

周凡, 周云和, 江凡, 等. 鬼波延迟随偏移距变化时鬼波压制技术[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(11): 70-77.

鬼波延迟随偏移距变化时鬼波压制技术

周凡¹, 周云和², 江凡¹, 何跃明², 杨再朝^{2*}

(1 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570000; 2 北京东方联创地球物理技术有限公司, 北京 100029)

摘要:海上水平拖缆地震采集数据由于受虚反射(鬼波)的影响, 导致其地震数据成像分辨率降低, 直接影响到海上油气藏储层描述中地震解释的准确性及精度。现有的鬼波压制方法通常将源、缆鬼波分开处理, 且没有考虑偏移距对鬼波延迟时的影响。针对鬼波延迟随偏移距变化, 提出了同步压制源、缆及源缆鬼波的技术。理论模型试算和实际数据处理结果表明, 本方法计算稳定, 可有效压制海上水平拖缆地震数据中的鬼波, 较好地恢复受鬼波陷波影响频段的能量, 提升成像数据品质。

关键词:海上勘探; 水平拖缆; 偏移距影响鬼波延迟时; 同步压制; 源缆鬼波

中图分类号: P631

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.176

海上地震勘探的气枪及检波器沉放在海水面以下, 其采集的地震数据中会记录到大量的虚反射(常称为鬼波)。由于鬼波形成的周期复杂多变, 且会随震源和检波器沉放深度、反射深度、偏移距、入射角、出射角、地层倾角等多种因素的变化而变化, 导致鬼波压制难度增大。另外, 鬼波的频率与拖缆的沉放深度相关, 拖缆沉放深度越深, 鬼波频率越向低频端移动, 与有效波频率成份叠合在一起, 增加了宽频处理的难度。近年来, 海上地震宽频勘探技术得到快速发展, 主要受益于变深沉放拖缆(斜缆)施工方式、双检波器的使用以及配套的鬼波压制及拓频处理技术等。但是, 在浅海区地震勘探中, 目前主要还是以水平拖缆施工方式为主, 鬼波压制技术有待进一步提高, 水平拖缆鬼波压制效果的好坏将直接影响后续反褶积处理的反子波估算及拓频处理, 进而影响资料处理成果的品质。因此, 要获得浅海区水平拖缆地震勘探数据的高分辨率、高品质处理结果, 鬼波压制是关键。

海上水平拖缆地震数据的鬼波压制方法有很多, 例如, 分别基于虚反射相位剔除法反褶积^[1]、逆

散射级数法^[2]、格林函数理论的波场预测^[3-4]、确定性子波处理^[5]、波场外推和阈值截断^[6]、利用伪速度^[7]、编码与解码框架下的局部平面波域多次波压制^[8]、几何级数展开^[9]等鬼波压制方法; 针对平缆鬼波的压制方法, 还有分别基于自举法^[10]、混合范数联合反褶积^[11]、 τ - p 域^[12-15]、逆时偏移^[16]、起伏海水表面^[17]、波动方程迭代反演^[18]、线性 Radon 域最小平方反演^[19]等方法。通常将源直接形成的上行波经海面反射下行再经地层反射到达检波器接收的鬼波称为源鬼波, 将反射形成的上行波经海面反射下行直接被检波器接收的这部分鬼波称为缆鬼波。源鬼波经反射后形成的缆鬼波, 简称“源缆鬼波”。上述技术在实际应用中均取得一定的效果, 但有些技术都是针对源、缆鬼波分别进行压制的, 尚缺少针对源缆鬼波的有效压制, 且没有考虑偏移距对鬼波延迟时的影响。本文基于海上水平拖缆地震数据的鬼波形成机制及特点, 研究了鬼波延迟随偏移距变化时同步压制源鬼波、缆鬼波及源缆鬼波的技术, 为水平拖缆地震勘探数据的鬼波压制处理提供了技术支撑。

1 鬼波压制技术

1.1 方法原理

海洋拖缆地震勘探采用水中激发及水中水听器接收的数据观测方法。如图 1, 由于海面与空气

收稿日期: 2021-06-02

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大项目“南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ02ZJ)

作者简介: 周凡(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋油气勘探方面的研究工作。E-mail: Zhoufan3@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 杨再朝(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事油气勘探方面的研究工作。E-mail: east_union@163.com

接触, 海水与空气波阻抗差异大, 使反射系数接近于-1; 当上行波到达该界面时会被反射成下行波传播, 这些下行波除了形成海底-海面全程多次波外, 未形成多次波的信息被检波器接收后, 就称为鬼波。图 1 所示为几种基本鬼波类型, 其传播分别为: $s-o-r'-r$ 、 $s-s'-o-r'-r$ 和 $s-s'-o-r$ 。相对于有效反射波 $s-o-r$ 的传播路径, 鬼波的走时较有效波有一定的时间延迟。同时, 虚反射波均为海水入射到空气的反射波, 因此, 鬼波与有效波振幅之间还存在一个反射系数大小的差异。

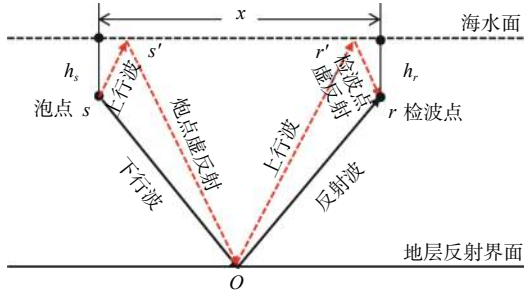


图 1 海上地震勘探中虚反射形成示意图

Fig.1 Schematic diagram of ghost reflection formation in offshore seismic exploration

根据地震波传播及时间延迟理论, 设地震波的时间域函数 $w(t)$, 则包含一次虚反射波场函数 $f(t)$ 可以写成为:

$$f(t) = w(t) + r_0 w(t + \Delta\tau) \quad (1)$$

式中: $r_0 = \frac{(v_a \rho_a - v_w \rho_w)}{(v_a \rho_a + v_w \rho_w)}$ 为地震波在海水与空气面的反射系数;

v_a 、 v_w 分别为地震波在空气中和海水中的传播速度;

ρ_a 、 ρ_w 为空气及海水密度;

$\Delta\tau$ 为炮点或检波点的延迟时间。

设 $\Delta\tau_s$ 、 $\Delta\tau_r$ 为炮点或检波点在海水面深度 h_s 或 h_r (图 1) 形成延迟时间。如果考虑虚反射的入射角较小, 则, $\Delta\tau_s = \frac{2h_s}{v_w}$, $\Delta\tau_r = \frac{2h_r}{v_w}$, 因此, 对于如图 1 所示形成的 3 种虚反射的波场函数可以表示为:

$$f(t) = w(t) + r_0 w(t + \Delta\tau_s) + r_0 w(t + \Delta\tau_r) + r_0^2 w(t + \Delta\tau_{sr}) \quad (2)$$

上式中, 如果假设炮点和检波点深度相等, $\Delta\tau_s = \Delta\tau_r = \Delta\tau$, $\Delta\tau_{sr} = 2\Delta\tau$, 则可以简化成:

$$f(t) = w(t) + 2r_0 w(t + \Delta\tau) + r_0^2 w(t + 2\Delta\tau) \quad (3)$$

公式(3)写成频率域为:

$$F(\omega) = W(\omega) + 2r_0 W(\omega) e^{i\omega\Delta\tau} + r_0^2 W(\omega) e^{i\omega 2\Delta\tau} = (1 + 2r_0 e^{i\omega\Delta\tau} + r_0^2 e^{i\omega 2\Delta\tau}) W(\omega) \quad (4)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为角频率。

令 $H(\omega) = 1 + 2r_0 e^{i\omega\Delta\tau} + r_0^2 e^{i\omega 2\Delta\tau}$, 则:

$$F(\omega) = H(\omega) W(\omega) \quad (5)$$

$$H^{-1}(\omega) = 1/H(\omega) = \frac{1}{1 + 2r_0 e^{i\omega\Delta\tau} + r_0^2 e^{i\omega 2\Delta\tau}} \quad (6)$$

对于常规海上拖缆地震记录, 不考虑噪声的情况下, 根据褶积模型可以写成:

$$s(t) = f(t) * r(t) \quad (7)$$

式中: $s(t)$ 为地震记录;

$r(t)$ 为地层反射系数序列。

结合公式(5)可以得到频率域的表达式为:

$$S(\omega) = F(\omega) R(\omega) = H(\omega) W(\omega) R(\omega) \quad (8)$$

因此, 压制鬼波就是需要求得滤波因子公式(6), 得到

$$S^*(\omega) = H^{-1}(\omega) S(\omega) = H^{-1}(\omega) H(\omega) W(\omega) R(\omega) = W(\omega) R(\omega) \quad (9)$$

上式即为源缆鬼波同时压制方法。

上述讨论的去鬼波的方程中, 鬼波相对于一次反射波的时间延迟没有将炮检距的影响考虑进去, 需要进一步完善; 如果考虑炮检距的影响, 可以采用后续的表达式求取相关鬼波的时间延迟。

设 O 点的深度为 h_m , 则一次反射波($s-o-r$)旅行时可以表述为:

$$t_{\text{prim}} = \frac{1}{v_m} \sqrt{(2h_m - h_s - h_r)^2 + x^2} \quad (10)$$

源鬼波($s-s'-o-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_s = \frac{1}{v_m} \sqrt{(2h_m + h_s - h_r)^2 + x^2} \quad (11)$$

缆鬼波($s-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_r = \frac{1}{v_m} \sqrt{(2h_m - h_s + h_r)^2 + x^2} \quad (12)$$

源缆鬼波($s-s'-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_{sr} = \frac{1}{v_m} \sqrt{(2h_m + h_s + h_r)^2 + x^2} \quad (13)$$

所以,

$\Delta\tau_s = t_s - t_{\text{prim}}$, $\Delta\tau_r = t_r - t_{\text{prim}}$, $\Delta\tau_{sr} = t_{sr} - t_{\text{prim}}$ 将这些参数代入(2)式, 就得到了考虑偏移距影响的含多类型鬼波的波场。鬼波压制算子 $H^{-1}(\omega) = 1/H(\omega)$ 可以表示为:

$$H^{-1}(\omega) = 1/H(\omega) = \frac{1}{1 + r_0 e^{i\omega\Delta\tau_s} + r_0 e^{i\omega\Delta\tau_r} + r_0^2 e^{i\omega\Delta\tau_{sr}}} \quad (\text{见注}) \quad (14)$$

结合(9)~(14)就是在考虑偏移距影响同时压

制多类型鬼波的解析表述。

1.2 τ - p 域鬼波延迟时间的求取

从式(10)~(13)中可以看出,延迟时间 $\Delta\tau_s$ 、 $\Delta\tau_r$ 、 $\Delta\tau_{sr}$ 等不仅随炮检距变化,还随深度变化,对于不同深度反射的鬼波延迟时间在相同偏移距上也发生变化,给实际数据处理带来不便,需要针对延迟时间的求取及方法实现进行探讨。基于鬼波延迟的 τ - p 域多类型鬼波同步压制方法中,鬼波延迟时间的求取是在 (τ, p) 域利用 τ - p 变换来完成的。

将(10)至(13)式改写成:

一次反射波($s-o-r$)旅行时可以表述为:

$$t_{\text{prim}} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_m^2}} \quad (15)$$

源鬼波($s-s'-o-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_s = \sqrt{t_{0s}^2 + \frac{x^2}{v_m^2}} \quad (16)$$

缆鬼波($s-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_r = \sqrt{t_{0r}^2 + \frac{x^2}{v_m^2}} \quad (17)$$

源缆鬼波($s-s'-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$t_{sr} = \sqrt{t_{0sr}^2 + \frac{x^2}{v_m^2}} \quad (18)$$

其中, $t_0 = \frac{2h_m - h_s - h_r}{v_m}$, $t_{0s} = \frac{2h_m + h_s - h_r}{v_m}$, $t_{0r} = \frac{2h_m - h_s + h_r}{v_m}$, $t_{0sr} = \frac{2h_m + h_s + h_r}{v_m}$

设 (t, x) 域中的二维信号为 $\varphi(t, x)$, 转换到 (τ, p) 域后的二维信号为 $\psi(\tau, p)$, 则有 τ - p 正反变换关系式如下:

$$\begin{aligned} \text{正变换: } \psi(\tau, p) &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t, x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau + px, x) dx \\ t &= \tau + px \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{反变换: } \varphi(t, x) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} H^+[\psi(\tau, p)] dp \\ &= \frac{-1}{2\pi} \frac{d}{dt} H \left[\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t - px, p) dp \right] \\ \tau &= t - px \end{aligned} \quad (20)$$

式中: H^+ 表示对函数 $\psi(\tau, p)$ 的希尔伯特变换。

根据 τ - p 变换特性知道, (t, x) 域中的一段双曲线, 经 τ - p 变换到 (τ, p) 域后成为了一段椭圆弧。在 (t, x) 域中时距曲线方程 $t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_m^2}}$, 在 (τ, p) 域中变成了:

$$\tau = t_0 \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \quad (21)$$

(τ, p) 域中有:

一次反射波($s-o-r$)旅行时可以表述为:

$$\tau = t_0 \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \quad (22)$$

源鬼波($s-s'-o-r$)的旅行时可以表述为:

$$\tau_s = t_{0s} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \quad (23)$$

缆鬼波($s-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$\tau_r = t_{0r} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \quad (24)$$

源缆鬼波($s-s'-o-r'-r$)的旅行时可以表述为:

$$\tau_{sr} = t_{0sr} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \quad (25)$$

故对于某个 p , 各类鬼波延迟时间为:

$$\begin{aligned} \text{源鬼波延迟时间: } \Delta\tau_s &= (t_{0s} - t_0) \sqrt{1 - v_m^2 p^2} = \\ &= 2 \frac{h_s}{v_m} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{缆鬼波延迟时间: } \Delta\tau_r &= (t_{0r} - t_0) \sqrt{1 - v_m^2 p^2} = \\ &= 2 \frac{h_r}{v_m} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{源缆鬼波延迟时间: } \Delta\tau_{sr} &= \\ (t_{0sr} - t_0) \sqrt{1 - v_m^2 p^2} &= 2 \frac{h_s + h_r}{v_m} \sqrt{1 - v_m^2 p^2} \end{aligned} \quad (28)$$

注: 在式(6)及式(14)中, 对于海底反射系数及鬼波延迟时确定后, 该表达式的分母随频率的变化关系就确定了。于是就有分母存在零值点的可能性; 以式(6)为基础讨论, $H^{-1}(\omega) = \frac{1}{a + ib}$ 式中, a 为频谱的实部, b 为频谱的虚部, 对该式分子分母同乘 $(a - ib)H^{-1}(\omega) = \frac{1}{a + ib}$ 就变成了 $H^{-1}(\omega) = \frac{a - ib}{a^2 + b^2}$ 。利用欧拉公式 $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ 将式(6)的分母中相关项展开, 可以得到该式中的 $a = 1 + 2r_0 \cos(\omega\tau) + r_0^2 \cos(2\omega\tau)$, $b = 2r_0 \sin(\omega\tau) + r_0^2 \sin(2\omega\tau)$ 当海面反射系数 r_0 的取值范围 $-1 < r_0 \leq 0$ 时 $a^2 + b^2$ 就没有零值。

假设在地层中, 鬼波与一次波经历路径偏差较小(地层越深, 这个假设越成立), 计算鬼波延迟时间所用的速度 v_m 可以用海水速度 v_w 替代。这样, 对于同一个参数 p 延迟时间就不受形成一次反射的地层深度参数的影响了。

1.3 处理步骤

鬼波延迟随偏移距变化时鬼波压制技术的处

理步骤为: ①对地震数据进行噪声压制等预处理, 海底反射以上的干扰切除掉; ②对数据进行线性 τ - p 变换; ③在 (τ, p) 域对每一个 p 进行傅里叶变换; ④利用(26)~(28)式, 结合(9)式、(14)式在 (τ, p) 域压制鬼波; ⑤对压制鬼波后的数据进行反傅里叶变换; ⑥对反傅里叶变换后数据进行反 τ - p 变换, 得到压制鬼波后的地震数据。

2 模型试算验证

为了验证方法, 设计了一个两层模型, 激发子

波为最小相位且与海洋激发起跳相同, 海面反射系数取为-1, 源水深 6 m, 缆水深 12 m, 综合地震子波就是激发子波、源鬼波、缆鬼波、源缆鬼波的延迟求和(图 2a), 利用综合地震子波与模型褶积形成含有地层反射及鬼波的单炮记录(图 2b)。

图 3 为现有商业软件分步压制鬼波的处理过程及压制效果, 对比可见, 无论是压制缆鬼波(图 3a), 还是压制源鬼波(图 3b), 都会对源缆鬼波有所压制, 当经源鬼波和缆鬼波压制处理后, 源缆鬼波也较好地被压制(图 3c), 但放大后还是能看出源缆鬼波有部分残余。

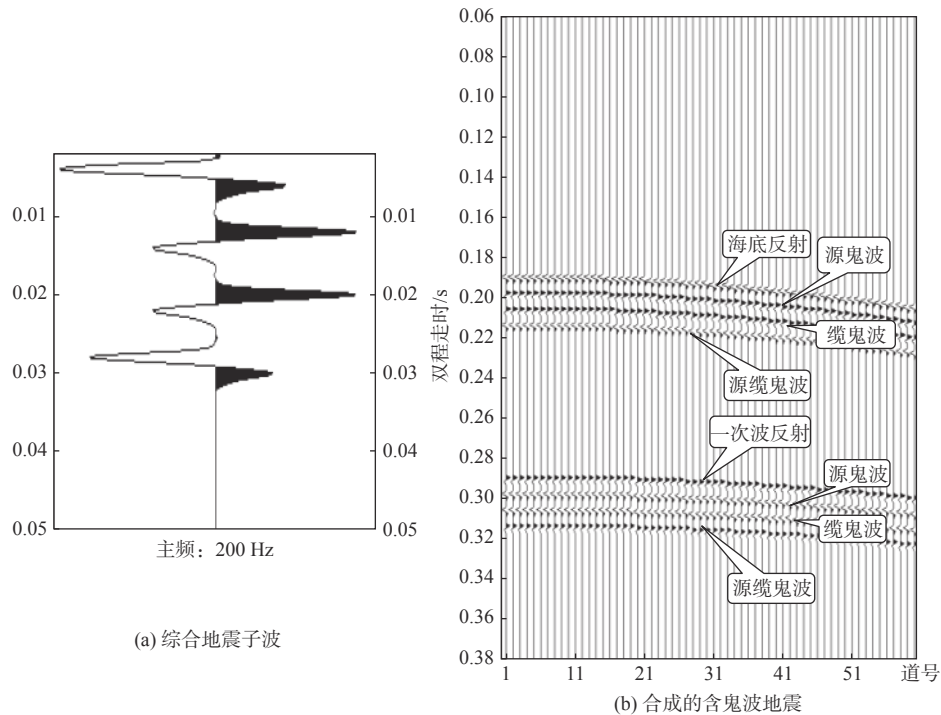


图 2 综合地震子波及两层模型的地震记录

Fig.2 Seismic records of synthetic seismic wavelet and two-layer model

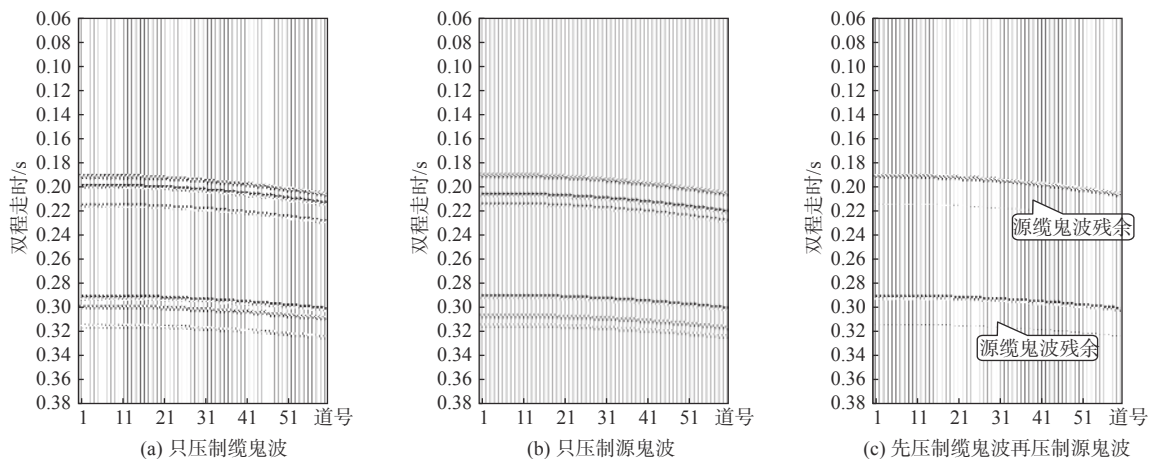


图 3 现有商业软件分步压制鬼波的处理过程及压制效果

Fig.3 Processing process and suppression effect of existing commercial software in step-by-step suppressing ghost wave

图 4 为现有商业软件压制鬼波与本文技术压制鬼波的效果对比,从中可以看出,本文技术压制

鬼波效果好于现有商业软件压制鬼波技术,源缆鬼波残余少得多。

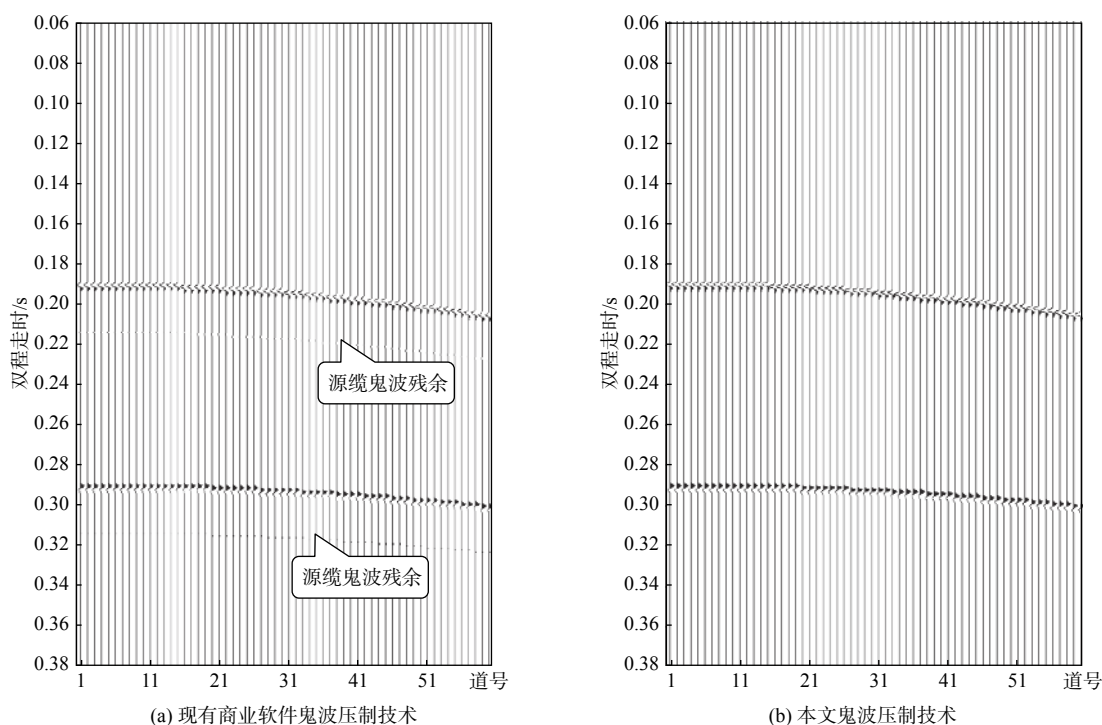
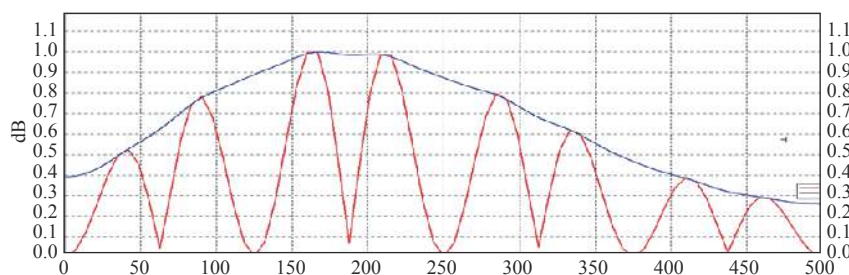


图 4 不同鬼波压制技术压制鬼波后的单炮记录对比

Fig.4 Comparison of shot records after ghost wave suppression with different ghost wave suppression techniques

图 5 为本文技术压制鬼波前后的频谱对比,可见,在压制鬼波前频谱中受鬼波陷波影响频段的能

量部分(红色)得到了较好的恢复(蓝色)。



源深引起 0、125、250、375、500 Hz 陷频, 缆深引起 0、62.5、125、187.5、250、312.5、375、437.5、500 Hz 陷频, 综合表现 0、125、250、375、500 Hz 被两次陷波。当鬼波延迟造成一次波、鬼波同相轴干涉时, 限波频率点更复杂。

图 5 本文技术模型数据去鬼波前(红)后(蓝)的频谱对比

Fig.5 Comparison of spectrum before (red) and after (blue) ghost wave suppression of modelling data using the technique presented in this paper

3 应用实例

在实际采集的海洋数据中,如果海底附近没有强反射层、或强反射层距海底较远,通过肉眼可以在偏移距较小道上观察到鬼波:当源、缆深度相同时,源、缆鬼波时间上重叠、极性相同,表现为鬼波振幅强于一次反射,鬼波极性与一次波极性相反,

而源缆鬼波振幅弱于一次反射,极性与一次反射相同;当源、缆深度不同时,源、缆鬼波时间上分开、极性相同,表现出鬼波振幅弱于一次反射,鬼波极性与一次波极性相反,而源缆鬼波振幅弱于一次反射及源、缆鬼波,极性与一次反射相同。在海底附近有强反射层、或偏移距较大的范围、或海水较浅,反射波与鬼波互相干涉时,破坏有效反射的振幅能量关系,也不易观察鬼波。

海洋地震勘探数据由浅入深, 每个地震反射波都跟随着鬼波, 在现在常用的 6~8 m 源深及缆深施工参数情况下, 通过观察可以看到, 在入射角接近 20° 时, 鬼波与一次波就开始出现严重的干涉现象; 如果数据 2/3 的有效偏移距的等效入射角 $> 20^\circ$, 进行压制鬼波处理时, 建议采用考虑了偏移距对鬼波延迟时影响的相关鬼波压制技术及软件。在有条件的情况下, 压制鬼波时, 尽量把偏移距对鬼波延迟时的影响考虑进去, 可以求取更准确的鬼波延迟时, 提高鬼波预测精度及改善压制鬼波的效果。自适应压制鬼波技术, 在鬼波与一次反射清楚分开时, 鬼波能被很好压制; 但在鬼波与一次反射波干涉严重的偏移距范围内, 就不能很好地压制鬼波。

图 6a 为某海洋高分辨率地震勘探资料的单炮记录, 在一定的偏移距范围内能比较清楚地看到 2 组鬼波, 也可以看出鬼波的延迟时是随偏移距变化的, 第 1 组鬼波在偏移距大于约 850 m (红线位置) 时就与一次反射产生严重干涉, 而第 2 组鬼波在偏移距大于约 950 m (黑线位置) 时与一次波产生严重干涉。鬼波与一次反射产生严重干涉的偏移距的范围跟源、缆的深度、地震子波的主频及产生一次反射的反射层深度正相关。图 6b 为采用本文技术对图 6a 记录进行鬼波压制处理后的单炮记录, 图 6a 中肉眼可见的鬼波被较好地压制, 被鬼波干涉影响的一次波能量得以恢复, 同相轴能量横向变化没有突变现象存在。

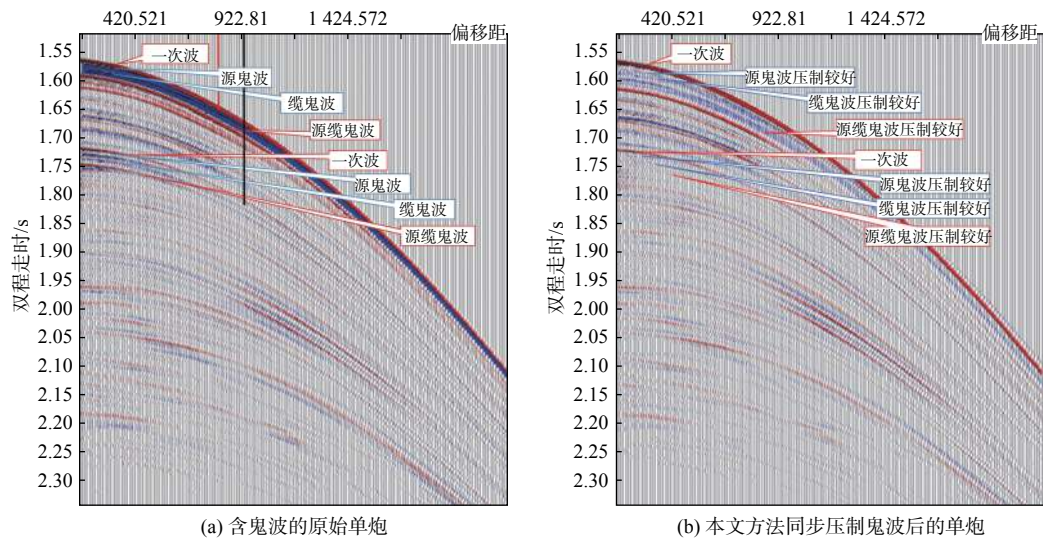


图 6 实际地震数据采用本文技术压制鬼波前后的单炮记录对比

Fig.6 Comparison of actual seismic data shot records before and after ghost wave suppression using the technique presented in this paper

图 7 为实际地震数据采用本文技术压制鬼波前后的单炮记录局部放大对比。可见, 源鬼波、缆鬼波以及源缆鬼波均得到了较好地压制, 有效反射得到了凸显 (图 7b)。

图 8 为采用本文技术压制鬼波前后的叠加剖面对比, 可见, 经过压制鬼波后 (图 8b), 各类鬼波得到了很好的压制, 被鬼波干涉的有效反射信号得以凸显, 波组特征突出, 层次清楚, 纵横向波组关系清晰。

图 9 为采用本文技术压制鬼波前后的频谱对比, 可见, 在压制鬼波前频谱中受鬼波陷波影响频段的能量部分 (红色) 得到了较好的恢复 (蓝色)。

4 结论

(1) 鬼波的延迟时间是随偏移距变化的, 大大

增加了地震数据鬼波压制处理的难度。如果仅利用源、缆深度简单计算零偏移距对应的鬼波延迟时间来压制鬼波, 只能在小偏移距范围有较好的效果, 故要想获得更好的鬼波压制效果, 应在鬼波延迟时间的求取中充分考虑偏移距变化的影响。

(2) 源鬼波、缆鬼波及源缆鬼波同步压制方法的效果要优于仅对源鬼波和缆鬼波进行同步压制的方法, 也优于分步压制鬼波的方法。

(3) 自适应鬼波压制技术的效果对输入数据品质的依赖性很大。在鬼波与一次波干涉不严重、明显分开情况下, 该技术能取得较好的压制效果; 在鬼波与一次波干涉较严重情况下, 该技术有可能会造成有效波的振幅失真, 应谨慎使用。

(4) 海洋地震数据中, 由浅入深, 每个地震反射波都跟随着鬼波。鬼波与一次反射产生严重干涉

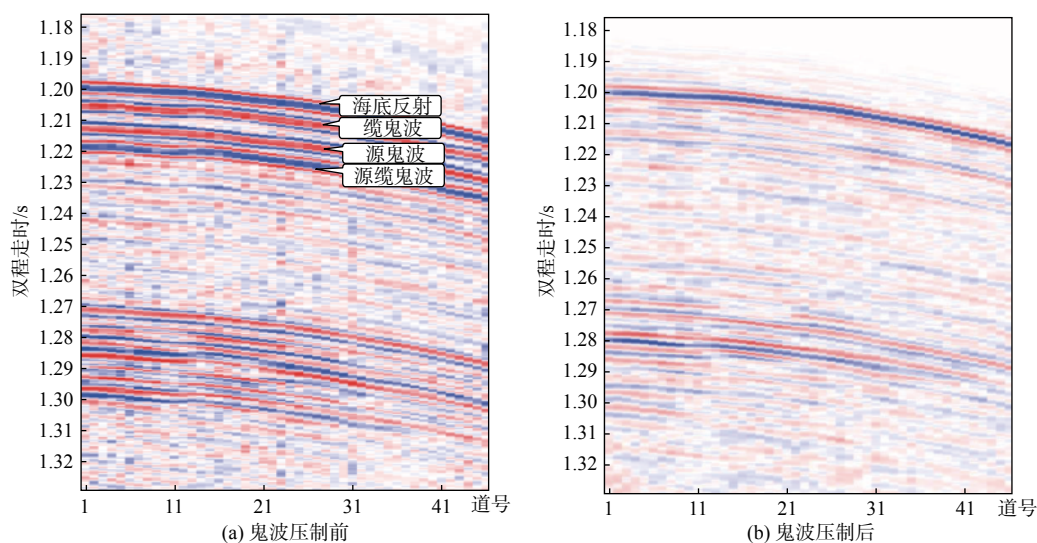


图 7 局部放大的实际地震数据压制鬼波前后的单炮记录对比

Fig.7 Comparison of actual seismic data shot records before and after ghost wave suppression using the technique presented in this paper by local amplification

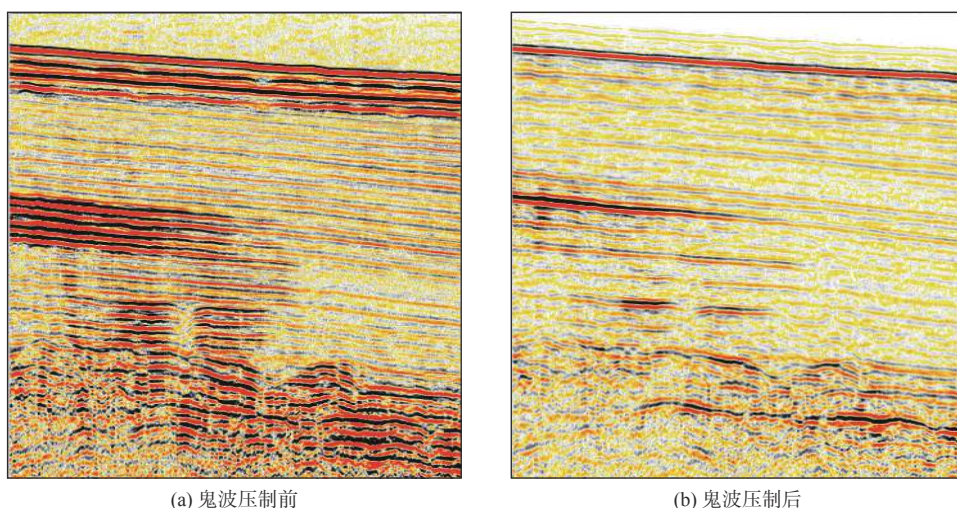


图 8 采用本文技术压制鬼波前后的叠加剖面对比

Fig.8 Comparison of stacked section before and after ghost wave suppression using the technique presented in this paper

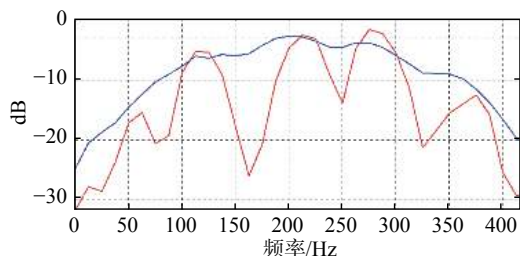


图 9 采用本文技术实际数据压制鬼波前 (红色) 后 (蓝色) 的频谱对比

Fig.9 Comparison of spectrum before (red) and after (blue) ghost wave suppression of actual data using the technique presented in this paper

的偏移距范围与源的深度、缆的深度、地震子波的主频及产生一次反射的反射层深度正相关;在目前常用的 6~8 m 源深及缆深施工参数情况下,如果

数据 2/3 的有效偏移距的等效入射角 $> 20^\circ$, 进行鬼波压制处理时,建议采用考虑了偏移距对延迟时影响的相关鬼波压制技术及软件。

(5)在源深、缆深确定后,在 $\tau-p$ 域相应 p 道上的源鬼波、缆鬼波及源缆鬼波延迟时可以直接计算,鬼波压制算子(式 (14))是确定的,不受输入地震道数据品质影响。在有条件的情况下,压制鬼波时,把偏移距对鬼波延迟时的影响考虑进去,可以求取更准确的鬼波延迟时,提高鬼波预测精度及改善压制鬼波的效果,恢复被鬼波干涉的有效波能量变化关系,使得有效波得到凸显,波组特征更清楚。

参考文献:

- [1] 刘建磊,王修田.海上地震虚反射相位剔除法反褶积[J].海洋

- 地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 117-121.
- [2] 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.
- [3] 李洪建, 韩立国, 巩向博, 等. 基于格林函数理论的波场预测和鬼波压制方法[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(3): 1113-1124.
- [4] 杨金龙, WEGLEIN A 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.
- [5] 陈宝书, 陶杰, 李松康, 等. 基于确定性子波处理的鬼波压制方法[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(1): 39-45.
- [6] 马继涛, 王艳冬, 陈小宏, 等. 基于波场外推和阈值截断的鬼波压制方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(2): 227-235.
- [7] 曹露青, 胡天跃. 利用伪速度方法压制浅海鬼波[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(5): 1003-1009.
- [8] 徐鹏, 刘亚辉, 王华忠. 编码与解码框架下的局部平面波域浅水多次波压制方法[J]. *石油物探*, 2019, 58(3): 346-355.
- [9] 陈宝书, 吴玉, 陶杰, 等. 基于几何级数展开的鬼波压制方法[J]. *应用声学*, 2020, 39(1): 29-35.
- [10] WANG P, PENG C. Premigration deghosting for marine towed streamer data using a bootstrap approach[C]//82th SEG Meeting, 2012: 1-5.
- [11] ZHANG Z G, JI J, WANG B. Joint deconvolution with hybrid norm and its applications to flat cable images and premigration data[C]//83th SEG Meeting, 2013: 4241-4245.
- [12] MASOOMZADEH H, WOODBURN N. Broadband processing of conventional streamer data-optimized de-ghosting in the tau-p domain[C]//Extended Abstracts of 75th EAGE Conference&Exhibition, 2013.
- [13] ZHANG X Y, PAN D M, SHI W Y, et al. Deghosting towed streamer data in τ - p domain based on rough sea surface reflectivity[J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12(4): 573-584.
- [14] 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.
- [15] 王艳冬, 王建花, 王小六, 等. 一种基于 τ - p 域自适应的平缆鬼波压制方法[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(6): 71-79.
- [16] SUN W B, ZHANG J M, ZHU Z Y, et al. Application of RTM with deghosting on deepwater seismic data[C]//86th SEG Meeting, 2016: 4409-4413.
- [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.
- [18] 王艳冬, 王建花, 王小六, 等. 一种基于波动方程迭代反演的平缆鬼波压制新方法[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(1): 74-80.
- [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.

RESEARCH ON GHOST SUPPRESSION TECHNOLOGY WHEN GHOST DELAY CHANGES WITH OFFSET

ZHOU Fan¹, ZHOU Yunhe², JIANG Fan¹, HE Yueming², YANG Zaichao^{2*}

(1 Hainan Branch of CNOOC (China) Ltd., Haikou 570000, China;

2 Beijing Oriental Union Geophysical Technology Co. Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: Due to the influence of ghost reflection (ghost wave), the imaging resolution of offshore horizontal streamer seismic data is reduced, which directly affects the accuracy and precision of seismic data interpretation in the description of offshore oil and gas reservoirs. The existing ghost suppression methods usually treat the source and cable ghost waves separately, and do not consider the effect of offset on the ghost wave delay. This paper presents a technique to suppress ghost wave from source, cable and source-cable simultaneously when the delay of ghost wave varies with offset. The experimental results of theoretical model and real data processing show that the proposed method is stable and can effectively suppress the ghost wave in offshore horizontal streamer seismic data, recover the energy of the frequency band affected by the ghost wave notch, and improve the quality of imaging data.

Key words: offshore exploration; horizontal streamer; delay of ghost wave varies with offset; synchronization to suppress; source-cable ghost wave