

邢子浩, 陈靓, 杨德鹏, 等. 基于正则化非平稳回归技术的自适应匹配相减在单道地震多次波压制中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 70-76.

# 基于正则化非平稳回归技术的自适应匹配相减在单道地震多次波压制中的应用

邢子浩<sup>1,2</sup>, 陈靓<sup>1,2</sup>, 杨德鹏<sup>3</sup>, 杨册<sup>1</sup>, 翟继锋<sup>1</sup>, 周大森<sup>1</sup>, 王明<sup>1</sup>, 韦成龙<sup>1</sup>

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075;

3 国家海洋局北海海洋技术保障中心, 青岛 266033)

**摘要:** 多次波压制日益成为单道地震资料处理的焦点, 其关键技术之一是自适应匹配滤波。然而, 传统匹配滤波算法不总适合描述随时间和空间非平稳变化的地震信号, 针对这一问题正则化非平稳回归技术被提出。从基本原理出发, 采用模型数据对正则化参数进行了试验, 并获得了它们对处理效果的影响特性, 最后将该技术用于实际资料的多次波预测减去过程中, 取得了良好的多次波压制效果。通过实际应用对比, 证实该技术较传统匹配滤波方法在去除多次波方面更具优势。

**关键词:** 单道地震; 多次波压制; 正则化非平稳回归; 海洋地震勘探

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.002

## 0 引言

作为重要的海洋地球物理调查技术, 单道地震勘探具有配置灵活、高效经济、准确直观、分辨能力高、穿透能力强的优势特点, 它能以较高分辨率提供海底以下 10 m 到 1、2 km 左右深度范围内的地层结构等地质特征, 探测目标地层的深度范围在浅部、深部分别衔接浅地层剖面、多道地震的目标地层<sup>[1-3]</sup>。目前, 单道地震已广泛应用于海洋区域地质调查、海岸带综合地质调查、海域地质灾害识别、天然气水合物资源勘查及近海工程等领域<sup>[4]</sup>, 并且随着我国深海战略的实施和推进, 其应用范围也在逐步向深海拓展<sup>[5]</sup>。由于海平面是一个强波阻抗面, 导致单道地震资料中发育大量与之相关的多次波。多次波实际上是一种虚假干扰信号, 它们的存在会掩盖真实的地下反射信息, 降低地震资料的信噪比, 影响地震成像的可靠性, 干扰对地震资料的解释。因此, 必须通过数据处理的手段予以消除。

收稿日期: 2020-01-07

资助项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0307402); 自然资源部海底矿产资源重点实验室 2018 年度开放基金(KLMMR-2018-A-03)

作者简介: 邢子浩(1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海上地震资料采集、处理方面的研究工作。E-mail: starzhou@163.com

一直以来, 海洋地震勘探的应用热门是深部油气探测及油气田开发, 这也促使国内外学者更热衷于多道地震多次波压制技术的研究<sup>[6-12]</sup>, 而对单道地震多次波压制技术的研究相对较少。近年来, 随着我国海洋地质调查事业的蓬勃发展, 对单道地震数据质量的要求也在不断提高, 使得在单道地震资料处理中多次波压制越来越受重视, 相关研究也越来越多<sup>[13-19]</sup>。多次波压制技术研究已然成为单道地震处理技术发展的一大趋势。

现有的单道地震多次波压制方法主要有预测反褶积和一维 SRME。预测反褶积以数据的静态时移作为多次波模型, 通过一个短滤波器与其本身进行匹配来实现多次波压制; 一维 SRME 以数据的自褶积作为多次波预测模型, 通过自适应相减技术将多次波去除。与短滤波器匹配技术相比, 自适应相减技术更符合地震子波在传播过程中的非平稳特性, 更适应地层界面的横向变化, 可以更好地弥补由于在采集时震源子波不一致、最小偏移距非零等因素造成的多次波预测模型的振幅、相位和频率畸变。因此, 为了改善多次波压制效果, 预测反褶积的减去阶段可以采用自适应相减来完成。由此可见, 自适应相减技术的发展在单道地震多次波压制过程中发挥着重要作用。

自适应相减技术主要包括基于 L1 范数的自适

应匹配相减方法、基于 L2 范数的自适应匹配相减方法以及基于模式匹配的滤波方法等, 其中基于 L2 范数的自适应匹配相减是目前常用的一种自适应相减方法。该方法有一维滤波和二维滤波 2 种算法<sup>[20]</sup>, 它们均基于地震信号局部平稳的假设, 通过在时间或空间上划分重叠的窗口来应对地震信号的非平稳变化。然而, 局部平稳的假设并不总是适用于描述地震信号。Fomel<sup>[21]</sup> 针对这一问题提出了正则化非平稳回归技术, 并成功用于基准合成数据的多次波自适应相减中。该技术的关键点是使用整形正则化来约束滤波系数的连续性和平滑度, 不需要将输入数据划分入局部窗口, 克服了传统匹配滤波方法局部平稳的假设。与吉洪诺夫正则化相比, 整形正则化具有参数容易控制以及快速迭代收敛的优势<sup>[22]</sup>。除用于多次波衰减外, 正则化非平稳回归也在时频分析<sup>[23]</sup>、非平稳多项式拟合<sup>[24]</sup>、 $f-x$  域随机噪声衰减<sup>[25]</sup>、道插值等方面得到应用。

本文聚焦正则化非平稳回归技术在单道地震多次波压制中应用, 深度挖掘正则化参数—平滑半径的选择对于多次波压制效果的影响。在此基础上, 探究该技术在实际资料中的多次波压制效果。

## 1 正则化非平稳回归

考虑一个主信号  $m(x)$ ,

式中:  $x$  代表一个多维空间的坐标, 从信号的一个集合  $s_k(x)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ 。平稳回归的目标是估计系数  $a_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , 这样预测误差

$$e(x) = m(x) - \sum_{k=1}^N a_k s_k(x) \quad (1)$$

在最小平方意义下为最小。

非平稳回归的定义与方程(1)相似, 但它允许系数  $a_k$  随  $x$  变化, 此时预测误差变成

$$e(x) = m(x) - \sum_{k=1}^N b_k(x) s_k(x) \quad (2)$$

方程(2)的最小平方问题是病态的, 因为相比约束它有更多的未知变量。其解决办法是施加额外约束将估计系数限定在允许的变化内。

吉洪诺夫正则化是一种通过在模型参数上施加间接约束来使估计问题适定的常规方法, 相当于将下面的函数最小化

$$F[b] = \|e(x)\|^2 + \epsilon^2 \sum_{k=1}^N \|D[b_k(x)]\|^2 \quad (3)$$

式中:  $D$  是正则化算子,

$\epsilon$  是一个标量正则化参数。

如果  $D$  是一个线性算子, 则最小平方估计问题简化为线性反演

$$b = A^{-1}d \quad (4)$$

式中:  $b = [b_1(x) b_2(x) \dots b_N(x)]^T$ ,  $d = [s_1(x)m(x) s_2(x)m(x) \dots s_N(x)m(x)]^T$ , 矩阵  $A$  的元素是

$$A_{ij}(x) = s_i(x) s_j(x) + \epsilon^2 \delta_{ij} D^T D \quad (5)$$

然而, 在实际反演中确定一个合适的正则化算子  $D$  是有难度的, 基于这一原因, Fomel 提出了整形正则化。该方法将整形(平滑)视为一个基本运算并将其合并到迭代反演中, 与吉洪诺夫正则化表达问题的公式不同, 人们不是去尽力寻找和指定合适的算子  $D$ , 而是指定一个更加容易设计的整形(平滑)算子  $S$ 。正则化反演变为如下形式

$$b = \widehat{A}^{-1} \widehat{d} \quad (6)$$

其中  $\widehat{d} = [S[s_1(x)m(x)] S[s_2(x)m(x)] \dots S[s_N(x)m(x)]]^T$ , 矩阵  $\widehat{A}$  的元素

$$\widehat{A}_{ij}(x) = \lambda^2 \delta_{ij} + S [s_i(x) s_j(x) - \lambda^2 \delta_{ij}] \quad (7)$$

$\lambda$  是一个比例系数, 它控制从信号的相对尺度, 不会影响估计模型的形状, 模型形状由整形算子  $S$  控制。这个方法的主要优势是与  $\epsilon$  和  $D$  相比,  $\lambda$  和  $S$  的选择相对容易。本文中, 整形算子  $S$  选择为可调整半径的高斯平滑算子,  $\lambda$  选择为  $s_i(x)$  的中值。

在时间—空间域中, 假设原始地震数据为  $p(x, t)$ , 预测的多次波模型为  $m(x, t)$ , 两者之间的非平稳匹配滤波可以表示为

$$e(x, t) = p(x, t) - \sum_{k=1}^N b_k(x, t) m\left(x, t - k + \frac{N}{2}\right) \quad (8)$$

在最小平方意义下, 使用整形正则化约束匹配滤波系数

$$b = \widehat{A}^{-1} \widehat{d} \quad (9)$$

式中:  $\left[ b\left(x, t - 1 + \frac{N}{2}\right) b\left(x, t - 2 + \frac{N}{2}\right) \dots b\left(x, t - \frac{N}{2}\right) \right]^T$ ,  $\widehat{d} = \left[ S\left[m\left(x, t - 1 + \frac{N}{2}\right) p\left(x, t - 1 + \frac{N}{2}\right)\right] \dots S\left[m\left(x, t - \frac{N}{2}\right) p\left(x, t - \frac{N}{2}\right)\right] \right]^T$ , 矩阵  $\widehat{A}$  的元素是

$$\widehat{A}_{ij}\left(x, t - k + \frac{N}{2}\right) = \lambda^2 \delta_{ij} + S \left[ m\left(x, t - i + \frac{N}{2}\right) m\left(x, t - j + \frac{N}{2}\right) - \lambda^2 \delta_{ij} \right] \quad (10)$$

最后使用基于共轭梯度算法的迭代反演即可实现对匹配滤波系数的最小平方估计。

## 2 模型数据测试

正则化非平稳回归的参数是时间平滑半径和空间平滑半径,它们决定了迭代反演的收敛速度和数据处理效果。在地震信号数字处理中,正则化参数并非确定值,其选择需要根据实际情况来设定。下面利用模型数据对这些参数进行测试,以获取它们对多次波压制效果的影响特性。

图 1a 是一个简单的单道地震剖面,其中包含一个海底同相轴和两个地下界面同相轴,海底同相

轴旅行时是斜率为零的一次函数,一个地下界面同相轴与海底平行,另一个地下界面同相轴旅行时是一正弦函数。该剖面由脉冲反射系数序列与 250 Hz 雷克子波褶积合成,121 道,0.5 ms 采样间隔,200 ms 时间记录长度。为了使地震同相轴在空间上明显表现为非平稳,3 个地震同相轴分别与  $A(x) = 0.0001(x-60)^2 + 0.5$ 、 $B(x) = 0.0001(x-80)^2 + 0.2$ 、 $C(x) = 0.0001(x-40)^2 + 0.3$  相乘。图 1b 是图 1a 考虑自由表面影响合成的包含自由表面多次波的模型数据,为了更加符合实际情况,还在上面加了一点随机噪声,图 1c 是图 1b 通过自褶积预测的多次波模型。

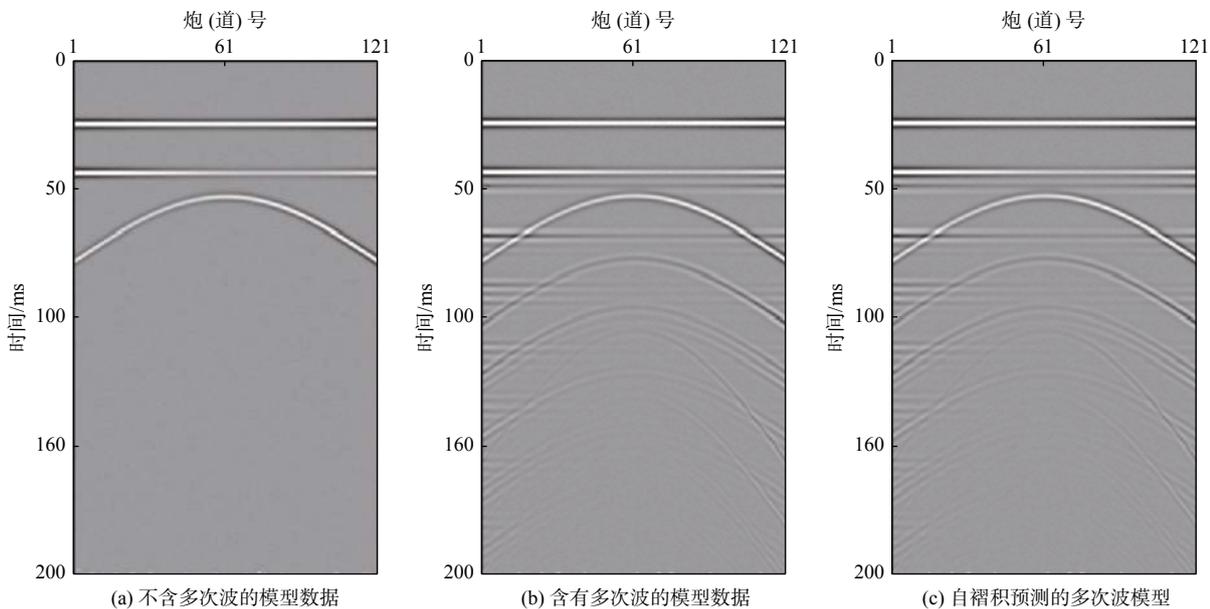


图 1 模型数据

Fig.1 Model data

固定空间轴平滑半径为 10 道不变,图 2a、2b、2c 分别展示了时间轴平滑半径为 2 个采样点、10 个采样点、40 个采样点时,图 1b 与图 1c 的非平稳匹配相减结果,图 3a、3b、3c 分别为与之对应的零延迟匹配滤波系数。通过对比发现,随着时间轴平滑半径的增大,匹配滤波系数的变化在时间方向上更加趋于平缓,但多次波压制效果也随之变差;过小的平滑半径同样不尽如人意,这种情况虽然可以压制更多的多次波,但会对一次波能量造成不可挽回的损伤。

固定时间轴平滑半径为 10 个采样点不变,图 4a、4b、4c 分别展示了空间轴平滑半径为 2、7、30 道时图 1b 与图 1c 的非平稳匹配相减结果,图 5a、5b、5c 分别为与之对应的零延迟匹配滤波系数。显然,

空间轴平滑半径对于匹配效果的影响特性与时间轴平滑半径相似。

由此可见,在利用正则化非平稳回归技术减去多次波时,平滑半径的选取既不能过小也不能过大,过小的平滑半径虽然可以很好地压制多次波,但会降低计算的统计特性导致有用的反射波能量在相减过程中被减掉,并且这种情况因为参与平滑约束的样点数较少造成迭代反演的慢收敛;过大的平滑半径可使迭代反演快速收敛,但压制多次波的效果较差,这是因为随着平滑半径的增加,通过整形的正则化非平稳回归的结果会逐渐接近平稳回归的结果。根据模型试验的结果来看,在选择正则化参数时,时间轴平滑半径至少要大于半个子波长度,空间轴平滑半径至少要  $>10$  道。

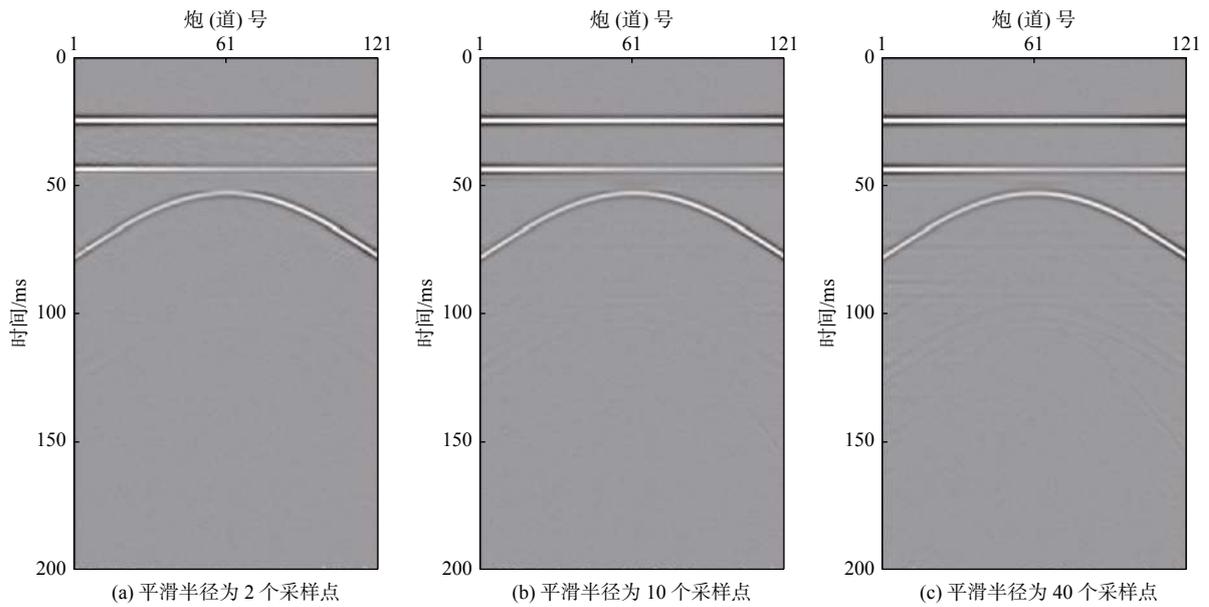


图 2 时间轴平滑半径对匹配效果的影响

Fig.2 The influence of time axis smoothing radius on matching effect

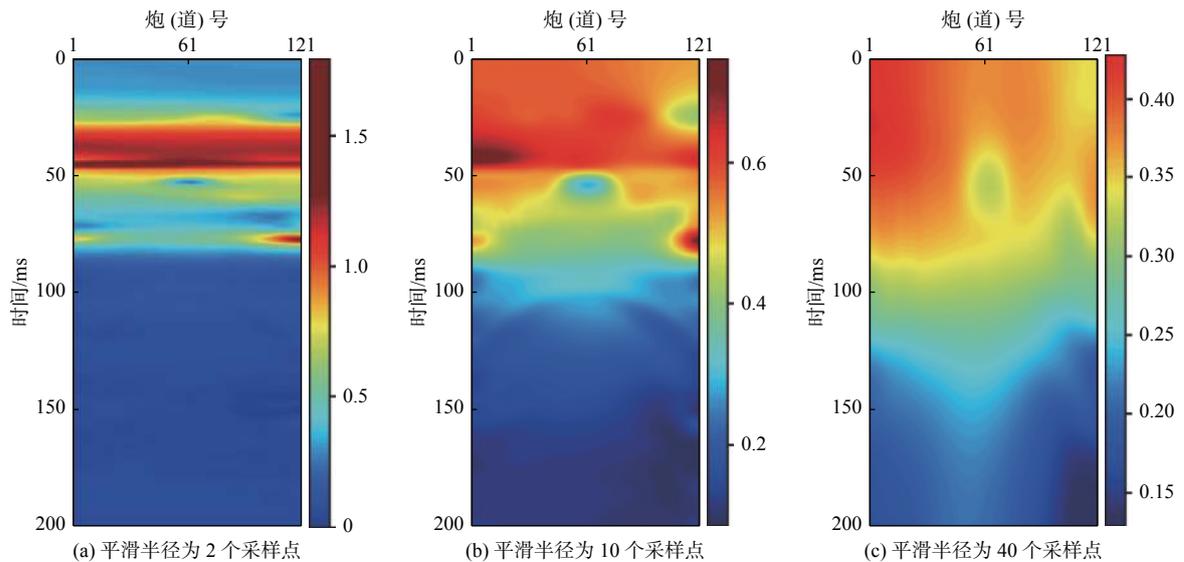


图 3 不同时间轴平滑半径对应的零延迟匹配滤波系数

Fig.3 Zero-lag coefficients corresponding to different time axis smoothing radius

### 3 实际资料处理

图 6 显示的是经过带通滤波、消除大值干扰、涌浪校正等预处理后的海上单道地震剖面(0.25 ms 采样间隔), 从图上看, 该资料中与水层相关的多次波发育, 特别是海底(红色箭头指示)、沉积基底(绿色箭头指示)等几个强反射界面(其他分别用黄色、紫色、橙色箭头指示)产生的水层多次波非常容易识别, 它们在时间上等于海底的双程旅行时, 形态上与一次波相似, 并且极性发生了反转。这些多次

波与有效波交织混叠, 严重干扰了后续的地质解释。

图 7 和图 8 分别是采用传统匹配滤波方法和正则化非平稳回归技术对该资料的处理结果, 其多次波模型均由数据自褶积获得, 处理参数见表 1。通过两图对比可以看出, 尽管传统匹配滤波方法消除了大部分多次波能量, 但其处理后的剖面中存在明显的海底多次波残余能量, 与之相比, 正则化非平稳回归技术取得了更好的多次波衰减效果。图 9 展示了图 7 和图 8 剖面的局部放大, 通过对比也充分说明了这一点, 采用传统匹配滤波方法处理后的结果仍然存在海底(红色箭头指示)及其它地层界

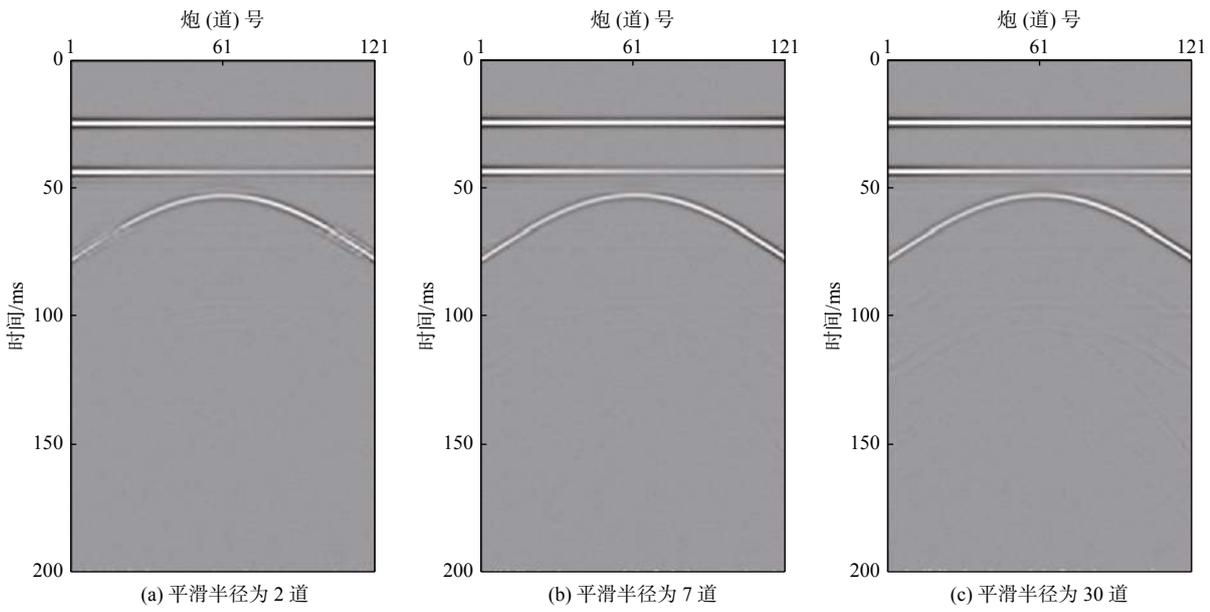


图 4 空间轴平滑半径对匹配效果的影响

Fig.4 The influence of space axis smoothing radius on matching effect

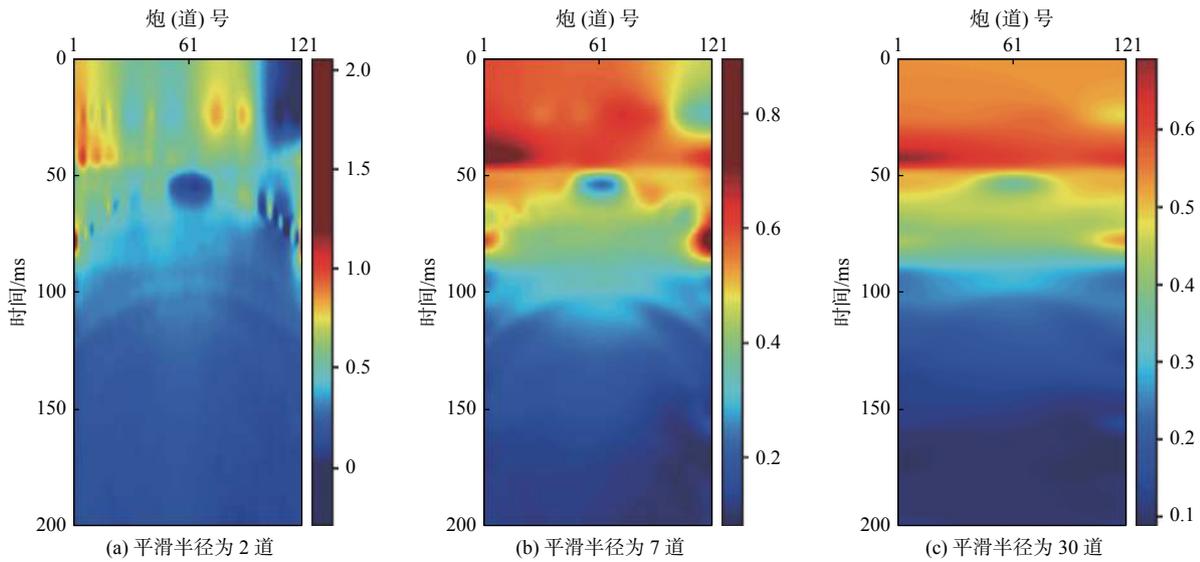


图 5 不同空间轴平滑半径对应的零延迟匹配滤波系数

Fig.5 Zero-lag coefficients corresponding to different space axis smoothing radius

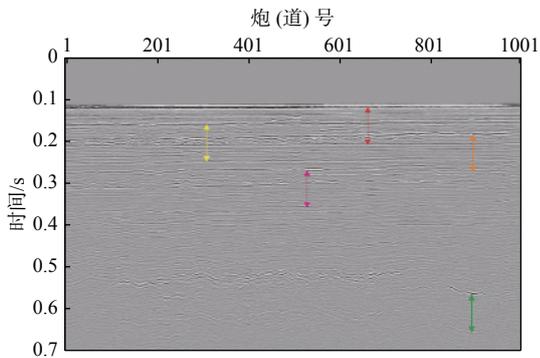


图 6 野外单道地震剖面  
Fig.6 Filed single channel seismic profile

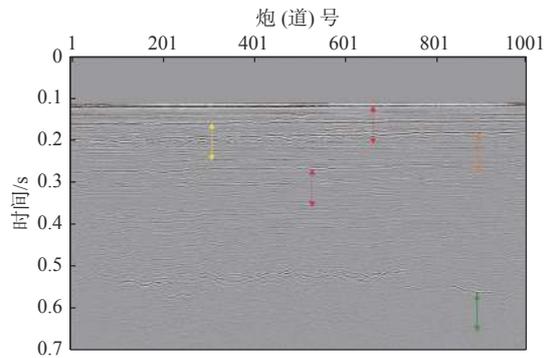


图 7 使用传统匹配滤波方法处理后的剖面  
Fig.7 The post processing profile using traditional matched filtering method

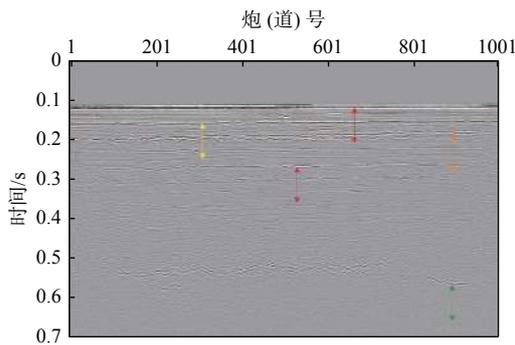
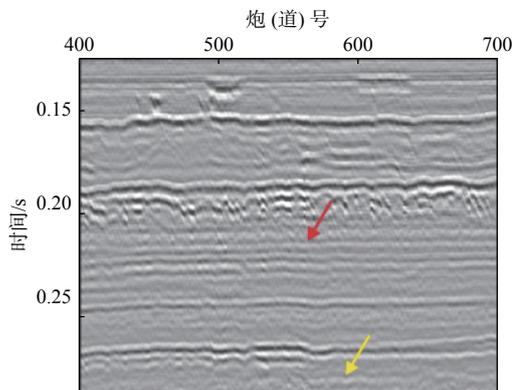
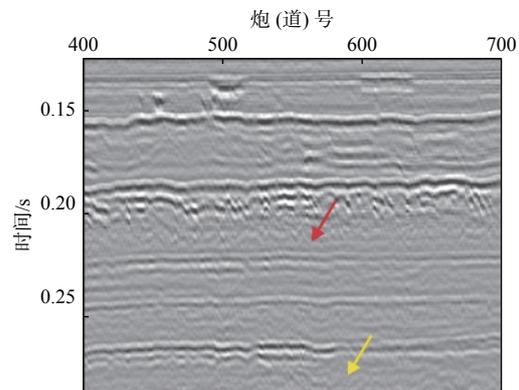


图 8 使用正则化非平稳回归处理后的剖面

Fig.8 The post processing profile using regularized nonstationary regression



(a) 传统匹配滤波方法处理后的结果



(b) 正则化非平稳回归处理后的结果

图 9 剖面局部放大对比

Fig.9 The comparison of zoomed section

## 4 结论

与传统匹配滤波方法相比,正则化非平稳回归技术不需要将输入数据划分入局部窗口,而是使用整形正则化约束非平稳系数,使其在时间和空间上达到人们所期望的平滑程度。该技术的控制参数包括时间轴平滑半径和空间轴平滑半径。模型试验表明,小的平滑半径可以很好地压制多次波,但容易损伤有效波,大的平滑半径在保护有效波方面有优势,但压制多次波的效果较差,因此,在实际应用该技术时需要根据资料特征选取合适的正则化参数。实际资料处理结果表明,作为一种新颖的匹配滤波方法正则化非平稳回归可有效地从原始资料中减去由自褶积等方法预测出的多次波,并且与常规方法相比去噪效果更好。

致谢: 感谢 Madagascar 开发团队为软件应用者无私分享地震数据处理程序的基础源代码。

表 1 两种方法的处理参数

Table 1 The parameters of two methods

传统匹配滤波参数		正则化参数	
局部窗口大小	120个采样点/20道	时间轴平滑半径	60个采样点
滤波算子长度	10个采样点	空间轴平滑半径	10道

面(黄色箭头指示)的多次波残留。

综上所述,正则化非平稳回归技术较传统方法更具优势,它可以有效消除剖面中的绝大部分多次波能量,尤其是 0.2 s 到 0.55 s 之间被多次波掩盖的有效波得以突出显示,地层同相轴清晰可辨,资料质量明显提高,去噪效果令人满意。

## 参考文献:

- [1] 褚宏宪, 杨源, 张晓波, 等. 高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 70-74.
- [2] 万芑, 牟泽霖, 冯强强. 海洋单道地震勘探震源技术[J]. 中国科技信息, 2015(8): 65-67.
- [3] 杨慧良, 陆凯, 褚宏宪. 海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 1-5.
- [4] 牟泽霖, 李勇航, 万芑, 等. 海洋单道地震探测技术应用[J]. 中国科技成果, 2014(13): 32-33.
- [5] 万芑, 温明明, 吴衡. 高分辨率单道地震技术在深海探测中的应用研究[J]. 地质装备, 2014, 15(4): 33-41.
- [6] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J, WAPENAAR C P A. Adaptive surface-related multiple elimination[J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [7] VERSCHUUR D J, BERKHOUT A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part II: practical aspects and examples[J]. Geophysics, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [8] 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.
- [9] 石颖, 王维红. 基于波动方程预测和双曲Radon变换联合压制表面多次波[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3115-3125.

- [10] 贾连凯, 吴时国, 赵昌奎. 多次波压制技术在南海北部陆缘深水区的应用[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(2): 920-930.
- [11] 宋家文, VERSCHUUR D J, 陈小宏. 多次波压制的研究现状与进展[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(1): 240-247.
- [12] 白淑兰, 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.
- [13] 李丽青, 梁蓓雯, 徐华宁. 海上单道地震资料中多次波的衰减[J]. *石油物探*, 2007, 46(5): 457-462.
- [14] 刘建勋. 提高海上单道反射地震记录信噪比和分辨率的方法技术[J]. *物探化探计算技术*, 2007, 29(S1): 116-120.
- [15] 岳保静. 单道地震资料处理方法及应用[D]. 青岛: 中科院海洋所, 2009.
- [16] 刘伍, 司永峰, 王治华, 等. 上海近岸浅海单道地震多次波特征及压制方法研究[J]. *上海国土资源*, 2016, 37(2): 89-95.
- [17] 邢子浩. 预测反褶积与SRME及其组合方法在海上单道地震多次波压制中的应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2016.
- [18] 王惠东. 海上单道地震资料处理与鬼波去除方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [19] 刘玉萍, 李丽青, 赵斌, 等. 海洋低信噪比单道地震资料特点及处理策略[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(7): 25-33.
- [20] 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*, 2019, 40(1): 1-8.
- [21] FOMEL S. Adaptive multiple subtraction using regularized non-stationary regression[J]. *Geophysics*, 2009, 74(1): 25-33.
- [22] FOMEL S. Shaping regularization in geophysical estimation problem[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): 29-36.
- [23] LIU G, FOMEL S, CHEN X. Time-frequency analysis of seismic data using local attributes[J]. *Geophysics*, 2011b, 76: 23-34.
- [24] LIU C, CHEN C, WANG D, et al. Seismic dip estimation based on the two-dimensional Hilbert transform and its application in random noise attenuation[J]. *Applied Geophysics*, 2015, 12: 55-63.
- [25] LIU G C, CHEN X H, DU J, et al. Random noise attenuation using f-x regularized nonstationary autoregression[J]. *Geophysics*, 2012, 77(2): 61-69.

## APPLICATION OF ADAPTIVE MATCHING SUBTRACTION BASED ON REGULARIZED NONSTATIONARY REGRESSION IN SINGLE CHANNEL SEISMIC MULTIPLES ATTENUATION

XING Zihao<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>1,2</sup>, YANG Depeng<sup>3</sup>, YANG Ce<sup>1</sup>, ZHAI Jifeng<sup>1</sup>,  
ZHOU Dasen<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>1</sup>, WEI Chenglong<sup>1</sup>

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China;

2 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China;

3 North China Sea Marine Technical Support Center, State Ocean Administration, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** Multiples attenuation is critical for single channel seismic data processing, and the adaptive matched filtering is one of the key techniques to be used for the purpose. However, the traditional matched filtering algorithms are not always adequate to the description of nonstationary seismic signal changes with time and space. To solve this problem, the regularized nonstationary regression is proposed. This paper studies the application of regularized nonstationary regression, starting from basic principles, then testing regularization parameters using model data to pursue their influence on processing effect, and finally applying this technology to predict subtraction process of field data. As the result, multiples are effectively attenuated. Practical application demonstrates that the method has great advantages comparing to the traditional method in multiple attenuation.

**Key words:** single channel seismic; multiples attenuation; regularized nonstationary regression; marine seismic exploration