

东海多道地震虚反射压制技术探讨

蒋陶^{1,2,3,4}, 颜中辉^{2,3,4}, 赵倩¹, 方刚^{2,3,4}

(1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;

2 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

3 海洋国家实验室海洋油气资源与探测技术功能实验室, 青岛 266071;

4 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:在海洋地震勘探中产生的虚反射和一次反射波的波形是一样的,很大程度上会抑制低频分量,造成频域的陷波点,降低地震记录的分辨率,使地震记录的同相轴发生混叠甚至产生假的同相轴。在已知检波器深度和海水速度的情况下,在 $F-K$ 域中,先分选至炮域压制检波点虚反射,再分选至检波点域压制炮点虚反射,在叠加剖面上,虚反射得到了明显压制。在虚反射压制后的频谱上,陷波得到了恢复,频带得到了明显拓宽,为后续地震反演提供了高品质的地震资料。

关键词: $F-K$ 域;陷波;虚反射;东海

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.04010

在海洋上进行地震勘探时,炮点和检波器沉放在海面以下,而海面又是一个很强的反射面。检波器在接收到一次反射波的同时还会接收到一次波在海面反射回来的波,通常称这种在海面发生了反射的波为鬼波(虚反射)。在陆地上也有类似的情况,当炮点被埋放在低速带或潜水面以下来激发地震波时,因为潜水面和低速带底界面也是强反射面,检波器同样会接收到经过它们反射回来的虚反射。

从地震记录上看,虚反射同相轴与一次波同相轴混合在一起,很难把它们区分开,这对后续的解释工作是不利的。另外,由于虚反射的影响,地震资料的某些频率值处会出现能量缺失,这就导致了地震资料的频谱上出现了零值点,这些零值

点就称为陷波点,而且陷波点在频谱上是呈周期性多次出现的。这些陷波点的存在,限制了地震资料有效频带的宽度,损失了一部分有意义的低频信息和高频信息,特别是一部分对于较深地质体成像非常有意义的低频信息。

随着勘探的目标越来越复杂,对于储层预测的要求也越来越高,需要地震资料既具备较好的高频成分,同时也具备较好的低频成分。为了实现这一目标,就要求采集到的原始地震资料具有足够宽的频带宽度。而在如今的高精度、高分辨率地震处理解释中,如全波形反演、谱分析技术等也都需要丰富的低频信息,因此,压制虚反射、拓宽频带和提高深层能量是海洋地球物理勘探的处理重点与难点。因此,有必要寻找一种行之有效的方法来消除地震资料中的虚反射。近年来,虚反射压制的重要性越来越突出,已成为地震资料处理的关键技术^[1-3],前人开发了基于波动方程的虚反射压制方法^[4]及基于格林函数理论检波点虚反射压制方法^[5]等,都取得了很好的应用效果。

收稿日期:2016-12-30

基金项目: 山东省自然科学基金培养基金项目(ZR2015PD006);行业基金项目(201511037);中国地质调查局项目(DD20160153)

作者简介: 蒋陶(1993—),男,在读硕士,主要从事海洋勘探与地震处理方面的研究工作. E-mail:377430987@qq.com

1 东海地震地质条件

我国东海是属于面积较大且具较宽大陆架的边缘海,面积约为 77 万 km^2 ,东北至西南向的长度约为 1 300 km,东西宽度约为 740 km,水深平均是 349 m。自西向东为浙闽隆起、东海陆架盆地、冲绳海槽、琉球岛弧和琉球海沟、菲律宾海。东海是环太平洋构造活动带的重要组成部分,是西太平洋边缘海构造活动、形成演化的重要窗口^[6]。

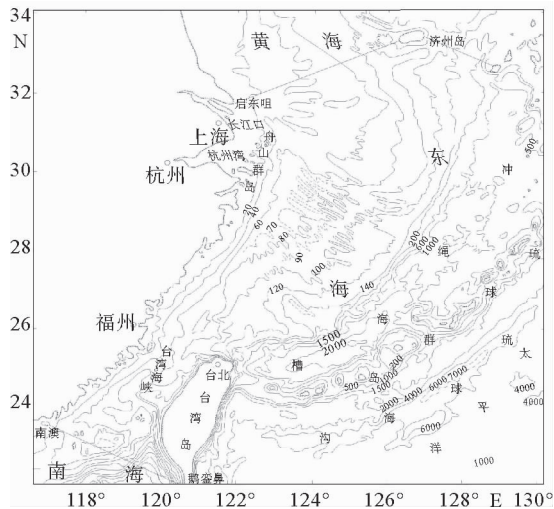


图 1 调查区及邻域水深地形图(据文献[7])

Fig. 1 Bathymetric chart of the research area and adjacent regions (from reference [7])

大陆架水深多在 100 m 以上,大陆架外缘为大陆坡,是大陆架向冲绳海槽过渡的地带,平均宽度约 35 km,地形北缓南陡。陆坡上发育有众多的断裂沟、断裂谷、陡崖、地垒、隆脊、海台、海底峡谷等构造地貌。海底峡谷垂直于陆坡走向展布,有的向陆架方向切穿外陆架,向海方向可达海槽底部^[8]。海底峡谷主要分布于中段和南段的东海陆坡之上,平面形态特征总体上自北向南趋于复杂(直线型—蛇曲型—树枝型),规模逐渐增大,不同的平面类型代表了峡谷不同的演化阶段。峡谷的分布格局和变化趋势主要受控于冲绳海槽扩张背景下的构造活动^[9]。

海上采集的多道数据往往存在比较严重的虚反射干扰,尤其是浅水海域。虚反射的存在会降

低地震资料的信噪比和分辨率,使得资料的质量变差,这样会影响地震剖面的最终形态,无法清晰地反映地下的地质构造,因此,获取东海的地震剖面,认清东海的地质构造,压制虚反射是地震资料处理中不可或缺的一部分。

2 虚反射的产生和特性

无论是陆上还是海上地震勘探,地震虚反射的干扰是不可避免的。这是因为震源激发在地下和海水面以下的缘故^[10]。海上地震勘探中,海面是空气和水层的分界面,由于空气和水的波阻抗相差很大,使得海面成为一个强反射界面,反射系数近似为-1。这样,震源激发时产生的地震波或者由地下界面反射回来的地震波传播到海面时,就会在海面发生反射(图 2),相位也会发生反转,即由正相位变为负相位,或者由负相位变为正相位。这个被海面反射回来的地震波被称为虚反射,它紧紧跟在一次波之后传播,相对于一次波有一个时间延迟,这就给一次波增加了一个“尾巴”,在地震记录上表现为紧紧跟在一次波同相轴之后的一条同相轴^[13]。

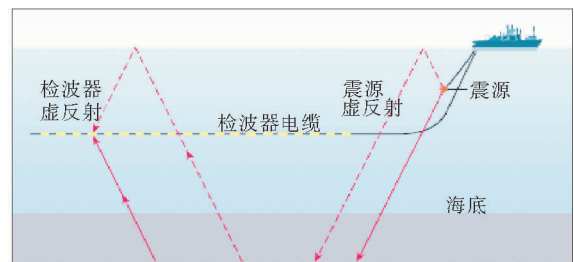


图 2 海上采集示意图

Fig. 2 A view of offshore data acquisition

虚反射的类型有 3 种(图 3):

① 炮点虚反射

当气枪激发,地震波往地下传播的同时也往上传播,达到水面,产生反射。该反射称为激发虚反射。激发虚反射将与气枪直接产生的地震波迭加在一起,作为入射波向地下传播。

② 接收点虚反射

从地下反射回来的反射波,有一种反射波继续传播到水面,再反射到检波器,称为接收虚反射。

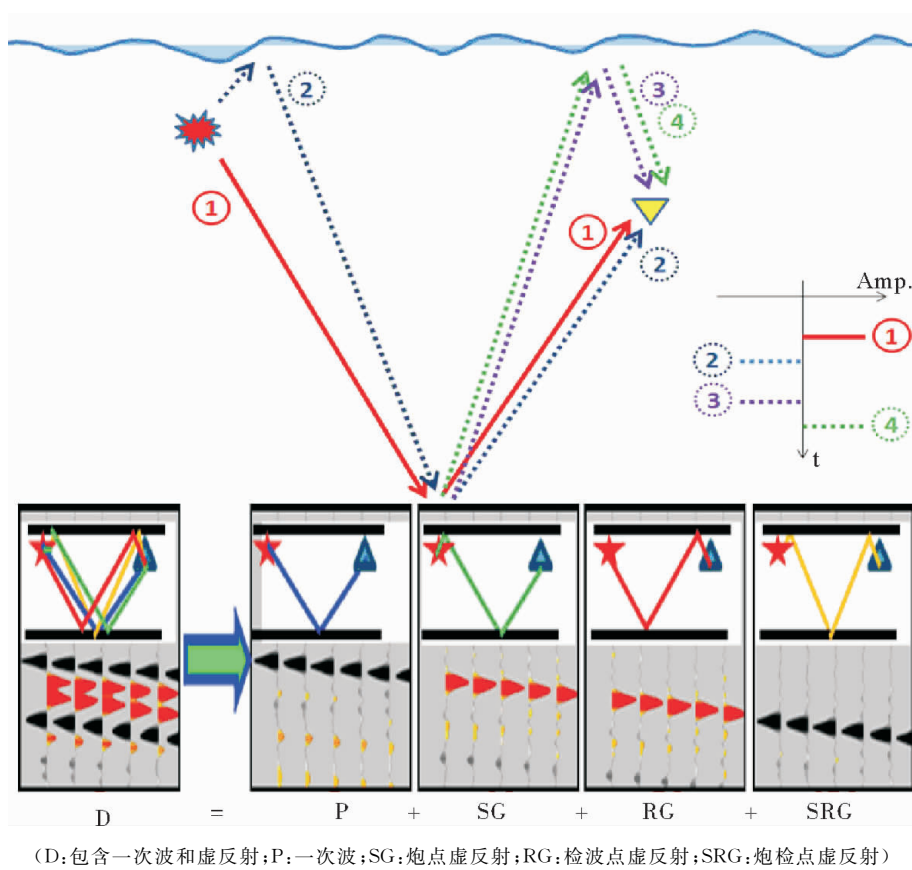


图 3 虚反射传播路径及子波

Fig. 3 Ghost propagation path and wavelet

③ 炮检点虚反射

激发和接收同时共同产生的虚反射,称为炮检点虚反射^[11]。

虚反射有 3 个显著的特点:①因为海水面的反射系数近似等于-1,虚反射和一次反射波极性正好相反;②虚反射比一次反射波晚一段时间 τ , τ 与震源深度或电缆和海水的速度有关, τ 值往往是比较小的,因而会造成虚反射迭加在一次反射波的后部,增大了反射子波的延续时间,降低了记录的分辨能力;③虚反射在频谱上表现为陷波现象^[11](图 4)。

陷波点出现的位置在频率 fn ,公式如下:

$$fn = c/2d$$

式中: fn 为陷波频率;

c 为地震波在海水中的传播速度,一般为 1 500 m/s;

d 为激发点或接收点的沉放深度,m。

虚反射和一次反射波的波形是一样的,这 2

种波混叠在一起,造成频域的陷波点,并抑制低频分量,降低地震记录的有效频带。

3 虚反射压制技术

从虚反射特性分析可以看出(图 4),虚反射是影响地震信号频带宽度的非常重要的因素,虚反射压制技术的应用能够消除陷波点的影响,从而使得陷波能量得到补偿,恢复原始信号的频谱,其压制原理是在当检波器深度和海水速度已知的情況下,在 $F-K$ 域用如下算子压制虚反射:

$$G(F, K) = 1 + R^* e^{-\frac{2iz}{c} \sqrt{F^2 - c^2 K^2}}$$

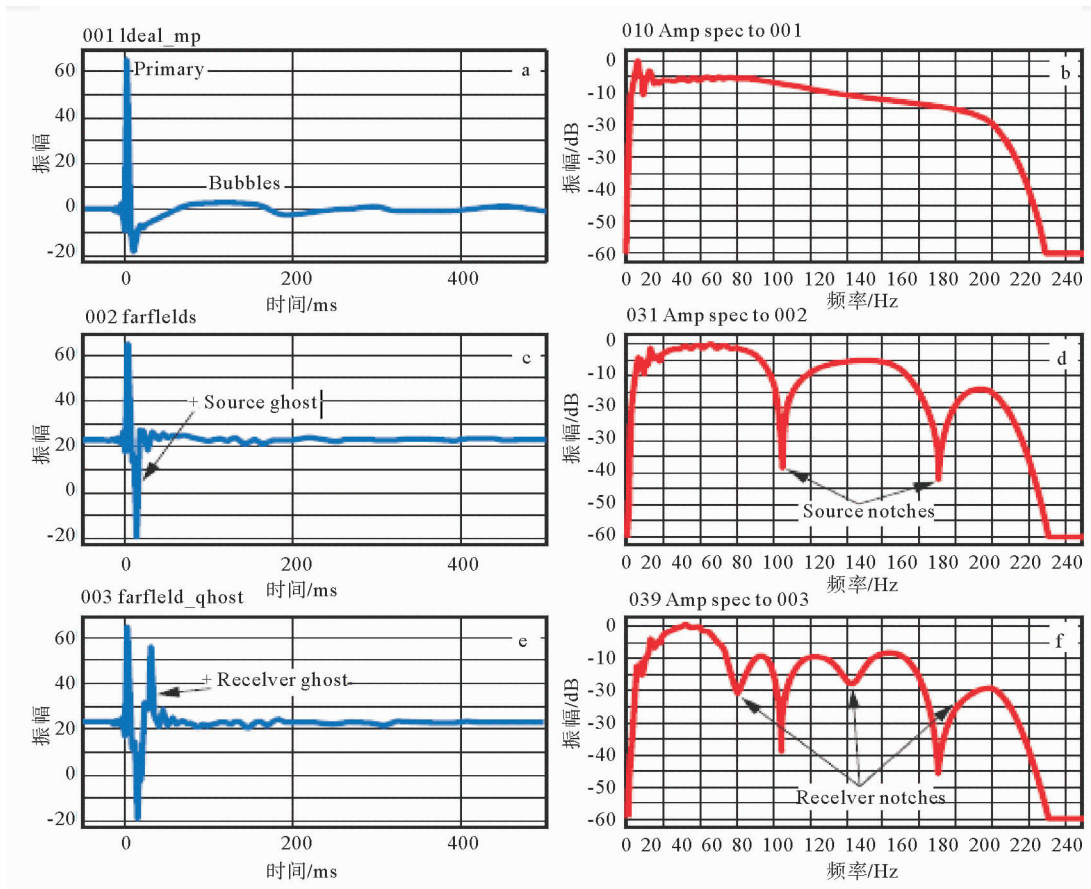
式中: R 为自由界面的反射系数;

c 为海水速度,一般取值为 1 500 m/s;

z 为震源(或接收器)水深,m;

F 和 K 分别为数据的频率和波数。

图 5 为本次压制虚反射所采用的处理流程。



a,b:不包含虚反射;c,d:包含炮点虚反射;e,f:包含炮检点虚反射

图 4 子波和频谱

Fig. 4 Wavelet and Spectrum

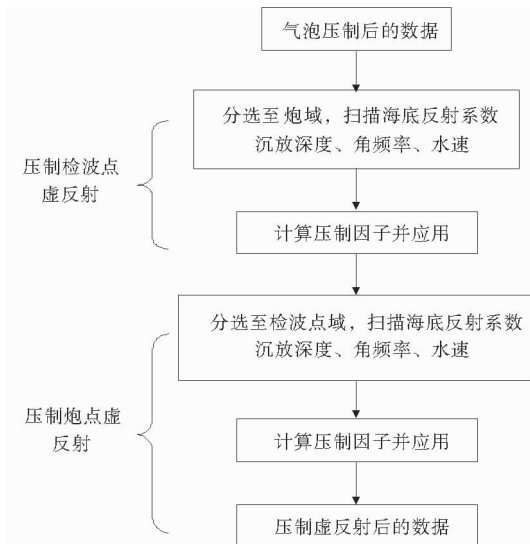


图 5 虚反射压制实现流程

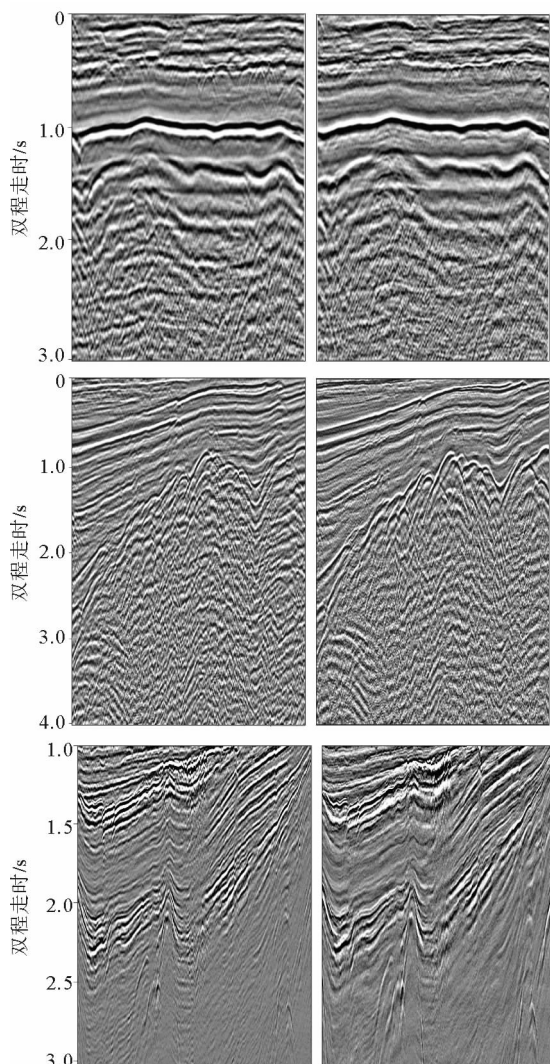
Fig. 5 Deghost process

4 实际资料的应用

由图 6 可以看出,在没有做压制虚反射前,虚反射紧随着有效波,且能量较强,但是不存在周期性,延迟时间只与震源与检波点的沉放深度有关。在频谱上虚反射表现为多个陷波点,且频带变窄,地震资料品质较差。

使用该流程对东海 TW1209、TWB4、TWB6 3 条测线做压制虚反射处理,并对其中一条测线做频谱分析。

图 6 为本次处理进行虚反射压制前后的叠加剖面,通过对比可以看到浅层虚反射得到明显压制,同相轴减小,波组关系更加清晰,能量也得到了加强。



上:TW1209;中:TWB4;下:TWB6

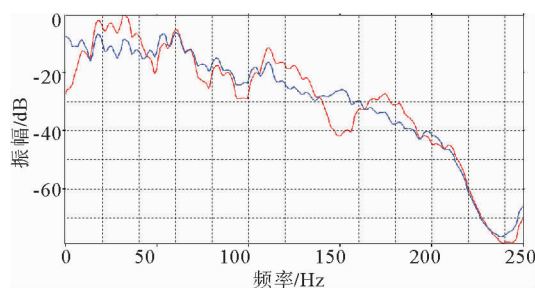
图6 虚反射压制前(左)后(右)的叠加剖面

Fig. 6 Stack before deghosted (left), and after deghosted gather (right)

图7为虚反射压制前后的频谱,可以看到,虚反射压制后,陷波得到了恢复,频带得到了明显拓宽,尤其低频信息得到了明显提升,低频信息的提升为后续地震反演和解释提供了高品质的地震资料。

5 结论

虚反射是在海上地震勘探中的一种非常强的干扰波,它紧紧跟在一次波之后传播,也会被拖缆中的检波器接收到。从地震记录上看,虚反射同



红色:压制前频谱;蓝色:压制后频谱

图7 虚反射压制前后频谱

Fig. 7 Spectrum before and after deghosting

相轴与一次波同相轴混合在一起,很难把它们区分开,这对后续的解释工作是不利的。另外,由于虚反射的影响,地震资料的频谱上周期性出现了一系列陷波点,而陷波点的出现是导致数据频谱范围变窄,即有效信号在低频端和高端能量缺失,限制了有效频带的宽度,损失了一部分有意义的低频和高端信息,特别是一部分对于较深地质体成像非常有意义的低频信息。鉴于上述原因,消除地震资料中的虚反射是非常有必要的。

在已知检波器深度和海水速度的情况下,在 $F-K$ 域中,先分选至炮域压制检波点虚反射,再分选至检波点域压制炮点虚反射;在压制虚反射后的叠加剖面上,虚反射得到了明显压制,波组关系更加清晰。在虚反射压制前后的频谱,也可以看到,虚反射压制后,陷波得到了恢复,频带得到了明显拓宽,尤其是低频信息得到了明显提升,低频信息的提升为后续地震反演提供了高品质的地震资料。

致谢:对参与东海多道地震采集的全体工作人员表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 钟明睿,朱江梅,杨薇,等. 震源及电缆沉放深度对海上地震资料的影响[J]. 物探与化探, 2012, 36(1):78-83.
- [2] 史文英,方中于,李列,等. 海底电缆陆检噪音衰减方法及其在乌石地区的应用[J]. 世界地质, 2015, 34(2):516-523.
- [3] 郝振江,冯飞,王德利,等. Curvelet域海底电缆多次波压制方法研究[J]. 世界地质, 2013, 32(1):130-136.
- [4] 管西竹,陈宝书,符力耘,等. 基于波动方程的上下缆地震数据鬼波压制方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58

- (10):3746-3757.
- [5] 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.
- [6] 孟祥君. 东海磁性基底反演及其构造意义研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2006.
- [7] 杨文达, 崔征科, 张异彪. 东海地质与矿产[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [8] 刘忠臣. 中国近海及邻近海域地形地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [9] 赵月霞, 刘保华, 李西双, 等. 东海陆坡不同类型海底峡谷的分布构造响应[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(4):460-468.
- [10] 陈金海, 王桂华, 徐新南. 海上地震虚反射探讨[J]. 海洋石油, 2000(1):23-27.
- [11] 钟明睿, 刘金朋, 王兴芝, 等. 宽频地震处理技术在南海某工区的应用[J]. 世界地质, 2016, 35(3):873-880.
- [12] 丁洪波. 海上地震资料鬼波机理与消除方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013.
- [13] 陈金海, 周国良. 虚反射和海水鸣震干扰的消除[J]. 海洋石油, 2000(3):34-42.
- [14] 王旭谦. F-K域波场延拓法技术在海上上下缆数据去鬼波处理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5):591-596.
- [15] 郑红波, 阎贫, 金丹. 莺歌海盆地 OBC 多分量地震虚反射和鸣震压制及其效果分析[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3):23-27.
- [16] Özdemir A K, Ozbek A, Caprioli P. Optimized deghosting of over/under towed-streamer data in the presence of noise[J]. Leading Edge, 2008, 27(2):190-199.
- [17] Gratacos B. Over-under deghosting: 1D, 2D or 3D algorithms in the F, FK or FXY domains[C]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2008: 125-129.
- [18] 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.
- [19] 程玉坤, 曹孟起, 冉建斌, 等. 海底电缆双检接收资料的几种处理方法及应用效果[J]. 天然气工业, 2007(s1):92-95.
- [20] Whitmore N D, Valenciano A A, Sollner W. Imaging of primaries and multiples using a dual-sensor towed streamer[C]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 3187-3192.
- [21] Carlson D, Long A, Söllner W, et al. Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer[J]. First Break, 2007, 25(12):71-77.
- [22] 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.
- [23] 卢志君. 海底电缆双检鸣震压制技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

DISCUSSION ON DEGHOST FOR MULTI-CHANNEL SEISMIC SURVEY IN THE EAST OF CHINA SEA

JIANG Tao^{1,2,3,4}, YAN Zhonghui^{2,3,4}, ZHAO Qian¹, FANG Gang^{2,3,4}

(1 School of Geoscience, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource & Environment Geology, MLR, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao 266071, China; 4 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: In offshore seismic survey, the waveform of a ghost looks same as the reflected wave. The ghost may heavily suppress the low-frequency components and result in the notching in frequency domain, and thus reducing the resolution of seismic records and resulting in the event aliasing or false events. In order to improve the quality of seismic data, we put forward in this paper a method as the following. As the depth of seismic receiver and water velocity are known, in the $F-K$ domain, we eliminate the resource ghost in the receiver domain first, and then eliminate the receiver ghost in the shot-point domain. Afterwards, in the spectrum, the notching is restored and the frequency band is widened, which provides high quality seismic data for the subsequent seismic inversion.

Key words: $F-K$ domain; notching; deghost; East of China Sea