

doi: 10.11720/wtyht.2022.2337

马德志, 王炜, 金明霞, 等. 海上地震勘探斜缆采集中鬼波产生机理及压制效果分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 175–181. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2337>

Ma D Z, Wang W, Jin M X, et al. Generation mechanism of ghost wave in marine seismic exploration and ghost wave attenuation from marine seismic data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 175–181. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2337>

海上地震勘探斜缆采集中鬼波产生机理 及压制效果分析

马德志, 王炜, 金明霞, 王海昆, 张明强

(中海油田服务股份有限公司, 天津 300451)

摘 要: 在海洋油气勘探中, 为了准确获取勘探目的层高精度、高分辨率的反射信息, 实现更加细腻的成像, 海洋地震宽频采集及处理技术近年来得到了极大的创新和发展。本文研究了海洋地震勘探中鬼波的产生机理、鬼波的分类和特性及其在实际地震资料中的表现形式。采用频率域高精度斜缆 Radon 变换作为主要处理方法, 对某直斜缆宽频数据进行了鬼波的衰减, 经过鬼波压制处理后, 地震资料的震源鬼波和电缆鬼波都得到了极大程度的衰减, 陷波点能量显著增强。鬼波压制处理既拓宽了地震资料的低频成分, 也拓宽了地震资料的高频成分, 尤其低频成分能量得到了显著的增强, 该方法在实际海洋地震资料的应用中取得了良好的应用效果。

关键词: 鬼波衰减; 陷波; 斜缆采集; 宽频处理

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0175-07

0 引言

在海洋地震勘探中, 海水和空气波阻抗之间的巨大差异, 两个强反射界面之间构成了自由表面, 因此所有向上传播的地震波在传播到海平面时发生极性反转并改变传播方向转而向下传播而被检波器再次接收, 表现为下行波与上行波如影随形, 故而形象地称之为“鬼波”。

鬼波的存在会在地震剖面产生假反射^[1], 甚至覆盖有效反射波的能量, 影响地震数据的处理和成果剖面的分析, 对最终成像剖面的解释造成干扰, 并在很大程度上降低反演的可靠性, 从而给后期地震资料反演与地质解释、层位追踪等工作带来很大的困难。另外, 由于鬼波的影响, 地震资料的频谱上会出现陷波点, 陷波点在频率域具有周期性, 会等频率间隔地反复出现^[2]。这些陷波点的存在, 不仅损失了对刻画大构造有重要意义的低频信息, 也损失了

对提高资料垂向分辨率有重要作用的高频信息, 很大程度上限制了地震资料有效频带的宽度^[3]。通过地震资料的鬼波压制处理, 可以获得具有丰富的低频、高频成分的宽频带、高信噪比、高分辨率地震资料。

1 海洋地震勘探鬼波产生原因及特性分析

1.1 鬼波产生的机理分析

在海洋地震勘探中, 由于采集目的和野外施工环境的限制, 需要将激发地震波的震源和接收地震波的检波器放置在海平面以下的一定深度处。在海平面处, 由于海水和空气之间的波阻抗较大, 反射系数接近为-1, 两个强反射界面之间构成了自由表面, 因此所有向上传播的地震波在传播到海平面时发生极性反转并改变传播方向转而向下传播而被检波器再次接收^[4] (如图 1 所示)。

在常规水平缆采集中, 由于同一个工区震源和

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2021-10-23

基金项目: 中国海洋石油总公司科研项目 (WTB21YF002)

第一作者: 马德志 (1987-), 男, 汉族, 2009 年毕业于中国地质大学 (武汉) 地球物理学专业, 现为中海油田服务股份有限公司物探事业部物探研究院数据处理工程师, 主要从事地震资料质量控制及数据处理工作。Email: madezhi@foxmail.com

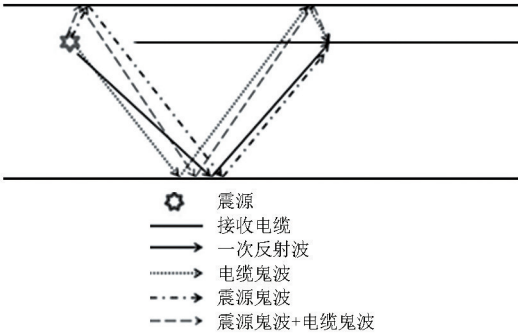


图 1 地震波及鬼波传播全路径示意
Fig.1 Diagram of seismic wave and ghost wave propagation

检波器深度值固定,使得经过海平面反射的下行波与原始上行波形成固定时差,形成虚反射,其特点是所有检波点处的鬼波延迟相同。在接收到的地震炮集和处理过的叠加剖面上,表现为在上行波之后必会有与之对应的下行波——“鬼波”^[5-6]。在斜缆采集中,鬼波产生的机理与常规水平缆一样,只是由于检波器深度是变化的,所以不同检波点处的鬼波延迟不同。

1.2 鬼波的分类

由鬼波的产生机理我们知道,只要上行地震波传播到反射系数为-1的海平面,就会产生鬼波,而根据传播路径的不同可以将鬼波分为震源鬼波、电缆鬼波以及两者的组合,如图 1 所示。

震源鬼波即为震源端上行波场经海平面反射后向下传播而产生的鬼波。

电缆鬼波即为电缆检波器接收端上行波场经海平面反射后向下传播而产生的鬼波。

还有另外一种传播形式,即为震源鬼波和电缆鬼波的组合,即震源激发后,不仅在电缆端反射虚反射,也在电缆接收端发生虚反射,可以理解为震源鬼波的电缆鬼波,或者电缆鬼波的震源鬼波。

所以,经过以上地震波的传播路径分析,可以得出,震源激发的每一个地震子波,在电缆检波器接收端都会接收到 4 个波形,分别为一次反射波、一次反射波的震源鬼波、一次反射波的电缆鬼波、一次反射波震源鬼波加电缆鬼波。如图 1 所示。

1.3 实际资料中鬼波的表现形式

由鬼波的传播全路径分析,在固定接收点位的检波器接收的地震道数据上,接收到的理论波形表现为 4 个波形成套出现。图 2 所示为震源沉放深度 8 m,电缆沉放深度为 17 m 的一次波反射及其对应的鬼波在单道上的波形示意。

1.4 鬼波的特征

鬼波有 3 个显著的特征,即它的极性特征、达到

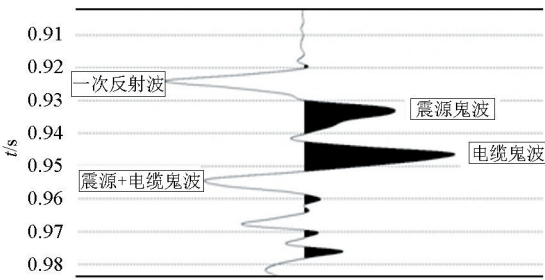


图 2 实际地震资料海底处的一次反射波及鬼波
Fig.2 Reflected wave and ghost wave at the seabed of actual seismic data

时特征和陷波现象。

1.4.1 鬼波的极性特征

因为海平面的反射系数近似等于-1,所以导致鬼波和一次反射波的极性相反,振幅的绝对值近似相等。如果把一次反射波看作尖脉冲,一次反射波及对应的鬼波的时序如图 3 所示。根据 SEG 规范标准,一般一次反射波极性为负起跳,则一次反射波震源端波经过反射系数为-1的海平面反射产生震源鬼波,极性为正起跳,振幅的绝对值与一次反射波相等;一次反射波电缆接收端经过反射系数为-1的海平面反射产生电缆鬼波,极性为正起跳,振幅的绝对值与一次反射波相等;而既经过震源端海平面反射,又经过电缆接收端海平面反射的组合鬼波,因为经过了 2 次反射系数为-1的海平面反射,其极性与一次反射波一致,为负起跳,振幅与一次反射波相等。

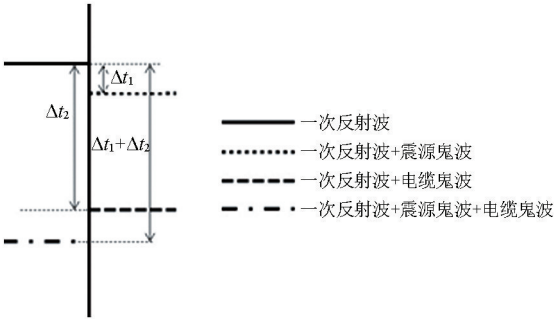


图 3 鬼波时序
Fig.3 Ghost wave time series

1.4.2 鬼波的到达时特征

鬼波到达时较一次反射波到达时的延迟时间 τ ,与震源深度 d_1 和电缆深度 d_2 、地震波在海水中的传播速度 v 有关,在垂直入射的情况下,震源鬼波的延迟时间 $\tau_1 = \frac{2d_1}{v}$,电缆鬼波的延迟时间 $\tau_2 = \frac{2d_2}{v}$ 。

由于实际震源激发的子波并不是尖脉冲,而是有一

定的存续时间,而鬼波延迟 τ 一般较小,常规拖缆的电缆沉放深度会导致一次反射波和震源鬼波、电缆鬼波三者相互干涉,从时间序列上无法有效分离。

1.4.3 鬼波在频谱图上的陷波现象

因鬼波比一次波到达时晚,鬼波延迟为 τ ,所以它总是叠加在一次波的尾部,使信号的延续时间变长,从而影响了子波的频谱。

电缆检波器记录到的信号为:

$$S(t) = s(t) + R_0 s(t - \tau), \tag{1}$$

式中: $S(t)$ 是包含鬼波的地震记录; $s(t)$ 是一次反射波; $s(t-\tau)$ 是延迟为 τ 的鬼波, R_0 是海平面的反射系数。

因海平面的反射系数近似等于-1,故式(1)可以简化为:

$$S(t) = s(t) - s(t - \tau), \tag{2}$$

经过傅里叶变换,在频率域,有:

$$S(f) = s(f) \cdot G(f) \tag{3}$$

式(3)中, $G(f)$ 即为地震信号的鬼波频率特征因子:此时有:

$$G(f) = |1 - e^{-i2\pi f\tau}| = 2 | \sin(\pi f\tau) |. \tag{4}$$

从式(4)可知,鬼波延迟 τ 决定了频率特性因子 $G(f)$,而 τ 则与震源、电缆沉放深度以及地震波在海水中的传播速度有关;地震波在海水中的传播速度基本为定值,变化很小,一般为 1 500 m/s,因此, $G(f)$ 只与深度有关。

由式(4)可知:

1) 鬼波频率特性因子为正弦曲线(图 4),具有一定的周期,对应的正弦曲线零值点会造成频率缺失,从而产生陷波,其周期 $f=k/\tau(k=0,1,2,\cdots)$;

2) 陷波周期

$$f = \frac{v}{2d} k, k = 0, 1, 2, \cdots \tag{5}$$

式中: v 为地震波在水中的传播速度, d 为沉放深度。即沉放深度越深,陷波点频率越低,沉放深度越浅,陷波点频率越高。

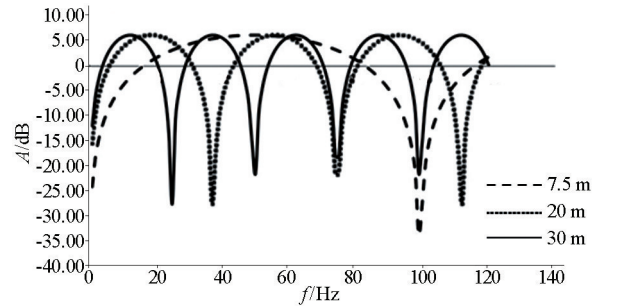


图 4 鬼波的频率响应曲线

Fig.4 Frequency response curve of ghost wave

2 海洋地震资料去鬼波处理方法

针对海上地震资料的鬼波衰减方法,国内外大量学者进行了卓有成效的探索与研究。Sonneland L 等^[7]、Weglein A B 等^[8]先后提出并优化了利用波场延拓理论去鬼波,分析和总结了波场的传播特性,阐明了上下电缆数据相结合抑制鬼波效应的效果,以及如何实现将一次波波场与鬼波的波场分开;此理论不需要地下介质的先验信息,可以适用于较复杂的地下介质,对鬼波的描述也是精确的,但是在实际数据处理中需要估计子波和法向导数,使得该方法的使用也有一定的局限性。Soubaras R 等^[9-11]利用斜缆鬼波的频率响应特性,提出了基于联合反褶积的倾斜电缆鬼波衰减理论。Wang P 等^[12]详细介绍了斜缆地震资料中的“bootstrap”法鬼波衰减理论,并通过同时处理 τ - p 域和频域中的地震数据来衰减电缆鬼波。近年来,通过研究在散射体外观察到的场信息,从量子力学出发逐步提出了逆散射理论,先后有学者将其引入到地球物理领域,可以用来进行鬼波的压制。Bleistein 等^[13]率先将逆散射理论应用于地球物理勘探领域。Weglein A B 等^[14]和 Matson^[15]将逆散射级数法应用于地球物理勘探,并用此方法对地震数据中的多次波进行了预测和压制。Weglein A B^[16]进一步优化和改进了逆散射级数理论,引入子级数的概念,并对逆散射级数法鬼波衰减理论算法进行了细致推导。王芳芳等^[17]将逆散射级数法推广到二维,并对算法进行了实现,对实际数据的处理结果表明压制效果良好。但逆散射级数法鬼波压制算法计算量较大,基于目前的计算机计算水平,实际生产中大规模应用存在一定的局限性。Song J G 等^[18]在鬼波压制的研究中引入拉东变换,并将其应用于倾斜电缆数据去鬼波,使地震数据的频带得到了很大程度的提升。拉东变换鬼波压制方法适应性较好,可以很好地用于斜缆资料和常规水平缆资料^[19],且该种方法的计算效率也可以满足工业化生产的要求,本文选用斜缆 Radon 变换方法进行海洋地震资料的鬼波压制处理。

2.1 频率域高精度 Radon 变换的原理

众所周知,时间域的 Radon 变换通过傅里叶变换可以转换到频率域,线性 Radon 变换在频率域的表现形式可以表达为:

$$M(\omega, p) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\omega, x) e^{i\omega p x} dx, \tag{6}$$

$$\tilde{D}(\omega, x) = \int_{-\infty}^{\infty} M(\omega, p) e^{-i\omega p x} dp. \tag{7}$$

与其对应的海平面上检波点的横向距离, $\Delta\tau_{n,j}$ 为斜缆到达时与水平缆接收的一次波时差。

根据斜缆地震波与水平缆地震波的走时关系, 同时考虑到斜缆中既存在一次波又存在检波器虚反射, Radon 反变换公式中的反变换算子可改写为 2 个部分:

$$L_{ud} = L_u + RL_d, \tag{23}$$

其中, L_{ud} 表示斜缆数据 Radon 反变换算子、 $L_u = e^{-i\omega\tau_{pu}}$ 表示一次波反变换算子、 $L_d = e^{-i\omega\tau_{pg}}$ 表示鬼波反变换算子, R 表示海面反射系数, τ - p 域数据 m 可以通过求解方程组 $d = L_{ud}m$ 得到, 该数据对应的是在海平面处进行接收无鬼波的上行一次波的 τ - p 域地震数据, 对 m 应用下行鬼波反变换算子 L_d 可以预测得到斜缆检波器鬼波数据。

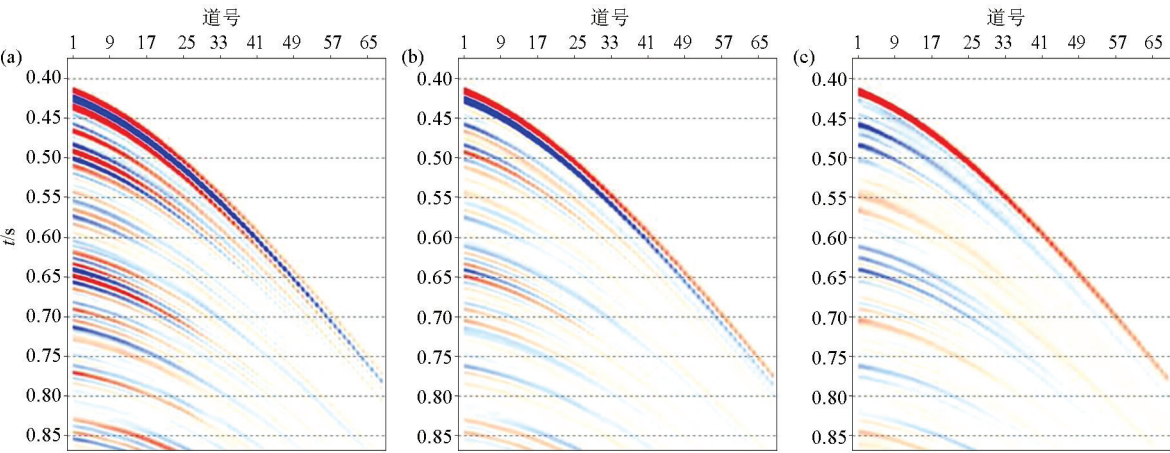
3 实例分析

选取安达曼海某工区的直斜缆地震资料进行斜缆 Radon 变换鬼波压制处理, 本区块干扰噪音较小, 资料信噪比较高。观测系统关键参数如下: 震源深度 7 m, 电缆长度 7 050 m, 电缆深度 7~40m, 检波器间距 12.5 m, 炮间距 25m (单源 50m), 电缆检波器沉放深度为直斜。

第 1 道检波器的沉放深度为 7 m, 最后一道检波器的沉放深度为 40 m。随着偏移距的增大, 检波器沉放深度越来越大, 对应的鬼波延迟也越来越大, 在地震记录上表现为鬼波同相轴与一次反射波同相轴相互重叠或干涉越来越弱。图 6a 为未进行鬼波压

制的原始单炮记录, 从图上可以清晰看到海底一次反射波为最浅处的红色波形; 紧随其后的蓝色波形为震源鬼波和检波点鬼波的混叠, 由于时差相近, 无法有效区分开来, 这个波形仅经过了一次海平面反射, 发生了相位反转, 与海底一次反射波极性相反; 第三套为红色波形, 是经过了震源端和检波点端 2 次海面反射的鬼波, 其极性与海底一次反射波相同。图 6b 为压制掉电缆鬼波后的单炮记录, 可以看到蓝色波形能量得到了一定的衰减, 第三套红色鬼波也得到了有效压制。图 6c 为压制掉电缆鬼波和震源鬼波后的单炮记录, 经过震源端鬼波压制和检波点端鬼波压制后, 海底处的 4 套波形变为 1 套, 仅保留了一次有效反射波。从压制鬼波前后的单炮记录对比中可以看到, 经过鬼波压制处理后, 单炮记录中的电缆鬼波和震源鬼波得到了有效压制, 鬼波的同相轴得到了很大程度的衰减, 一次波的同相轴也变得更加清晰。图 7 为鬼波压制前后单炮上的频谱分析对比图, 分析时窗为近道浅层, 时窗为 400~800 ms。可以看到, 去鬼波后陷波点能量得到了很大的恢复和提升, 地震资料低频端和高端能量均得到了很好的提升。

海上地震资料鬼波压制效果的对比可以在叠加剖面上进行对比分析。图 8 所示为直斜缆地震资料鬼波压制前后的叠加剖面分析。从鬼波压制前的叠加剖面(图 8a)上可以清晰地看到鬼波同相轴的存在, 海底处表现为两红一黑, 其中最浅处的红轴为海底一次波反射轴, 黑轴为经过海底一次反射的震源鬼波和电缆鬼波叠加形成的同相轴, 第二个红色的



a—原始单炮记录; b—电缆鬼波压制后; c—电缆鬼波和震源鬼波压制后
a—raw shot; b—receiver ghost attenuation; c—source and receiver ghost attenuation

图 6 直斜缆地震资料去鬼波前后炮集对比

Fig.6 Comparison of straight slant cable before and after ghost attenuation

同相轴为经过 2 次海底反射所形成的鬼波同相轴。经过鬼波压制后,鬼波同相轴能量得到了很大程度的衰减(图 8b,c),鬼波信息得到了明显的消除,使得地下反射层位更加清晰,一次波同相轴的连续性更加可靠清晰。从叠加剖面的频谱分析看(图 9),陷波点能量得到了很大的恢复和提升,地震资料低频端和高端能量均得到了很好的提升,尤其低频成分能量得到了显著的增强,地震低频端频率可以低至 3 Hz,这对地震反演结果至关重要,可以得到更加可靠的反演结果。这些都表明经过宽频处理,鬼波能量得到了较好的消除。

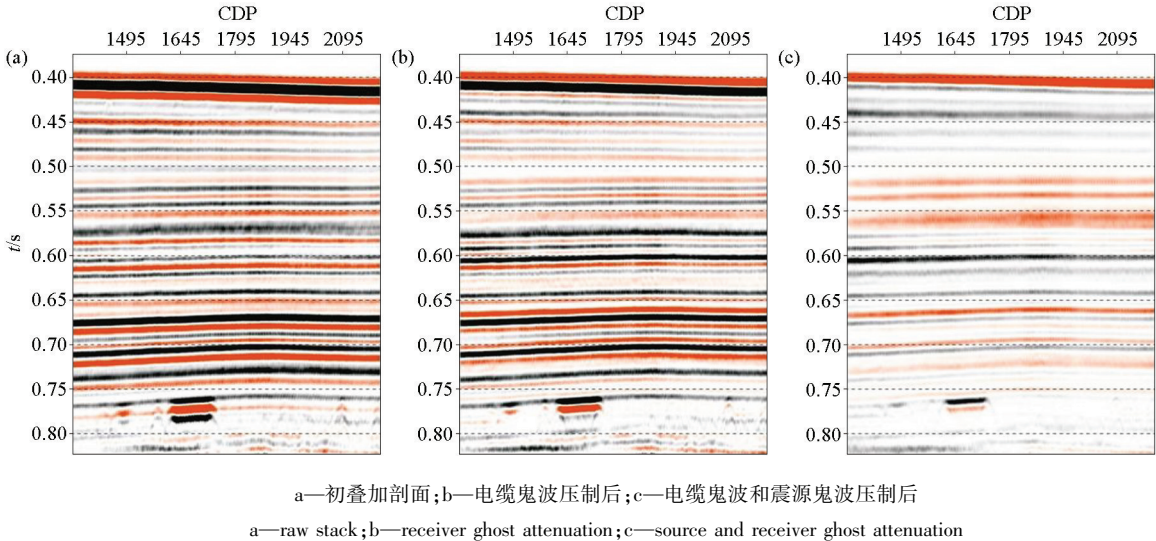


图 8 直斜缆鬼波压制前后叠加剖面对比

Fig.8 Stack section comparison of straight slant cable data before and after ghost attenuation

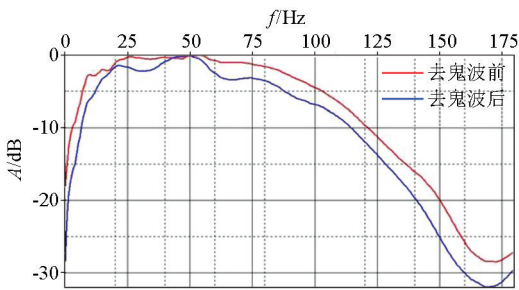


图 9 直斜缆鬼波压制前后叠加剖面频谱对比

Fig.9 Spectrum comparison on stack profile of straight slant cable data before and after ghost attenuation

4 结论

通过对直斜缆地震资料进行频率域高精度斜缆 Radon 变换方法去鬼波,可以看到地震资料的震源鬼波和电缆鬼波都得到了极大程度的衰减,通过对炮记录、炮记录频谱、叠加剖面、叠加剖面频谱等宽频处理前后的分析对比,可以看到经过鬼波压制处

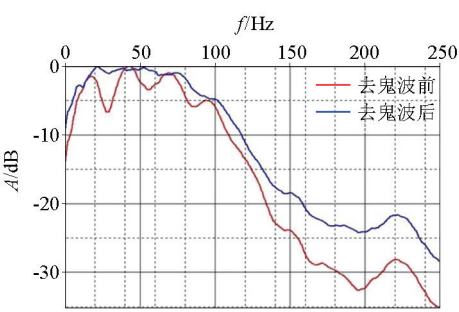


图 7 直斜缆地震资料去鬼波前后炮集频谱分析对比

Fig.7 Spectrum comparison on shot gather of straight slant cable before and after ghost attenuation

理,鬼波信息得到了很大程度的衰减,使得地下反射层位更加清晰,同相轴的连续性好。经过鬼波处理后,陷波点处的能量得到明显提升,基本消除了陷波对地震资料的影响。通过处理效果前后的对比,可以看出该方法可以有效地消除了斜缆地震资料的鬼波,提升了陷波点处的频谱,拓宽了地震资料的频带宽度。该方法在实际海洋地震资料的宽频处理中不仅处理效果较好,且具有处理效率高、对地震数据的适用性好等特点,无论斜缆资料还是常规水平拖缆资料,都可以取得良好的应用效果。

参考文献(References):

[1] 陆敬安,于荣萍,伍忠良.海洋地震勘探直达波、鬼波综合效应分析[C]//长春:中国地球物理学会第二十一周年会,2005:324-324.

Lu J A, Yu R P, Wu Z L. Comprehensive effect analysis of direct wave and ghost wave in marine seismic exploration [C]//Changchun: The 21st Annual Meeting of Chinese Geophysical Society, 2005:324-324.

[2] 金明霞,宋鑫,易淑昌,等.海洋地震变深度电缆采集数据的频谱

- 分析及消除鬼波研究[J].物探与化探,2018,42(3):528-536.
- Jin M X, Song X, Yi S C, et al. Spectrum analysis and ghost wave elimination on marine seismic variable depth cable acquisition data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 528-536.
- [3] 张军华, 张在金, 张彬彬, 等. 地震低频信号对关键处理环节的影响分析[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1): 54-62.
- Zhang J H, Zhang Z J, Zhang B B, et al. Analysis of the influence of low frequency seismic signal on key processing steps [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 54-62.
- [4] 姜丹, 蒲晓东, 麻志国, 等. 子波法去鬼波在墨西哥湾的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(5): 914-918.
- Jiang D, Pu X D, Ma Z G, et al. The application of wavelet method to eliminating ghost wave in Gulf of Mexico [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(5): 914-918.
- [5] 陆敬安, 伍忠良, 曾宪军. 海洋地震勘探中地震波、鬼波综合效应分析与应用[J]. 海洋技术, 2006, 25(4): 76-78, 98.
- Lu J A, Wu Z L, Zeng X J. Analysis and application of comprehensive effect of seismic wave and ghost wave in marine seismic exploration [J]. Marine Technology, 2006, 25(4): 76-78, 98.
- [6] 顾元, 文鹏飞, 张宝金, 等. 水平缆地震数据的鬼波压制方法及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1764-1772.
- Gu Y, Wen P F, Zhang B J, et al. Ghost wave suppression method and its application on horizontal cable seismic data [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1764-1772.
- [7] Sonneland L, Berg L E, Eidsvig P, et al. 2-D deghosting using vertical receiver arrays [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1986: 516-519.
- [8] Weglein A B, Shaw S A, Matson K H, et al. New approaches to deghosting towed-streamer and ocean-bottom pressure measurements [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2002: 2114-2117.
- [9] Soubaras R. Variable-depth streamer: Deep towing and efficient deghosting for extended band-width [R]. SEG/EAGE Research Workshop, 2010.
- [10] Soubaras R, Dowle R. Variable-depth streamer—A broadband marine solution [J]. First Break, 2010, 28(12): 89-96.
- [11] Soubaras R. Pre-stack deghosting for variable-depth streamer data [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012: 1-5.
- [12] Wang P, Suryadeep R, Can P, 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.
- [13] Bleistein N, Cohen J K, John W S J. Mathematics of multi-dimensional seismic imaging, migration and inversion [M]. New York: Springer Verlag, 1996.
- [14] Weglein A B, Araujo F V, Carvalho P M, et al. Inverse scattering series and seismic exploration [J]. Inverse Problems, 2003, 19(6): R27-R83.
- [15] Matson K H. The relationship between scattering theory and the primaries and multiples of reflection seismic data [J]. Seismic Exploration, 1996, 5(1): 63-78.
- [16] Weglein A B. Multiple attenuation: An overview of recent advances and the road ahead (1999) [J]. The Leading Edge, 1999, 18(1): 40-44.
- [17] 王芳芳, 李景叶, 陈小宏. 基于逆散射级数法的鬼波压制方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1628-1636.
- Wang F F, Li J Y, Chen X H, et al. Ghost wave suppression method based on inverse scattering series method [J]. Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1628-1636.
- [18] 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.
- [19] 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.
- 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.

Generation mechanism of ghost wave in marine seismic exploration and ghost wave attenuation from marine seismic data

MA De-Zhi, WANG Wei, JIN Ming-Xia, WANG Hai-Kun, ZHANG Ming-Qiang

(China Oilfield Services Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: In marine oil and gas exploration, for the purpose of accurately acquiring the high-precision and high-resolution reflection information of the exploration target and realizing more delicate imaging, broadband acquisition and processing technology of marine seismic has been greatly innovated and developed in recent years. In this paper, the generation mechanism of ghost wave, the classification and characteristics of ghost wave and its manifestation in actual seismic data are studied. The high-resolution radon transform in frequency domain is used as the main processing method to attenuate ghost wave in a broad-band data of a straight slant cable. After the ghost wave suppression processing, the source ghost wave and cable ghost wave of seismic data have been greatly attenuated, and the notch energy has been significantly enhanced. The broadband processing not only broadens the low-frequency component of seismic data, but also broadens the high-frequency component of seismic data; especially, the low-frequency component energy has been significantly enhanced. This method has achieved good results in the application of marine seismic data.

Key words: ghost wave attenuation; notch; slant cable acquisition; broadband processing

(本文编辑:叶佩)