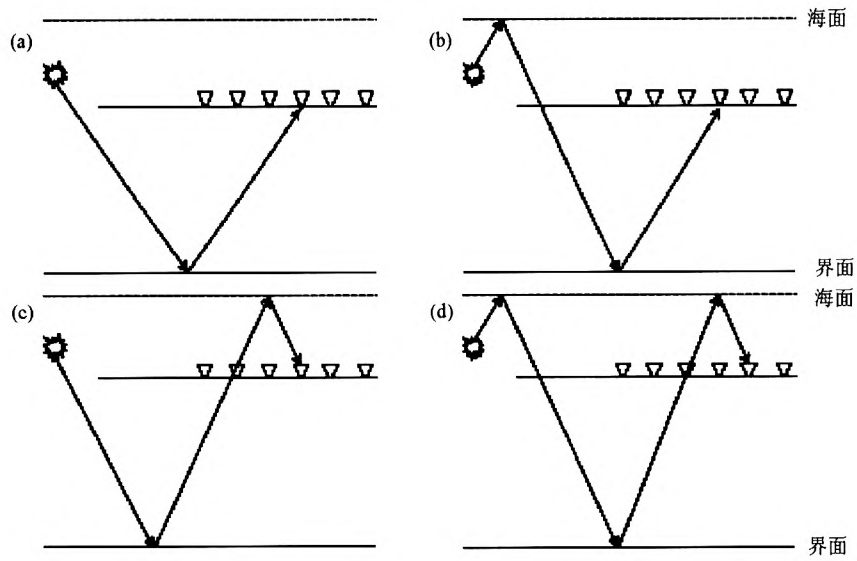
目前海上地震宽频采集的主要方法包括双检电缆采集技术、上下双缆采集技术、四分量拖缆采集技术、变深度缆采集技术、深拖平缆采集技术和同步多级震源采集技术等,其中同步多级震源采集技术是主要用来消除震源鬼波,其他技术主要是消除电缆鬼波[1]。变深度缆采集技术是目前应用最为广泛的宽频采集技术,根据不同的勘探需求,分为不同的沉放方式,主要包括直斜缆、"抛物线型"斜缆、阶梯缆和"犁式"斜缆[2]。近年来,由于对平缆采集的地震资料处理思路的改变,国内一些专家提出深拖平缆宽频采集技术,电缆深度一般在15~25 m之间,呈水平状,相比于其他宽频采集方法,该方法的电缆操控更加容易灵活,野外作业更方便,成本更低。同时,与常规拖缆相比,鬼波与有效波更容易区分,有利于鬼波衰减处理。对于双检采集数据,根据两种检波器接收到的下行波极性不同,一般采用双检合并的方法消除鬼波[3-5]。四分量拖缆采集可看作是双检采集的延伸,其鬼波衰减方法基本相同[6]。Sonneland等[7]最早提出上下双缆采集技术;刘春成等[8]通过上下缆合并算子确定了上下缆采集的最优沉放深度组合;李洪建等[9]提出了频率域起伏双缆合并策略并应用到实际数据上取得了较好的效果。对于变深度缆资料,Soubaras[10]首次提出通过镜像偏移和联合反褶积结合的方法消除鬼波;许自强等[11]提出利用最优联合化反褶积压制变深度缆鬼波;Song Jian-Guo等[12]提出通过频率域高分辨Radon变换去除斜缆鬼波;王冲等[13]采用最小二乘反演迭代算法压制变深度缆数据的鬼波,得到宽频数据。对于常规拖缆采集,Weglein等[14]提出利用格林理论在x-w域中压制鬼波的思想;Mayhan等[15]改进了格林理论压制鬼波算法并在墨西哥湾实际数据中进行了应用;杨金龙等[16]进一步研究了格林理论压制鬼波原理,并形成了处理流程,该方法不需要地下介质信息,但需要进行近道插值;张威等[17]研究了起伏海水表面的拖缆鬼波压制方法。不同的方法都具有各自的特点,并取得了较好的效果。笔者在前人研究的基础上,将Radon域最小平方反演方法应用到深拖平缆资料的鬼波衰减处理中,取得了比较好的效果。

收稿日期:2018-01-29;**修回日期**:2018-11-20
基金项目:中海油服科研项目"鬼波压制技术研究及应用"(WTB18YF006)
作者简介:李慧龙(1984-),男,汉族,工程师,2008年毕业于中国石油大学(华东)地球物理学专业,本科学历,2018年获得中国石油大学(华东)工程硕士学位。现在中海油田服务股份有限公司物探事业部工作,主要从事地球物理勘探数据处理及野外质控工作。

万方数据

1　深拖平缆采集方式的正演模拟分析

在海洋地震勘探中,由于海面是一种自由表面,检波器不仅接收到如图 1a 中的一次波,还会接收到跟随在一次波之后的波,即:鬼波,也叫虚反射。震源激发的波向上传播经过海面反射后再向下传播经界面反射被检波器接收,形成震源鬼波,如图 1b 所示。震源激发的波向下传播经过界面反射后,继续向上传播到水面,经水面反射后,被检波器接收,形成电缆鬼波,如图 1c 所示。震源鬼波与电缆鬼波的综合影响形成震源电缆鬼波,如图 1d 所示。



a—一次反射波;b—震源鬼波;c—电缆鬼波;d—源缆综合鬼波

a—primary reflection;b—the source ghost wave;c—the cable ghost wave;d—the source and cable comprehensive ghost wave

图 1　一次波与鬼波成因示意

Fig.1　The diagram of primary and ghost wave

为了充分了解深拖平缆资料,建立了水平层状地质模型,设计 4 层,厚度分别为 1 000、1 100、550、1 850 m,海水层速度为 1 500 m/s,其他 3 层速度分别为 2 500、3 000、4 200 m/s。设计 3 种不同电缆深度的观测系统对模型进行正演模拟,缆深分别为 10、20、30 m,其他参数相同,Ricker 子波,主频 62 Hz,源深 5 m,电缆长度 6000 m,检波器间隔 12.5 m。对图 2 中 3 个不同缆深的正演炮集数据分别作频谱分析,如图 3 所示。对以上正演数据及频谱进行详细分析,得出深拖平缆资料特点为:①激发位置不变时,电缆越深,电缆鬼波越容易识别。如图 2,当缆深 10 m 时,正演炮集上电缆鬼波与一次波叠加在一

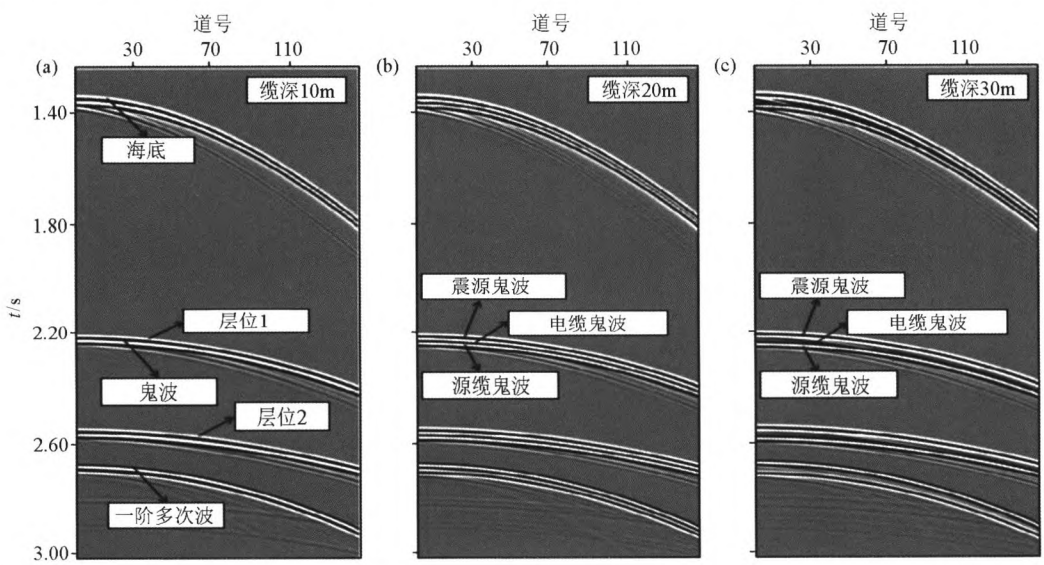


图 2　正演炮集数据

Fig.2　Forward modeling shot gather

万方数据

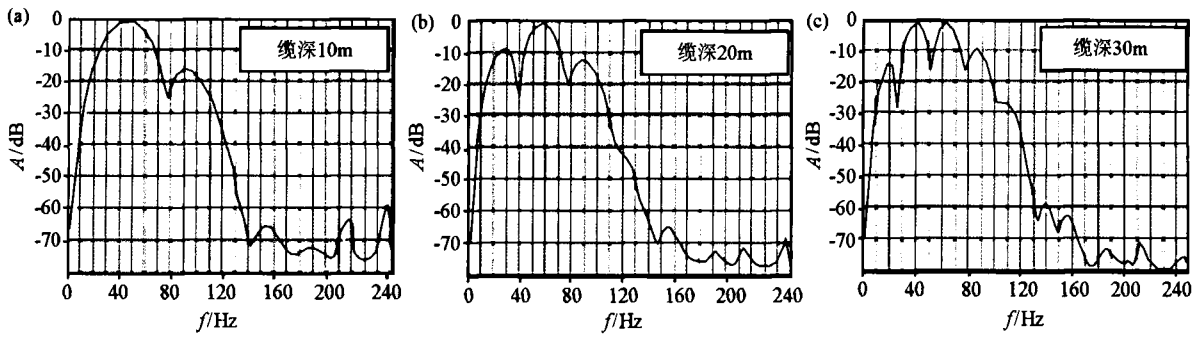


图 3 正演炮集的频谱分析

Fig.3 Forward modeling shot gather frequency spectrum

起;缆深 20 m 时,电缆鬼波和一次波相位可以分开;电缆沉放 30 m 时,电缆鬼波与一次波相位更容易区分。由于震源深度较浅且保持不变,所以源鬼波一直紧随一次波后。②鬼波极性与一次波极性的变化。从图 2b、2c 中也可以清楚看到,震源和电缆鬼波极性都与一次波极性相反,源缆综合鬼波极性与一次波相同,这与海面处的反射系数近似为-1 有关。③频谱随电缆深度的变化。随着缆深的增加,频谱加宽,高、低频端振幅能量略有增强。电缆越深,尼奎斯特范围内的周期性陷频数量越多,鬼波的陷频公式可简化为:$f=\frac{nv}{2h}(h=0,1,\cdots)$,其中 v 为海水速度,h 为沉放深度。④电缆静校正。由于电缆较深,需要通过波场延拓进行静校正。⑤受涌浪影响小。电缆较深,实际资料受涌浪等噪声影响较小,去噪时对低频端的保护更加容易,更适合宽频处理。通过以上分析,充分认识了深拖平缆资料鬼波的射线路径及限频规律,有助于鬼波时距曲线方程的推导,有利于实际资料鬼波处理过程中的质控。

2 鬼波时距曲线方程及衰减原理

以电缆鬼波为例,运用虚震源理论[18],推导鬼波的时距曲线方程。如图 4 所示,S 为震源,源深为 h_s,S^* 相当于震源 S 的虚震源;缆深为 h_r,接收点为 R_x,x 为偏移距,v 为波在介质中的速度,θ 为反射界面倾角,t 为鬼波的旅行时。依据镜像原理,找到电缆相对于海平面的镜像(图 4 中深黄色虚线),则:鬼波的传播路径 $SACR_x$ 就等于路径 $S^*ACR_x^*$。根据几何三角形定理可以得出鬼波的时距曲线方程为:

$$t=\frac{1}{v}\sqrt{\left[\left(h+\frac{h_r}{\cos\theta}\right)+\left(h-\frac{h_s}{\cos\theta}\right)\right]^2+[x+(h_r+h_s)\mathrm{tg}\theta]^2-2\left[\left(h+\frac{h_r}{\cos\theta}\right)+\left(h-\frac{h_s}{\cos\theta}\right)\right]*[x+(h_r+h_s)\mathrm{tg}\theta]\sin\theta} \tag{1}$$

以上推导过程推广到 n 次鬼波(在 $n-1$ 阶多次波后的鬼波),可以得到 n 次鬼波的旅行时方程:

$$t=\frac{1}{v}\sqrt{\left[\left(h\frac{\sin n\theta}{\sin\theta}+\frac{h_r}{\cos n\theta}\right)+\left(h\frac{\sin n\theta}{\sin\theta}-\frac{h_s}{\cos n\theta}\right)\right]^2+[x+(h_r+h_s)\mathrm{tg}n\theta]^2\pm 2\left[\left(h\frac{\sin n\theta}{\sin\theta}+\frac{h_r}{\cos n\theta}\right)+\left(h\frac{\sin n\theta}{\sin\theta}-\frac{h_s}{\cos n\theta}\right)\right]*[x+(h_r+h_s)\mathrm{tg}n\theta]\sin n\theta} \tag{2}$$

式中:正负号表示反射界面倾斜方向,当上倾方向与 X 轴正方向一致时,取负,与 X 正方向相反时,取正。当 n 为 1 时,即为式(1)结果。假设反射界面为水平界面,且仅考虑一次鬼波的情况,式(2)就可以简化为:

$$t=\frac{1}{v}\sqrt{[(h+h_r)+(h-h_s)]^2+x^2}\text{。} \tag{3}$$

根据鬼波的时距曲线方程,进一步理解了鬼波与一次波的射线关系,据此得到上行一次波和下行鬼波到达检波点 R_x 处的时间 τ_{pr} 和 τ_{gh},如式(4)和式(5):

$$\begin{cases}\tau_{pr}=(x+\Delta h)p-\Delta\tau\text{,}\\ \tau_{gh}=(x-\Delta h)p+\Delta\tau\text{。}\end{cases} \tag{4}$$

$$pv=\sin\theta_r,\ \Delta h=h_r\tan\theta_r,\ \Delta\tau=\sqrt{h_r^2+\Delta h^2}/v\text{。} \tag{5}$$

式中:Δh 为上行波在海面处的反射点到电缆检波点的水平距离,$\Delta\tau$ 为相对于海平面接收到的一次波时差,θ_r 为射线角。

万方数据

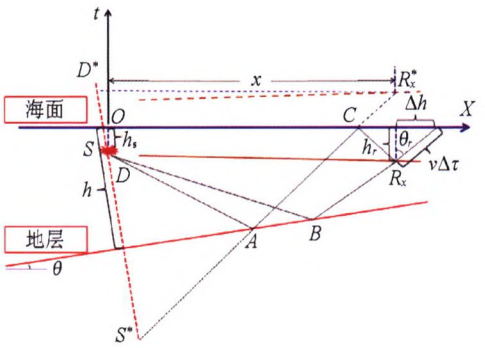


图 4　鬼波射线理论示意

Fig.4　Principal chart of time distance curve equation of ghost

Radon 变换在频率空间域的正反变换公式如式(6)和(7)所示:

$$R(w,p_j)=\sum_{n=1}^{N}S(w,x_n)\mathrm{e}^{\mathrm{i}wp_jx_n}, \tag{6}$$

$$S(w,x)=\sum_{j=1}^{J}R(w,p_j)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}wp_jx_n}。 \tag{7}$$

式中:N 为地震道数,J 为 p 的取值个数,x_n 表示炮集中第 n 道的炮检距,p_j 表示 τ-p 模型中第 j 道的慢度值,$w=2\pi f$,f 为瞬时频率,式(6)和式(7)用矩阵形式可表示为:

$$\boldsymbol{R}(p_j)=\boldsymbol{O}^{\mathrm{H}}*\boldsymbol{S}(x_n), \tag{8}$$

$$\boldsymbol{S}(x_n)=\boldsymbol{O}*\boldsymbol{R}(p_j)。 \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{O}=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}w\tau_{n,j}}$为反变换算子,$\tau_{n,j}=p_jx_n$。

地震资料中包含鬼波时,根据鬼波的射线规律,结合式(4)和(5),式(9)可改写为式(10):

$$\boldsymbol{S}(x_n)=\boldsymbol{O}_t*\boldsymbol{R}_{z0}。 \tag{10}$$

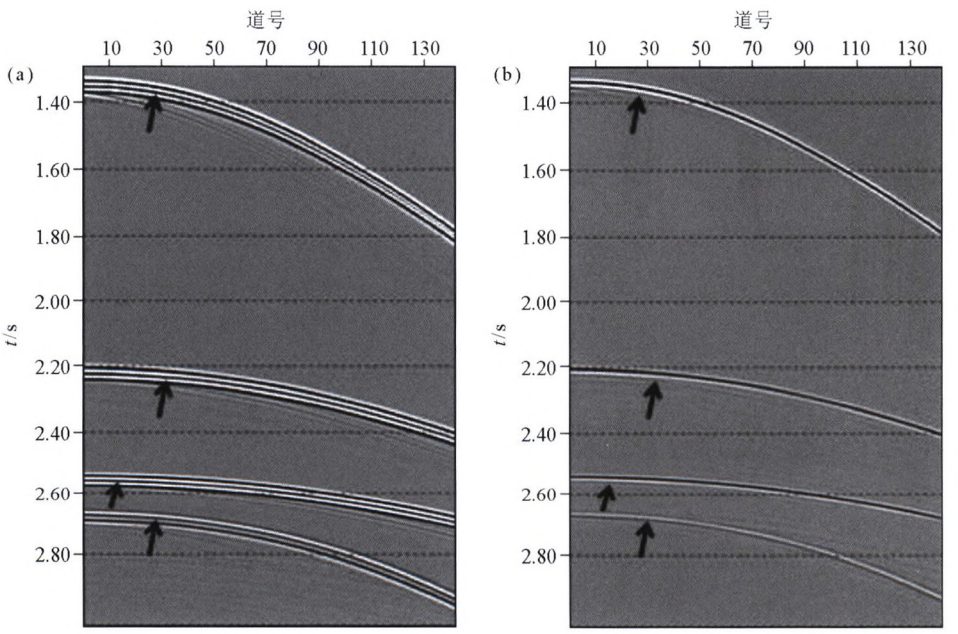
Radon 反变换的算子 $\boldsymbol{O}_t$ 包含两部分,如式(11)所示:

$$\boldsymbol{O}_t=\boldsymbol{O}_{pr}+r\boldsymbol{O}_{gh}, \tag{11}$$

r 为海面反射系数,$\boldsymbol{O}_{pr}=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}w\tau_{pr}}$表示一次波反变换算子,应用此算子可以得到电缆数据;$\boldsymbol{O}_{gh}=\mathrm{e}^{-\mathrm{i}w\tau_{gh}}$表示虚反射的反变换算子,应用此算子可以得到镜像电缆数据。通过最小平方反演求解方程(10),就可以求得海平面上无鬼波的 Radon 域数据 $\boldsymbol{R}_{z0}$,应用反变换算子 $\boldsymbol{O}_{pr}$对 $\boldsymbol{R}_{z0}$进行反变换就可以得到去鬼波后的地震数据。

3　模型数据试验

为了测试鬼波衰减方法效果,选用缆深为 20 m 的一组正演炮集数据进行了压制鬼波处理试验。图 5a 为电缆鬼波衰减前的单炮记录,可以清楚地看到 3 个地层和海底一阶多次波以及跟随在其后的鬼波。图 5b 为鬼波衰减后的单炮记录,从箭头所指位置可以明显地看出,电缆鬼波得到了有效地衰减。图 6 为鬼波衰减前后的频谱,可以看出由电缆鬼波造成的陷频点得到了有效补偿,鬼波衰减后,低、高频端频带展宽,能量增强。



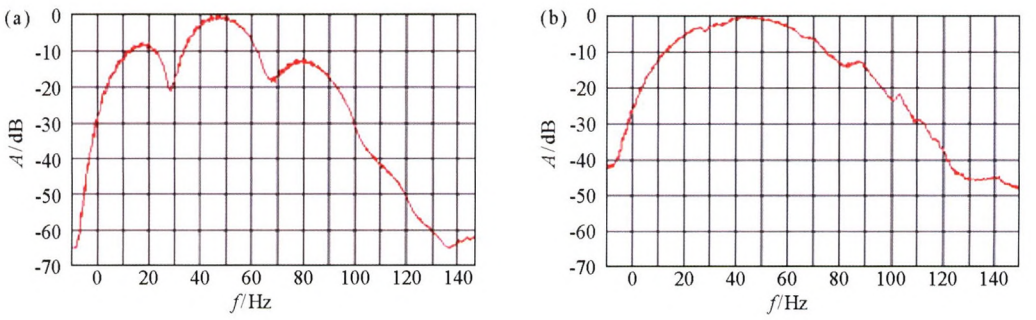
a—原始炮集;b—鬼波衰减后炮集

a—original shot gather;b—shot gather after ghost attenuation

图 5　电缆鬼波衰减效果对比

Fig.5　Streamer ghost attenuation results

万方数据



a—原始频谱;b—鬼波衰减后频谱

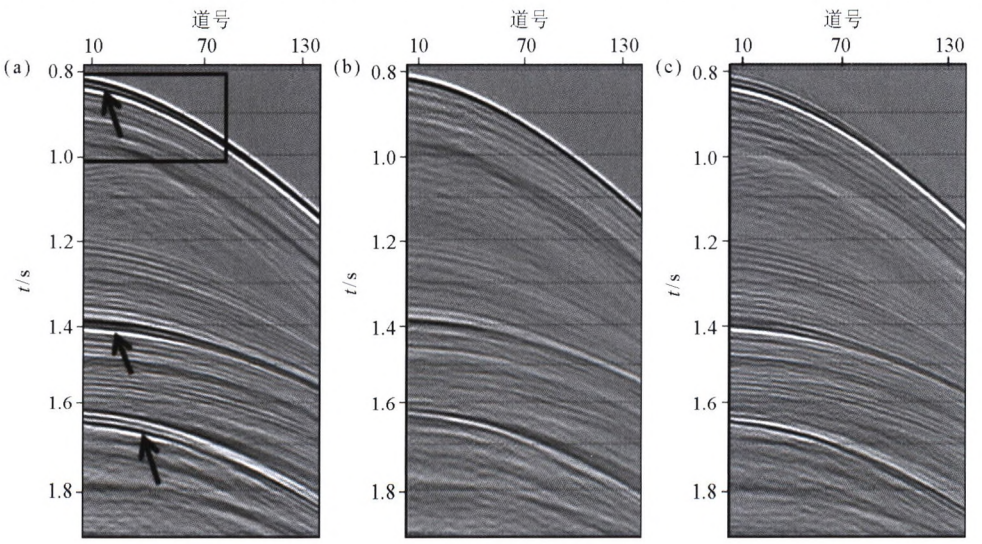
a—original spectrum;b—spectrum after ghost attenuation

图 6 电缆鬼波衰减频谱对比

Fig.6 Streamer ghost attenuation spectrum results

4 实际资料应用

实际资料来自于国外某区块,电缆沉放深度 17 m,汽枪深 7 m,道间距 12.5 m,水深约 500 m。图 7 为鬼波衰减前后的炮记录,由于激发位置较浅,震源鬼波与一次波混合在一起,较难区分,电缆鬼波可以清楚地分辨出来,如图 7a 所示,可以看到衰减电缆鬼波后的各层位更加清楚,分辨率更高。图中箭头指示位置分别为跟随在海底,有效层位和海底一阶多次波后的鬼波,经过衰减处理后,这些鬼波得到了明显的衰减,如图 7b 所示;图 7c 是原始记录与衰减鬼波后记录的差,主要为鬼波和噪声的单炮。对图 7 中鬼波衰减前后的炮(矩形区域)进行频谱分析,如图 8 所示,



a—鬼波衰减前;b—鬼波衰减后;c—鬼波衰减前后差

a—before ghost attenuation;b—after ghost attenuation;c—the difference of ghost attenuation before and after

图 7 实际资料炮集鬼波衰减效果

Fig.7 The ghost attenuation results on field shot gather

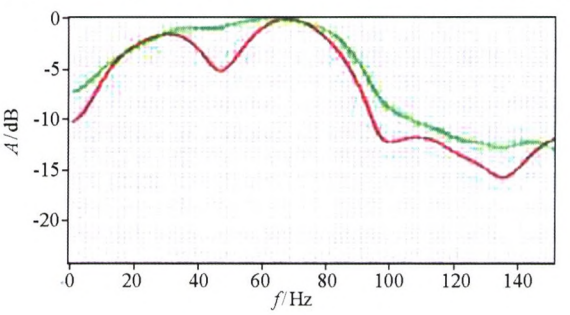
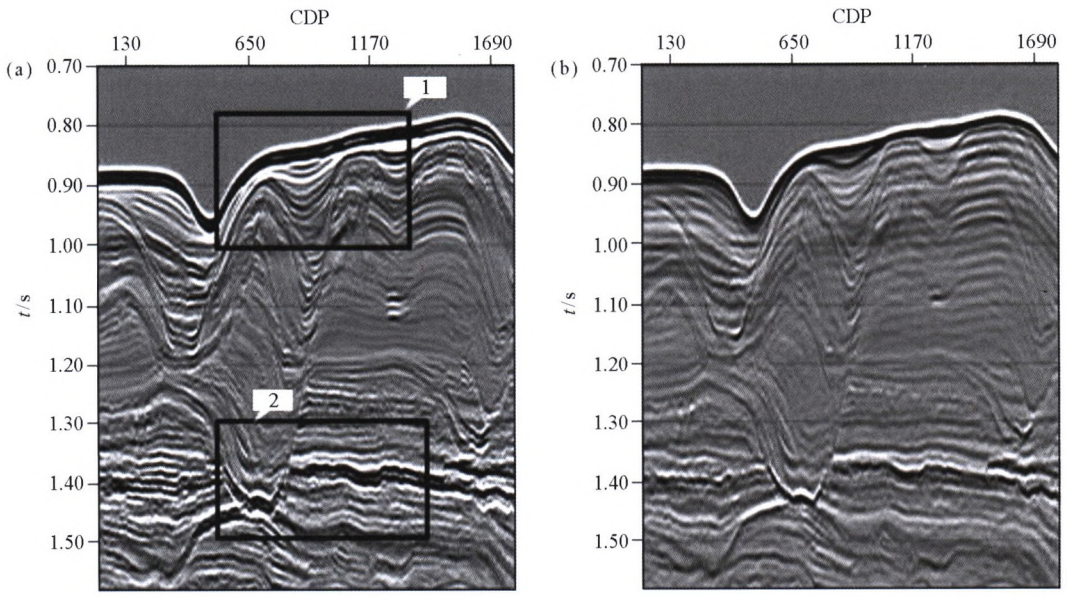


图 8 炮集压制鬼波前(红线)后(绿线)的频谱对比

Fig.8 Shot frequency spectrum before(red) and after(green) ghost attenuation

万方数据

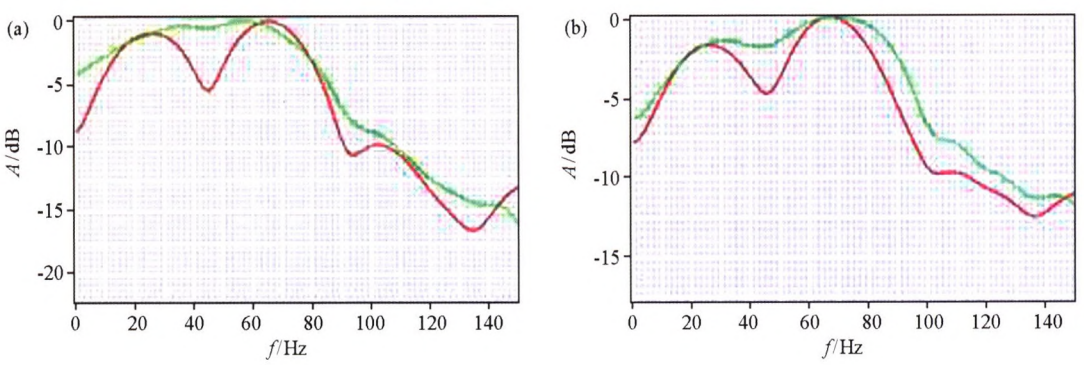


a—鬼波衰减前;b—鬼波衰减后

a—before ghost attenuation;b—after ghost attenuation

图 9　鬼波衰减前后偏移剖面效果对比

Fig.9　The ghost attenuation results on migration section



a—对应矩形 1;b—对应矩形 2

a—rectangle 1;b—rectangle 2

图 10　偏移数据体压制鬼波前(红线)后(绿线)的频谱对比

Fig.10　Migration section frequency spectrum before(red) and after(green)

可以清楚地看到频谱上的陷波位置得到了很好的补偿,拓宽了频带。图 9 为鬼波衰减前后目标区域的偏移效果对比,表明该方法对压制鬼波有比较好的效果。图 10 是对衰减前后的剖面(两个矩形区域)进行频谱分析,可以看到,陷频点得到了补偿,低、高频端频谱能量明显提高,有效频带拓宽。

5　结论

1)模型数据表明:线性 Radon 变换最小平方反演方法能够有效地衰减电缆鬼波,并有效地补偿了陷频点,拓宽了频带。

2)针对深拖平缆采集方法,实际资料处理结果表明,应用文中介绍的方法衰减鬼波后,可以有效地提高地震资料分辨率,有益于后续的处理解释。

3)在实际应用中,需要提供准确的电缆沉放深度和震源深度。

参考文献(References):

[1]　余本善,孙乃达.海上宽频地震采集技术新进展[J].石油科技论坛,2015(1):41-45.

Yu B S,Sun N D.Latest development of marine braodband seismic acquisition technology[J].Oil Forum,2015(1):41-45.

[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 Z Q.New advances in marine broadband seismic exploration [J].Oil Geophysical Prospecting,2014,49(3):421-430.

[3]　Barr F J,Sanders J I.Attenuation of water column reverberations using pressure and velocity detector in a water-bottom cable[C]// 59th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 1989:460-467.

[4]　龚旭东,周滨,高梦晗,等.检波点水深误差对 OBC 双检资料合

万方数据

并处理的影响与对策[J].石油物探,2014,53(3):324-329.
Gong X D,Zhou B,Gao M H,et al.The influence and strategy of water depth error at receivers on dual-sensor summing processing [J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2014,53(3):324-329.

[5] 徐强.海底电缆资料双检合并处理技术研究与应用[J].工程地球物理学报,2017,14(2):130-134.
Xu Q.The Research and application of dual detection and processing technology of sea-bottom cable data[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2017,14(2):130-134.

[6] Robertsson,Moore I,Vassallo M,et al.On the use of multicomponent streamer recordings for reconstruction of pressure wavefields in the crossline direction[J].Geophysics,2008,73:A45-A49.

[7] Sonneland L,Berg L E,Eidsvig P,et al.2D deghosting using vertical receiver array[C]//56th Annual International Meeting,SEG Expanded Abstracts,1986:516-519.

[8] 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(5):623-629.
Liu C C,Liu Z B,Gu H M.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.

[9] 李洪建,韩立国,巩向博.频率域起伏双缆数据合并策略[J].石油物探,2015,54(6):674-680.
Li H J,Han L G,Gong X B.Merge strategy for fluctuate double streamers in frequency domain[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2015,54(6):674-680.

[10] Soubaras R.Deghosting by joint deconvolution of a migration and mirror migration[C]//80th Annual International Meeting,SEG Expanded Abstracts,2010:3406-3410.

[11] 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 Z Q,Fang Z Y,Gu H M,et al.The application of optimal deghosting algorithm on marine variable-depth streamer data[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2015,54(4):404-413.

[12] Song J G,Gong Y L,Li S.High-resolution frequency-domain Radon transform and variable-depth streamer data deghosting [J].Applied Geophysics,2015,12(4):564-572.

[13] 王冲,顾汉明,许自强,等.最小二乘反演迭代算法在压制海上变深度缆采集数据虚反射中的应用[J].地球物理学报,2016,59(5):1790-1803.
Wang C,Gu H M,Xu Z Q,et al.The application of least-squares inversion iteration algorithm to deghost for marine variable-depth streamer data[J].Chinese J. Geophys.(in Chinese),2016,59(5):1790-1803.

[14] Weglein A B,Shaw S A,Matson K H,et al.New approaches to deghosting towed-streamer and ocean-bottom pressure measurements [C]//72nd Annual International Meeting,SEG Expanded Abstracts,2002:1016-1019.

[15] Mayhan J D,Weglein A B.First application of Greens theorem-derived source and receiver deghosting on deep-water Gulf of Mexico synthetic (SEAM) and field data[J].Geophysics,2013,78(2):WA77-WA89.

[16] 杨金龙,Weglein Arthur B.基于格林理论的鬼波压制方法及其应用[J].石油物探,2017,56(4):507-515.
Yang J L,Weglein Arthur B.A deghosting method based on Greens theorem and its application[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(4):507-515.

[17] 张威,韩立国,李洪建.基于起伏海水表面的拖缆鬼波压制方法[J].石油物探,2017,56(4):500-506.
Zhang W,Han L G,Li H J.Deghosting method based on avariable sea surface for conventional streamer seismic data[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(4):500-506.

[18] 贾连凯.南海深水区多次波压制技术研究[D].北京:中国科学院研究生院(海洋研究所),2014.
Jia L K.Study of multiple elimination techniques in the deepwater-area of south China Sea[D].Beijing:Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology),2014.

The application of broadband processing technology to deep towing flat streamer data

LI Hui-Long,WANG Zheng,SONG Xin,WU Chao,MA De-Zhi,SHI Meng-Chang,ZHAO Liang
(*Geophysical-China Oilfield Services Limited,Tianjin 300451,China*)

Abstract: Ghost attenuation,the key step of broadband processing,is a very important step in data-processing of deep towing flat streamer.Therefore,this paper analyzes the features of deep towing flat cable data,derives time distance curve equation of ghost and,on such a basis,introduces the basic principle of the linear least square inversion in Radon domain method for ghost attenuation.First,no ghost data is obtained by the least square method in Radon domain,then the primary wave operator is used in inverse transform,so as to realize the attenuation of ghost.The processing effect of model and actual data shows that,after ghost attenuation,the frequency notches of deep towing flat cable data can be compensated,and the effective frequency bandwidth can be broadened,thus achieving the effect of broadband processing.

Key words: broadband;deep towing flat streamer;ghost attenuation;time distance curve equation;Radon domain;the least square

(本文编辑:叶佩)

万方数据