



基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

王小杰, 颜中辉, 刘俊, 刘欣欣, 杨佳佳

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

WANG Xiaojie, YAN Zhonghui, LIU Jun, LIU Xinxin, and YANG Jiajia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020101202>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅水多次波衰减技术在多道地震数据处理中的应用

Application of attenuation technology to shallow water multiples in multi-channel seismic data processing

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 167

南黄海崂山隆起浅水多次波压制及成像分析

SHALLOW WATER MULTIPLES DEPRESSION AND IMAGING ANALYSIS ON THE LAOSHAN UPLIFT OF THE SOUTH YELLOW SEA BASIN

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 111

一次反射波与自由表面多次波联合偏移成像: 模拟数据分析

Simultaneous migration of primary and free surface multiples: modeling data analysis

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 174

无井区生物礁储层与流体识别技术在南海西部深水区的应用

Reef reservoir and fluid identification technology and its application to no-well deep water area in Western South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(6): 185

基于小波分频的Q值补偿技术在东海中深层油气勘探中的应用

The application of formation Q value compensation method based on wavelet frequency division to the exploration of middle-deep hydrocarbon in the East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 200

地磁场模型在海洋磁测资料处理中的应用研究

Application of geomagnetic field model to marine magnetic data processing

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 214



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020101202

基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

王小杰^{1,2}, 颜中辉^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 刘欣欣^{1,2}, 杨佳佳^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要:印度洋深水海域海底地形整体较为平坦, 存在的多次波主要是海底相关多次波, 能量强, 频带宽, 利用常规的广义自由表面多次波预测技术很难去除干净。本文首先利用广义自由表面多次波预测技术预测出多次波模型, 然后将原始数据和多次波模型分为低频数据和高频数据, 低频数据利用常规的自适应减得到低频多次波模型, 高频数据转成曲波域对多次波模型进行优化, 最终得到优化后的多次波模型, 再利用原始数据直接减多次波模型, 达到压制多次波的目的。该技术在印度洋深水海域的应用效果较好, 海底相关多次波得到了较好的压制, 有效信号得到了凸显, 剖面的信噪比明显提高, 剖面质量得以提升。

关键词: 多次波; GSMP 技术; 曲波变换; 多次波模型; 信噪比

中图分类号: P738

文献标识码: A

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

WANG Xiaojie^{1,2}, YAN Zhonghui^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, LIU Xinxin^{1,2}, YANG Jiajia^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: The bottom of the deep water area of the Indian Ocean is rather flat, and the main multiples are usually related to the multiples created by strong energy and wide frequency wave band, which are difficult to be removed by the conventional generalized free surface multiples prediction technique. In order to solve the problem, the multi-wave model is improved with the generalized free surface multi-wave prediction technique, and thus the original data are separated into two parts, i.e. low frequency data and high frequency data. The low-frequency data may be converted into curvelet domain to optimize the multi-wave model. Reducing the multi-wave model directly from the original data, multiples are suppressed. The technique has been successfully applied in the deep waters of the Indian Ocean, as the correlation multiples of the seabed are suppressed, the effective signals highlighted, and the signal-to-noise ratio and quality of the profile obviously improved.

Key words: multiwave; GSMP technique; curvelet transform; multiwave model; signal to noise ratio

1 研究背景

在海洋资料中, 多次波干扰非常发育并且种类也较多, 有海水的鸣震、强海底尤其是崎岖海底产生的海底相关多次波、强反射界面产生的层间和长周期多次波等, 这些多次波会造成地震记录中有效反射能量被压制, 信噪比降低。因此, 多次波的压

制一直是海洋地震数据处理中的难点问题, 也是海上资料处理的主要任务^[1]。

深水海域地震资料数据处理是深水油气勘探的重要环节, 其中多次波的压制又是重中之重, 它直接影响到地震资料的品质, 因此在偏移之前, 尽可能地压制或衰减多次波。在深水海域, 存在的多次波主要是自由表面多次波, 该类多次波定义为地下介质反射的地震波到达自由表面后, 至少发生一

资助项目:国家自然科学基金“南黄海多道地震处理中深层 Q 值补偿实验”(41506084), “基于双相介质理论的天然气水合物地震反射特征及量化方法研究”(41706072); 国家重点研发计划子课题“天然气水合物高分辨率三维地震探测应用示范”(2017YFC0307400); 国家实验室开放基金“多分量地震波逆时偏移拉伸校正及其并行实现”(QNL2016ORP0206); 深海科学钻探井位选址项目(DD20190236)

作者简介:王小杰(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 从事地震资料数据处理工作, E-mail: walqk521@163.com

通讯作者:颜中辉(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事地震资料数据处理工作, E-mail: zhonghui4564573@163.com

收稿日期:2020-10-12; **改回日期:**2020-12-07。周立君编辑

次下行反射,然后经一定传播路径后重新返回自由表面所接收的地震波^[2-3]。可以说,在深水海域,如果能够压制自由表面多次波,也就压制了大部分的多次波干扰,因此自由表面多次波的压制是整个多次波压制的重点。针对此类多次波,学者们提出了很多压制的方法,有CMP叠加、f-k滤波法、Radon变换、聚束滤波法、预测反褶积和基于波动理论的多次波预测相减法等,其中目前最为广泛应用的是广义自由表面多次波预测技术(General-Surface Multiple Prediction, GSMP),相比于传统的二维自由表面多次波压制技术(Surface-Related Multiple Elimination, SRME),该技术预测的多次波模型更准确。同时,海上二维采集过程中电缆中—远偏移距难免受海流影响而偏离设计测线方向形成羽角,这是海上二维地震资料采集的固有特点。羽角的存在使共反射点发散无法满足SRME技术对规则化采集的要求,从而影响后续的多次波预测。因此,在本次多次波压制中,我们采用的是GSMP技术,但是在印度洋深水海域,海底相关多次波能量强,频带宽,常规的GSMP技术也不能得到很好的压制,因此,本文利用曲波变换,将多次波模型进一步优化,得到更加精确的多次波模型,从而使多次波的压制效果更好^[4-9]。

2 方法原理

2.1 广义自由表面多次波预测技术

广义自由表面多次波预测技术是近几年来逐渐兴起并广泛应用于海洋地震资料数据处理中的一项新技术。在理论上,该技术可以预测并衰减所有与地表相关的多次波,并且无需地下任何的先验信息,如速度、地层和构造等信息,是基于数据驱动的。广义自由表面多次波预测是通过模型建立和自适应减法实现的,具体的实现途径为波动方程建模法,是在地表一致性褶积法的基础上进行改进的,通过波动方程外推来实现对多次波的模拟,该技术能适应任意观测系统,并且不受炮检点位置的约束。具体过程如下:首先对单炮数据进行时间反转,然后再向下外推,并与海底的反射系数进行褶积,再做向上的外推处理,最后完成整个单炮的多次波建模^[6-8]。

2.2 曲波域多次波模型优化

广义自由表面多次波预测产生多次波模型,然后将地震数据和模型数据转换到曲波域,对多次波

模型进一步优化,最后利用原始数据与多次波模型相减,对多次波进行压制。曲波变换使用的是第二代曲波变换,解决了第一代曲波变换大量数据冗余的问题,使曲波变换的实现更简单,运算效率更高。第二代曲波变换的公式为

$$c(j,k,l) = \langle f, \varphi_{j,k,l} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\varphi_{j,k,l}(x)} dx$$

其中, $f(x)$ 表示输入的原始地震信号或者多次波模型数据; $\varphi_{j,k,l}$ 为曲波函数, $c(j,k,l)$ 为曲波系数,其中 j 为尺度, l 为方向, k 为尺度 j 在 l 方向上的矩阵系数^[10-13]。

具体的模型优化流程见图1,将地震数据和广义自由表面多次波预测产生的模型数据分为两部分,一部分是低频数据,一部分是高频数据,其中低频数据利用常规自适应减的方法得到低频多次波模型;高频数据动校后转换到曲波域,在曲波域中,比较不同尺度、不同角度的信号与多次波的振幅和相位差异(图2),具体的做法是:当信号与多次波的模型比较大于阈值时,认为是信号,小于阈值时,认为是多次波,依次来优化高频多次波模型,从而得到更加精确的多次波模型,再进行反动校(图3),最后用地震数据减去多次波模型,达到压制多次波的目的^[14-17]。分高低频的主要原因是,在曲波域中,低频部分无法分角度和尺度对数据进行比较,见图4(分三个尺度)中Scale1,对低频模型无法进行优化,因此低频数据采用常规的自适应减,在高频数据中采用曲波变换对模型进行优化。高低频分界点的选取要稍大于Scale1的频率,低于Scale2的频率。

3 实例分析

选取印度洋某深水海域的地震资料,该地区海底地形总体较为平坦,最大水深为5258 m。从原始炮集(图5)上可以看出,多次波主要是海底相关的多次波,图6是有效波与多次波频谱图的对比,其中红色是有效波频谱图,蓝色是多次波的频谱图,从图中可以看出,多次波能量强,频带宽,与有效波频谱基本一致。首先利用常规的广义自由表面多次波压制方法对其压制,图7是利用广义自由表面多次波压制方法得到的多次波模型,图8是压制后的炮集,可以看出多次波压制不干净,仍有较多残留。图9是利用本文方法,分4个尺度进行曲波变换,计算Scale1的频率为15.75 Hz,因此本文将原始数据和模型数据以20 Hz为界分为高频数据和低频

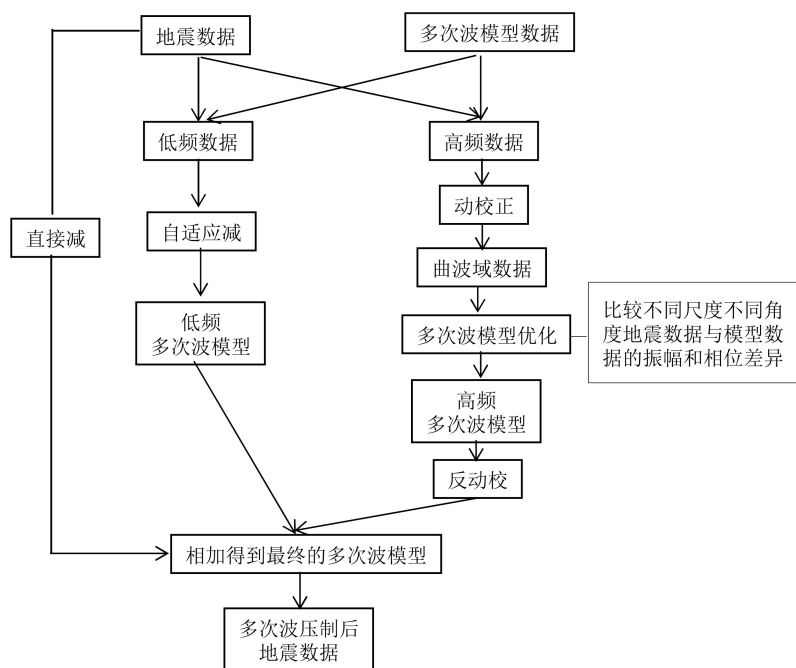


图 1 模型优化及多次波压制流程

Fig.1 Model optimization and multiple suppression process

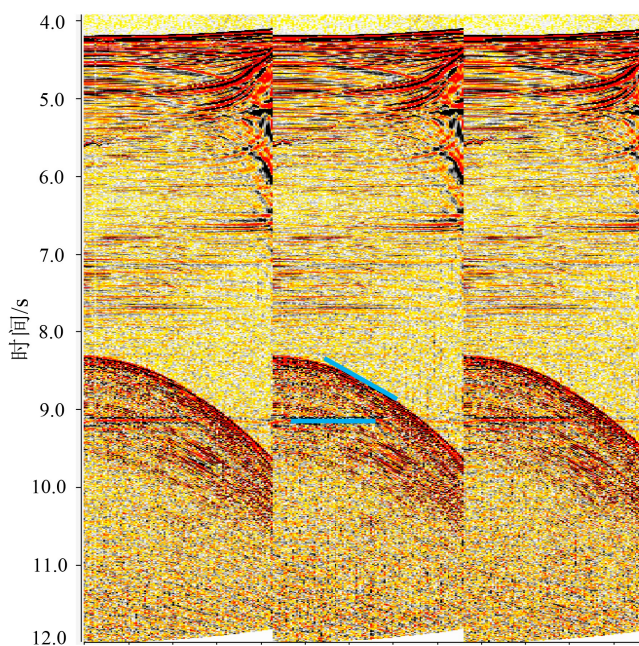


图 2 多次波与有效波角度的差异

Fig.2 Angle difference between multiple and effective waves

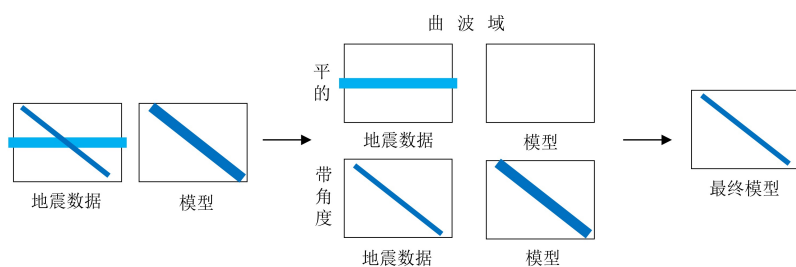


图 3 曲波域多次波模型优化思路

Fig.3 Optimization of multiple-wave model in curvelet domain

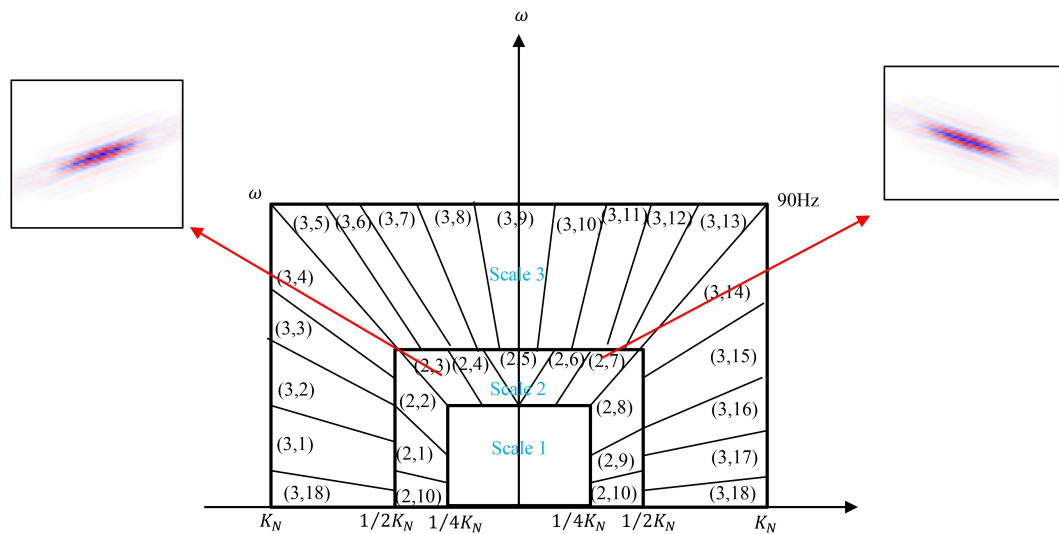


图 4 曲波变换示意图
 ω 为频率, K_N 为空间奈奎斯特频率, N 为尺度。
Fig.4 Schematic diagram of curvelet transform
 ω is the frequency, K_N is the space Nyquist frequency, N is the scale.

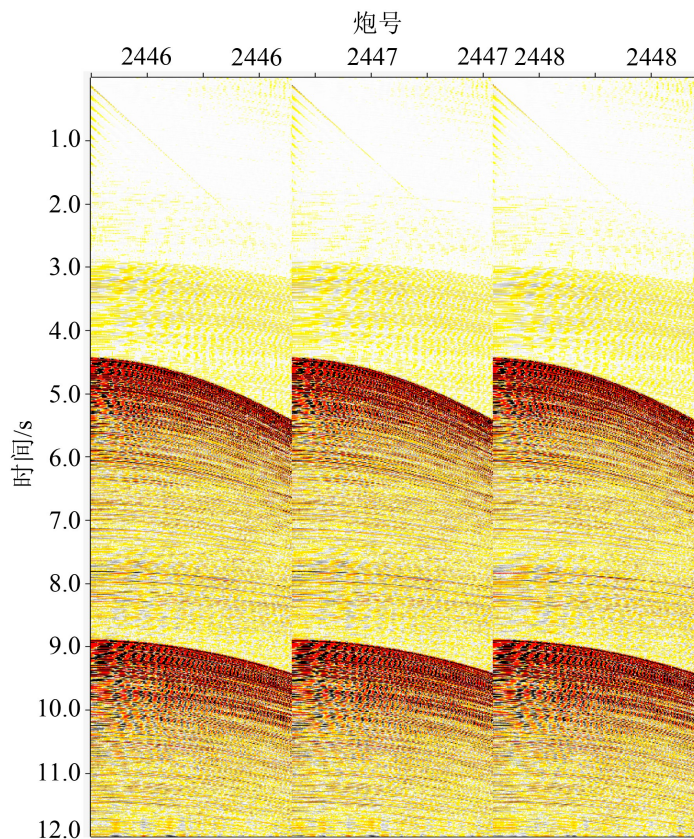


图 5 原始炮集
Fig.5 Original gun set

数据, 低频数据利用常规的自适应减的方法优化低频多次波模型, 高频数据转到曲波域, 在曲波域中根据不同尺度不同角度的信号与多次波的振幅和相位差异来优化高频多次波模型, 然后将低频模型

和 高 频 模 型 相 加 得 到 优 化 后 的 多 次 波 模 型。为 了 更 清 晰 地 比 较 优 化 前 后 的 多 次 波 模 型, 将 原 始 炮 集 的 多 次 波 与 优 化 前 后 的 多 次 波 模 型 放 大 并 进 行 比 较, 图 10 可 以 明 显 地 看 出, 由 浅 至 深, 优 化 后 的 多

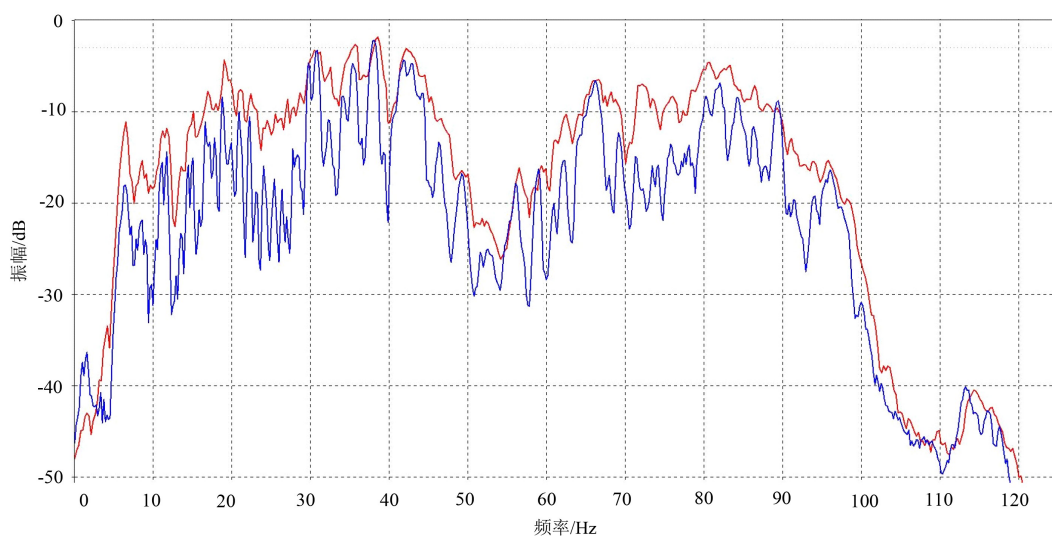


图 6 有效波与多次波频谱图对比

红色是有效波频谱, 蓝色是多次波频谱。

Fig.6 The spectrum of the effective wave compared with that of the multiple wave
where red is the spectrum of the effective wave and blue is the spectrum of the multiple wave.

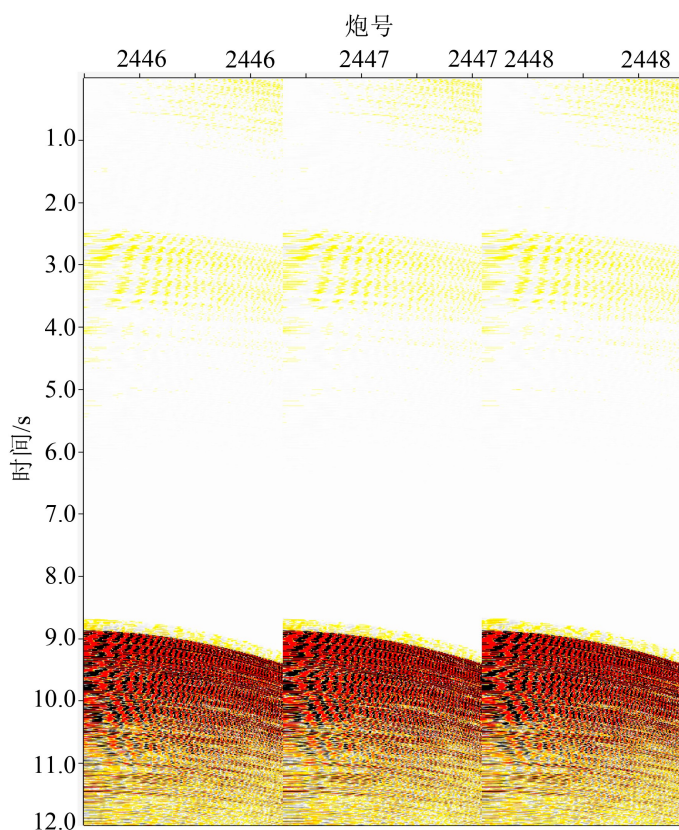


图 7 常规方法得到的多次波模型

Fig.7 Multi-wave model obtained by conventional method

次波模型与原始炮集的多次波更吻合, 多次波模型的精确度更高。最后利用原始数据直接减去多次波模型, 得到压制后的炮集, 可以看出压制后炮集更干净, 信噪比更高(图 11)^[18-21]。

下面从叠加剖面上看常规方法和本文方法的

压制效果。选取印度洋该深水海域两条测线, 图 12 是 A 测线原始剖面, 图 13 是利用常规方法压制后的效果, 可以看出压制效果不理想, 多次波残留较为严重(图中箭头所指的地方); 图 14 是利用本文方法压制后的效果, 可以看出, 压制效果较好, 多次

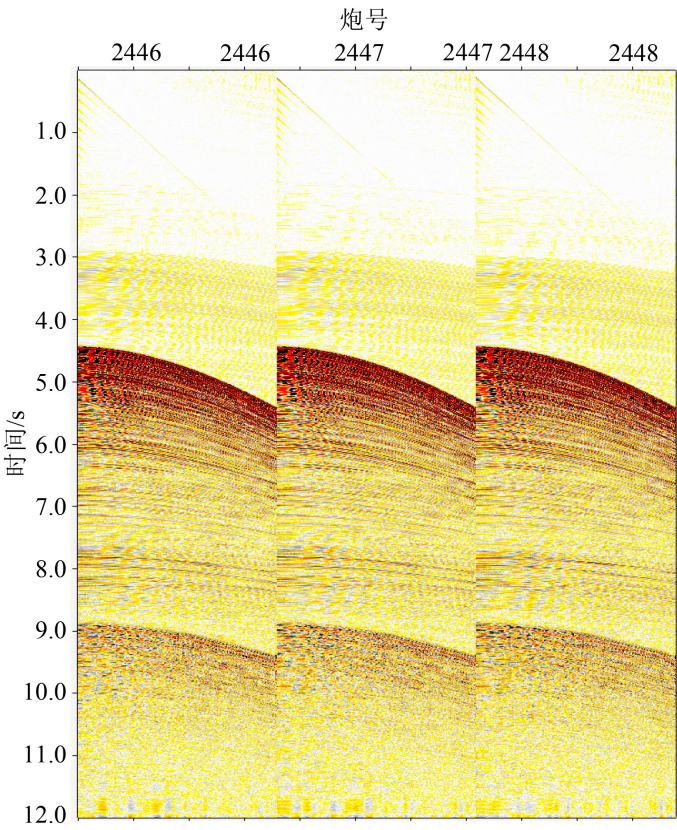


图 8 常规方法压制后的炮集
Fig.8 A shot set after suppression by conventional method

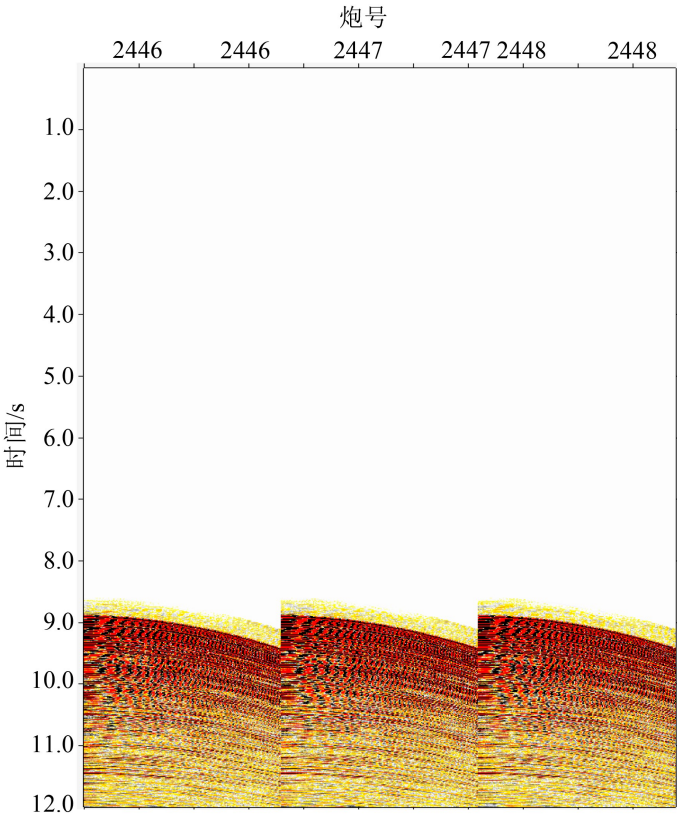


图 9 曲波域优化后多次波模型
Fig.9 Optimized multiple wave model in curved wave domain

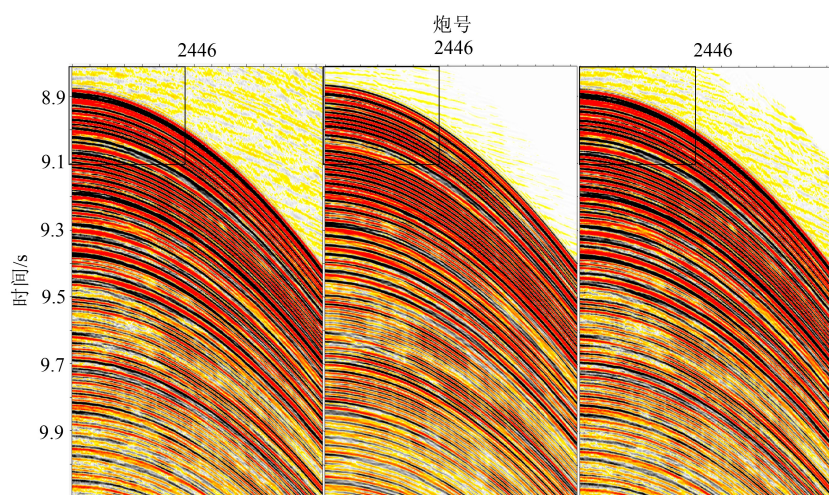


图 10 多次波模型对比图

从左到右依次为: 原始数据多次波, 常规方法得到的多次波模型, 曲波域优化后的多次波模型。

Fig.10 Multiples model comparison chart

From left to right: multiples of raw data, multiples model obtained by conventional method, multiples model obtained by curvelet transform.

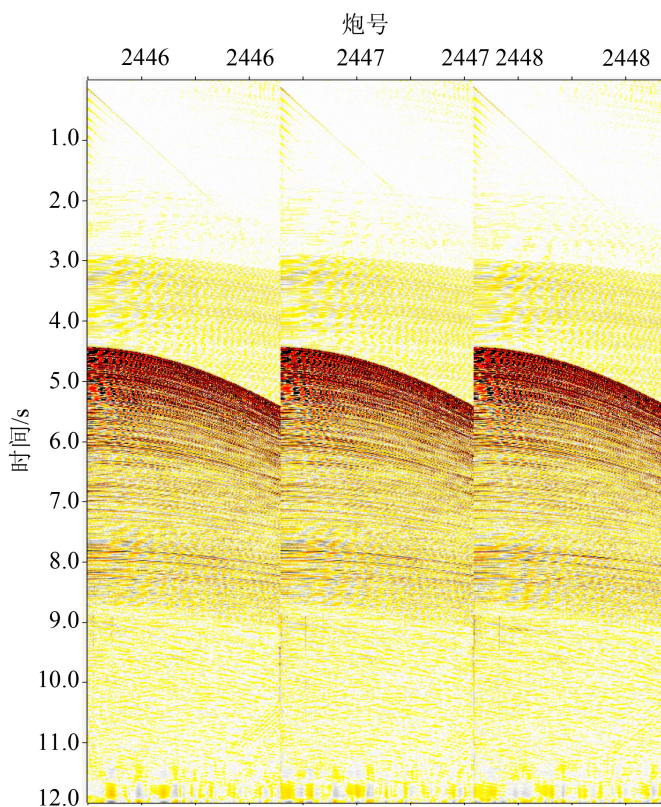


图 11 利用优化后模型多次波压制效果

Fig.11 Suppression of multiple waves using the optimized model

波去除的较为干净, 剖面信噪比高, 并且未损害有效信号, 时间 10.2 s 的位置波组特征更加清晰, 有利于后期地震资料的偏移和解释^[22-25]。图 15—17 是 B 测线的原始剖面及利用常规方法和本文方法压制后的效果图, 同样可以看出, 利用本文方法压制多次波的效果更好, 压制后的剖面信噪比更高,

说明本文方法更适用于深水海域海底相关多次波的压制。

4 结论

本文通过在实际资料中的应用可以看出, 多次

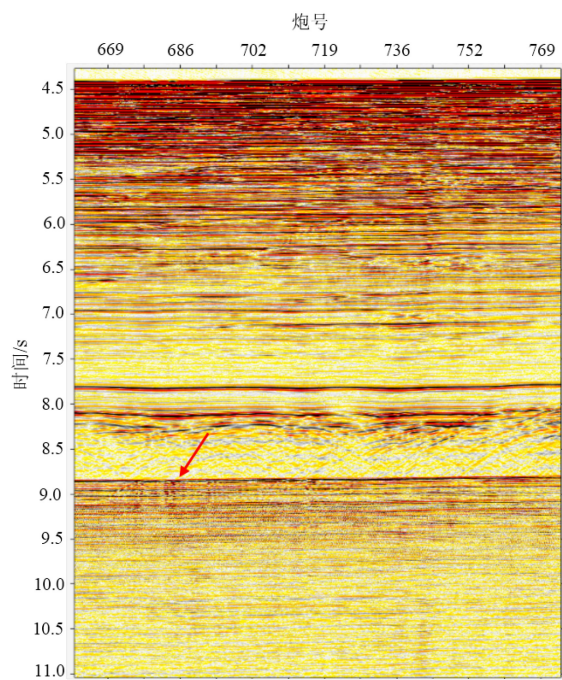


图 12 A 测线原始叠加剖面
Fig.12 The original profile of line A

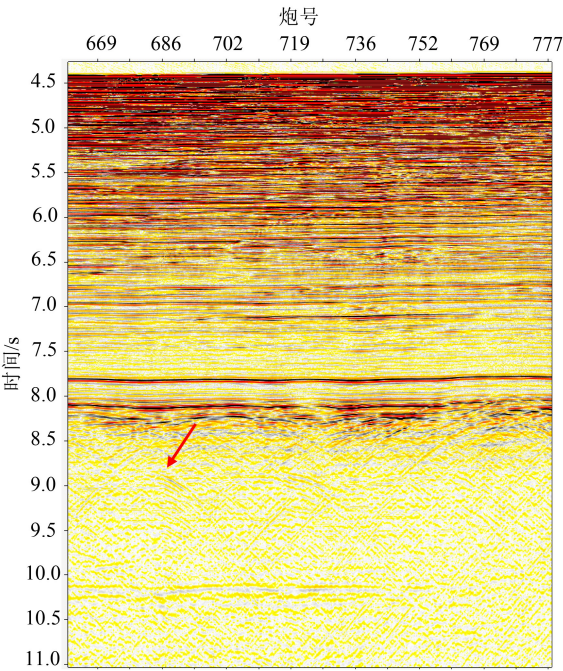


图 14 A 测线利用曲波域优化模型压制的叠加剖面
Fig.14 The stacked profile after optimization model in curved wave domain of line A

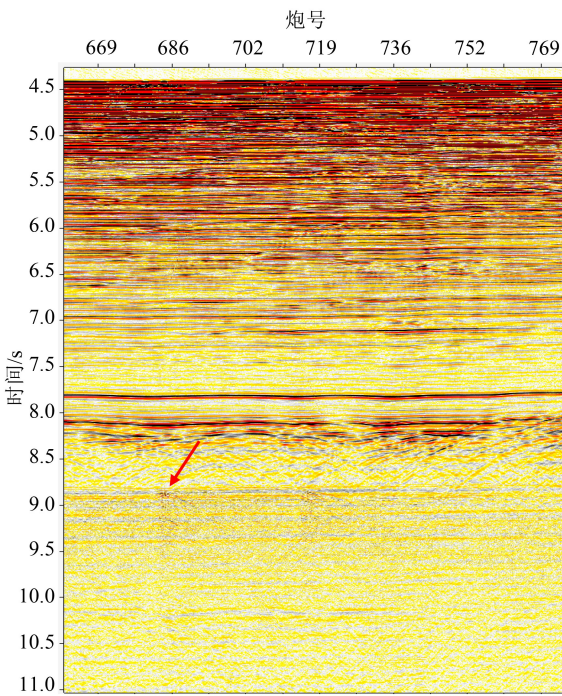


图 13 A 测线常规方法压制后的叠加剖面
Fig.13 The superimposed profile after conventional method of line A

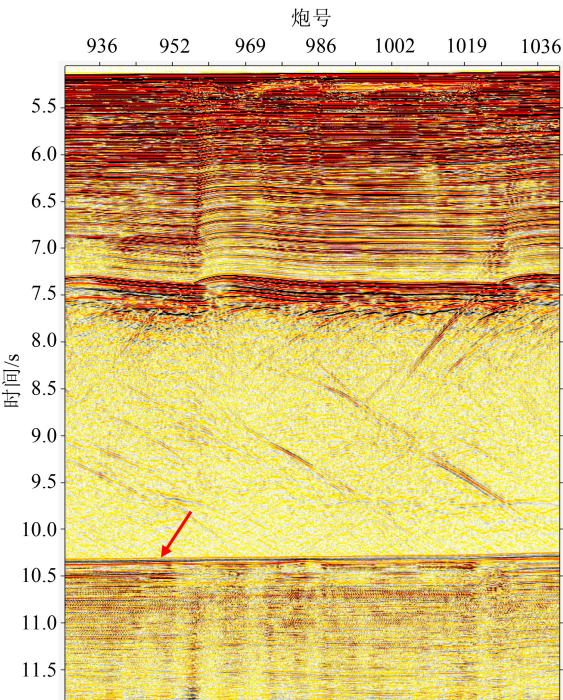


图 15 B 测线原始叠加剖面
Fig.15 The original profile of line B

波的压制效果较好, 剖面的信噪比得到了较大的提高, 同时压制后有效信号得到了凸显, 波组特征更加清晰, 有利于后期层位的识别和追踪。

该技术适用于海底地形较为平坦的深水海域, 同时值得注意的是, 本文方法在曲波域中对高频模

型进行优化时, 是根据信号和模型数据在不同尺度、不同角度上的振幅和相位差异, 即当信号与多次波的模型比大于阈值时, 认为是信号, 小于阈值时, 认为是多次波, 因此阈值的选择非常重要, 直接决定优化后模型的精确度。阈值的选择

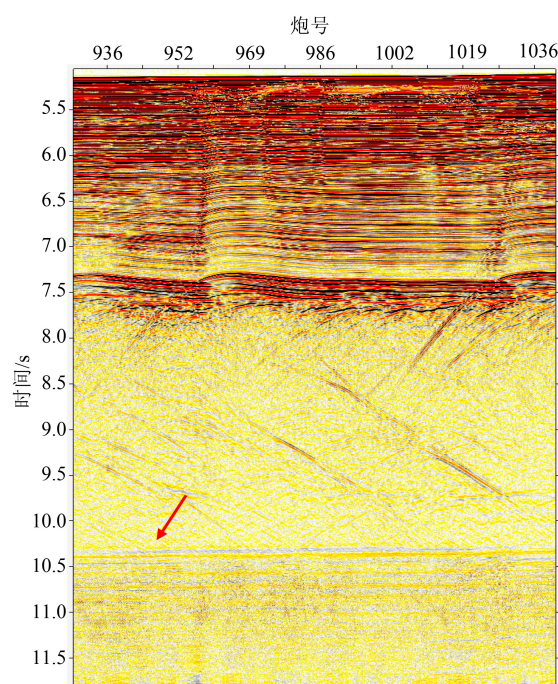


图 16 B 测线常规方法压制后的叠加剖面

Fig.16 The superimposed profile after conventional method of line B

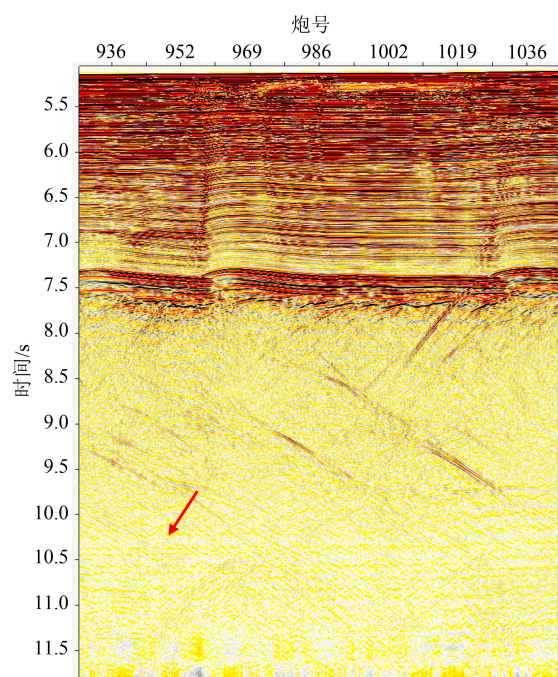


图 17 B 测线利用曲波域优化模型压制后的叠加剖面

Fig.17 The stacked profile after optimization model in curved wave domain of line B

是选取有代表性的炮集, 计算不同尺度、不同角度的振幅和相位差异, 从而确定阈值。

参考文献 (References)

- [1] Oz Yilmaz. Seismic Data Processing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 379-389.
- [2] 叶月明, 郭庆新, 庄锡进, 等. 不同阶次自由表面相关多次波预测与成像方法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2237-2248. [YE Yueming, GUO Qingxin, ZHUANG Xijin, et al. Prediction and migration of different order surface-related multiples [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2237-2248.]
- [3] 刘伊克, 常旭, 王辉, 等. 波路径偏移压制层间多次波的理论与应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 589-595. [LIU Yike, CHANG Xu, WANG Hui, et al. Internal multiple removal and its application by wavepath migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 589-595.]
- [4] 刘伊克, 朱伟林, 米立军, 等. 南海深水多次波成像[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 152-160. [LIU Yike, ZHU Weilin, MI Lijun, et al. Migration of multiples from the South China Sea [J]. Science China: Earth Science, 2015, 45(2): 152-160.]
- [5] Guo S J, Li Z C, Tong Z Q, et al. Joint imaging of primaries and surface-related multiples based on generalized shot-profile migration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1098-1105.
- [6] Verschuur D J, Berkhout A J, Wapenaar C P A. Adaptive surface-related multiple elimination [J]. Geophysics, 1992, 57(1): S1-S9.
- [7] Varela C L, Rosa A L, Ulrych T J. Modeling of attenuation and dispersion [J]. Geophysics, 1993, 58(8): 1167-1173.
- [8] 刘站, 刘洪, 孙军, 等. 地表数据驱动的与层相关的层间多次波消除方法及应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2227-2236. [LIU Zhan, LIU Hong, SUN Jun, et al. Surface-based layer-related inter-layer multiple elimination method and its application [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2227-2236.]
- [9] 周小鹏, 刘伊克, 李鹏. 改进的多道预测算子压制浅水多次波方法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 667-679. [ZHOU Xiaopeng, LIU Yike, LI Peng. Improved shallow water demultiple method with multichannel prediction operators [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 667-679.]
- [10] 余昌辉. 基于曲波变换的地震随机噪声压制新方法[J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 11-15. [YU Changhui. A new method to suppress random seismic noise based on curvelet transform [J]. Offshore Oil, 2017, 37(1): 11-15.]
- [11] 张之涵, 孙成禹, 姚永强, 等. 三维曲波变换在地震资料去噪处理中的应用研究[J]. 石油物探, 2014, 53(4): 421-430. [ZHANG Zhihan, SUN Chengyu, YAO Yongqiang, et al. Research on the application of 3D curvelet transform to seismic data denoising [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(4): 421-430.]
- [12] 曹静杰, 杨志权, 杨勇, 等. 一种基于曲波变换的自适应地震随机噪声消除方法[J]. 石油物探, 2018, 57(1): 70-78. [CAO Jingjie, YANG Zhiquan, YANG Yong, et al. An adaptive seismic random noise elimination method based on Curvelet transform [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(1): 70-78.]
- [13] 方云峰, 聂红梅, 张丽梅, 等. 基于数据正则化和稀疏反演的三维表面多次波压制方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 673-681. [FANG Yunfeng, NIE Hongmei, ZHANG Limei, et al. 3D SRME based on joint regularization and sparse inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 673-681.]

- [14] 张华, 刁塑, 温建亮, 等. 应用二维非均匀曲波变换压制地震随机噪声[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(1): 16-23. [ZHANG Hua, DIAO Su, WEN Jianliang, et al. A random noise suppression with 2D non-uniform curvelet transform [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(1): 16-23.]
- [15] van Dedem E J, Verschuur D J. 3D surface-related multiple prediction, a sparse inversion approach [J]. Geophysics, 2005, 70(3): 95-134.
- [16] Weglein A B. Multiple attenuation: An overview of recent advances and the road ahead [J]. The Leading Edge, 1999, 18(1): 40-44.
- [17] Weisser T, Pica A L, Herrmann P, et al. Wave equation multiple modelling: acquisition independent 3D SRME [J]. First Break, 2006, 24(9): 75-79.
- [18] 张振波. 南海北部深水地震勘探所遇到的挑战与对策[J]. 海洋石油, 2015, 35(1): 9-15. [ZHANG Zhenbo. Challenges and measures in seismic exploration in Northern deepwater area of south china sea [J]. Offshore Oil, 2015, 35(1): 9-15.]
- [19] 杨佳佳, 潘军, 栾锡武, 等. 浅水多次波衰减技术在多道地震数据处理中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1): 167-174. [YANG Jiajia, PAN Jun, LUAN Xiwu, et al. Application of attenuation technology to shallow water multiples in multi-channel seismic data processing [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(1): 167-174.]
- [20] Dragoset B. A practical approach to surface multiple attenuation [J]. The Leading Edge, 1999, 18(1): 104-108.
- [21] 白兰淑, 刘伊克, 卢回忆. 稀疏反演多次波去除策略与效果分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4801-4813. [BAI Lanshu, LIU Yike, LU Huiyi. Strategy of multiple elimination by sparsity inversion and its effectiveness analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4801-4813.]
- [22] 肖二莲, 陈瑜, 万欢, 等. SRME多次波衰减方法在海洋地震资料中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 1057-1064. [XIAO Erlan, CHEN Yu, WAN Huan, et al. Surface-related multiple elimination on marine seismic data [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(3): 1057-1064.]
- [23] 马继涛, Mrinal S K, 陈小宏, 等. 海底电缆多次波压制方法研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2960-2966. [MA Jitao, Mrinal S K, CHEN Xiaohong, et al. OBC multiple attenuation technique using SRME theory [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(11): 2960-2966.]
- [24] 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 Deli, FENG Fei, et al. 3D Surface-Related Multiple Elimination [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(6): 2034-2041.]
- [25] 张振波, 谢涛. 深水地震资料联合去多次波技术-以南海北部荔湾深水气田为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 37-42. [ZHANG Zhenbo, XIE Tao. A portfolio of demultiple technologies in deepwater seismic data processing: A case study of the Liwan gas reservoirs in northern South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 37-42.]