

文章编号:1009-2722(2018)12-0061-07

# 基于多元经验模态分解的多道地震相干噪声压制方法研究

晏红艳<sup>1,2</sup>, 丘斌煌<sup>1,3\*</sup>, 李 勇<sup>3</sup>, 方中于<sup>1</sup>, 常 坤<sup>1</sup>

(1 中海油田服务股份有限公司物探事业部特普公司, 广东湛江 524057;

2 西南石油大学石油与天然气工程学院, 成都 610500;

3 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059)

**摘 要:**地震勘探采集到的地震信号中往往包含大量的相干噪声, 这些相干噪声常常使得资料质量变得很差, 从而严重的妨碍了科研工作者进行正确的地震解释, 因此对相干噪声进行压制就显得十分必要。而传统的相干噪声压制方法在消除相干噪声同时往往会对有效信号造成一定程度的损害, 或者根本无法有效压制干扰波。为了解决以上问题, 从多道联合时频率分析角度出发, 结合利用 EMD 数据驱动分解特性, 提出了基于多元经验模态分解的多道地震相干噪声去除方法, 能够在有效去除相干噪声同时, 保证有效信号不受伤害。本文通过模型和实际资料的处理充分证明了基于多元经验模态分解的降噪方法的有效性和稳健性。

**关键词:**相干噪声; 多道降噪; 多元经验模态分解; 地震勘探

中图分类号: P736; P631.4<sup>+43</sup>

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2018.12008

## 1 引言

信号噪声分离在地球物理勘探中一直是一个具有挑战性的课题, 在地震资料处理中更是如此。地震噪声主要可以分为随机噪声和规则噪声两类。随机噪声是道与道之间的能量没有规律, 具有随机性的噪声; 相干噪声是地震剖面之间能量具有规律性噪声, 因此, 通过采集和叠加的办法来

压制它就变得很困难。在反射地震学中, 强相干噪声通常使资料质量变得很差。因此, 有效压制相干噪声对提高地震资料质量就显得非常重要。

地震相干噪声是一种相对规则的干扰波, 目前常用的去噪方法主要有: ①在国外, 主要使用基于变换域方法去除相干噪声, 常用的变换域方法 tau-p 变换<sup>[1]</sup>、拉东变换<sup>[2]</sup>、*f-x* 域滤波<sup>[3]</sup>、eigen-image 滤波器<sup>[4]</sup>、基于小波变换分解<sup>[5]</sup>, radial trace 域<sup>[6]</sup>和 curvelet 变换<sup>[7]</sup>等。②在国内, 王兆湖等<sup>[8]</sup>提出了一种利用频域自适应滤波的方法; 高少武等<sup>[9]</sup>提出了时间-空间域自适应相干噪声衰减技术; 鲁娥等<sup>[10]</sup>采用相似函数压制端点效应和截断效应的混合拉东变换从地震剖面中一次性分离面波等线性噪声, 再用自适应滤波技术在拉东域识别并剔除噪声; 覃天<sup>[11]</sup>主要利用了小波变换的分频特性来压制相干噪声。这些现有传统的

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(41774059); 中海油田服务股份有限公司科技项目(WTB18YF020)

作者简介: 晏红艳(1985—), 女, 工程师, 主要从事海洋地震资料处理分析研究工作。E-mail: yanhy1@cosl.com.cn

\* 通讯作者: 丘斌煌(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地震资料处理分析研究工作。E-mail: qiubh@cosl.com.cn

压制技术在衰减相干噪声的过程中,有的会产生一些新的干扰,有的会导致衰减后能量不均,甚至会对损害有效信号,压制相干噪声的效果都不理想。

经验模态分解(EMD)变换方法<sup>[12]</sup>是一种数据驱动的自适应非线性时变信号分解方法,该方法自适应性较好,任何复杂的信号都能被分解为有限数量的简单分量之和。因此,笔者将 EMD 方法引用到压制相干噪声的工作中。但是传统 EMD 适用于一维实信号分解,对于多元信号(也就是多通道信号)的地震信号处理,EMD 方法往往需要分别对单一通道信号求解,这样就可能导致各通道信号分解的固有模态函数(IMF)的个数和频率尺度不同,即存在不同通道的振荡模式校准问题,不利于作为多通道信号地震信号在各道集间的同步相关分析。

针对传统 EMD 方法存在的问题,本文利用经验模态分解(EMD)按照频率尺度自适应处理信号的能力以及多变量经验模态分解(MEMD)处理多道关联信息的优势<sup>[13]</sup>。对地震资料的相干噪声,从多道联合处理角度出发,结合 MEMD 的频率尺度自适应的分解能力,提出一种基于多元经验模态分解的多道地震相干噪声去除方法,试验结果验证了提出方法的有效性与稳健性。

## 2 方法原理

### 2.1 多元经验模态分解原理

MEMD 实现了多道信号同步分析,每个通道分解出的 IMF 个数相等,各通道对应的 IMF 按频率尺度对齐,形成一系列多元 IMF。MEMD 算法如下:

设一个  $n$  维向量组序列  $\{v(t)\}_{t=1}^T = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$ , 代表一个  $n$  元信号, 信号序列长度为  $T$ ,  $x_n^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$  表示在  $(n-1)$  维球面上对应角  $\theta^k = \{\theta_1^k, \theta_2^k, \dots, \theta_{n-1}^k\}$  的方向向量集。如果要在球面空间上建立  $K$  个方向向量, 那么  $k=1, 2, 3, \dots, K$ 。

(1) 采用 Hammersley 序列采样法, 在  $(n-1)$  维球面上获得合适的均匀采样点集, 即得到  $n$  维空间的方向向量。

(2) 计算输入信号  $v(t)$  在每个方向向量  $x_n^k$  上的映射  $p^k(t)$ 。

(3) 确定所有方向向量的映射信号  $\{p^k(t)\}_{k=1}^K$  极值对应的瞬时时刻  $\{t^{\theta_k}\}_{k=1}^K$ ,  $l$  表示极值点位置,  $l \in [1, T]$ 。

(4) 用多元样条插值函数插值极值点  $[t^{\theta_k}, v(t_1^{\theta_k})]$ , 得到  $K$  个多元包络  $\{e^{\theta_k}(t)\}_{k=1}^K$ 。

(5) 对球空间  $K$  个方向向量(图 1),  $n$  元信号均值  $m(t)$  为:

$$m(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{\theta_k}(t)$$

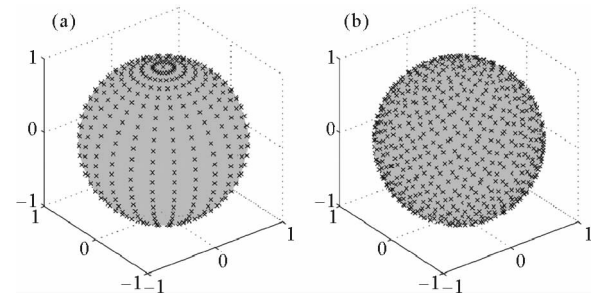


图 1 超球面上映射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of supper hypersphere

(6) 通过  $h(t) = v(t) - m(t)$  提取固有模态函数  $h(t)$ , 如果  $h(t)$  满足多元 IMF 判断标准, 那么就将  $v(t) - h(t)$  结果当做第(2)步的输入信号, 继续(2)~(6)步迭代计算, 提取新的多元 IMF 分量  $h(t)$ ; 否则, 将  $h(t)$  当做第(2)步的输入信号, 继续执行(2)~(6)步迭代。

经过一系列的 MEMD 分解过程, 和 EMD 算法类似, 原  $n$  元信号  $\{v(t)\}_{t=1}^T = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)\}$  被分解为一系列 IMF  $\{h_i(t)\}_{i=1}^q$  和余量  $r(t)$  的加和形式, 如下:

$$v(t) = \sum_{i=1}^q h_i(t) + r(t)$$

式中:  $q$  表示分解出的多元 IMF 层数;

$h(t)$  为  $\{h_1^1(t), h_1^2(t), \dots, h_1^n(t)\}_{i=1}^T$ ;

$r(t)$  为  $\{r_1^1(t), r_1^2(t), \dots, r_1^n(t)\}_{i=1}^T$ , 分别对应于  $n$  元信号的  $n$  组 IMF 分量(图 2)和  $n$  个余量。

多元信号每个通道分解出的 IMF 个数相同, 每层  $M$  之间频率不同, 最先分解出的 IMF 频率高, 而后分解出的 IMF 频率低, 分解的余量频率最低。  $n$  元信号每一元变量对应的  $M$  在  $n$  个通

道中按频率尺度对齐,形成多元 IMF,如图 3 所示。

### 2.2 基于 MEMD 的地震信号相干噪声压制方法

首先要明确如何使用经典 EMD 去除地震噪声,基于对很多地震数据而言,随机噪声和任何陡峭的相干噪声在  $f-x$  域中高波数能量的贡献比有效信号的贡献要大得多,也就是高波数位置大部分是相干噪声和随机噪声的内容。而 IMF1 代表数据中最快的振荡,即其包含在恒定频率切片中  $f-x$  域高波数部分。因此,可以通过从数据每个固定频率中减去 IMF1 的成分来实现相干噪声压制,从而增强信噪比的目的。

实际地震数据是高维的,经典的 EMD 分解方法则是对单道地震进行分解处理,而相干噪声与随机高斯白噪声不同,它在多道地震道上都是

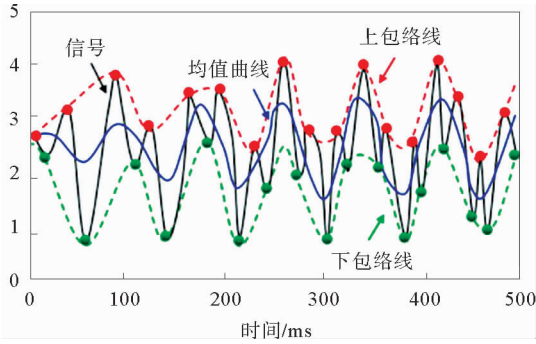


图 2 多元经验模态分解效果图

Fig. 2 Decomposition results of MEMD

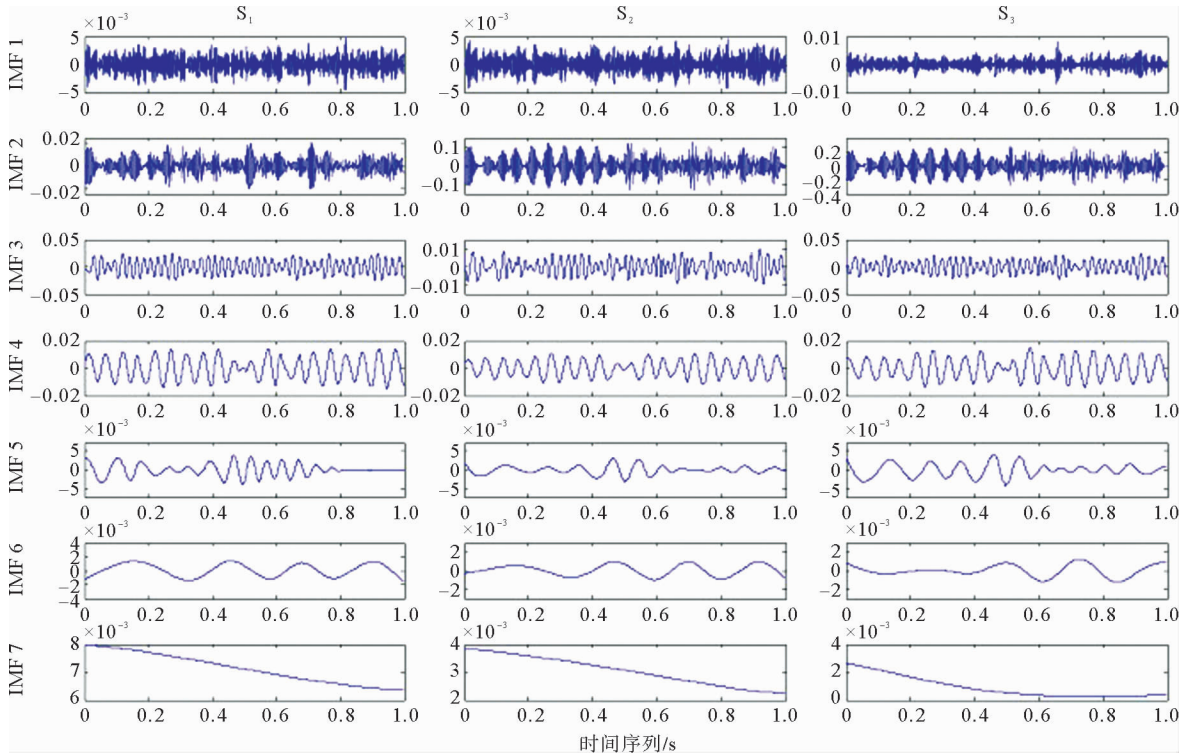


图 3 多元经验模态分解效果图

Fig. 3 Decomposition results of MEMD

有关联的。所以最好的压制噪声的方法是进行多道联合分析,从而提高相干噪声压制能力。

多元经验模态分解方法与传统 EMD 去除相干噪声方法最大的区别是可以对多个 CDP 的叠前道集进行联合时频分解,避免存在不同 CDP 的振荡模式校准问题,同时去除 IMF1 成分,从而提

升了相干噪声压制的效果。

基于以上分析,笔者提出了基于 MEMD 的多道相干噪声压制算法,也称为  $f-x$  MEMD 滤波。其具体流程如下:

输入: 选择将一个数据立方体窗口,得到叠前地震数据  $S_i(t, offset), i=1, \dots, N$ ; 其中  $S_i$  表示

叠前道集,  $N$  表示 CDP 数目。

输出: 滤波后的地震数据  $\hat{S}_i(t, offset)$

第 1 步: 将数据  $S_i(t, offset)$  通过 FFT 变换转换到  $f-x$  域  $S_i(f, offset)$ ;

第 2 步: 对于不同 CDP 中每个单频  $f_j$  数据  $v_j(offset) = S_i(f_j, offset)$  进行 MEMD 分解, 利用公式

$$v_j(offset) = \sum_{i=1}^q h_i(offset) + r(offset)$$

得到 IMF  $\{h_i(offset)\}_{i=1}^q$

第 3 步: 对于 IMF  $\{h_i(offset)\}_{i=1}^q$ , 分离实部和虚部。

第 4 步: 对于实部, 减去 IMF1 获得滤波后实部信号。

第 5 步: 对于虚部, 重复第四步。

第 6 步: 结合第四步和第五步, 组合以产生滤波后单频  $f_j$  的复信号。

第 7 步: 对所有单频  $f_j$ , 重复第 2 步至第 7 步, 得到整个滤波后的  $f-x$  域系数  $\hat{S}_i(f, offset)$ , 将数据进行 iFFT 变换回  $t-x$  域  $\hat{S}_i(t, offset)$ 。

本文提出的基于 MEMD 的相干噪声压制算法与  $f-x$  反褶积最大不同:  $f-x$  反褶积是对所有的频率使用固定的滤波长度; 而 MEMD 方法是根据数据的平滑度自适应地匹配它的分解, 这提供了对每一个频率实施不同滤波方案的机会, 这也是数据驱动方法的优点。

基于 MEMD 的相干噪声压制算法与基于 EMD 的相干噪声压制算法最大不同: MEMD 方法进行多个 CDP 叠前数据同步关联分析, 这样更符合相干噪声的多道特性, 可以更有效地压制相干噪声。值得强调的是在每个频率上仅删除了 IMF1 成分, 实现这个方案也是最简单的。在后面实际地震资料测试中也可以发现几乎所有数据集中取得很好的结果。

### 3 理论模型分析

为了检验基于多元经验模态分解的有效性, 建立一个二维模型, 在模型中加不同的相干噪声和高斯白噪声, 采用不同的阈值值来进行去除噪声试验。图 4 是复杂的“气云”二维模型和正演记录。在勘探目标上面存在很多规模大小、埋深各异的浅层天然气(如图中的各色条带), 这些浅层天然气就会在目标上方形成“气云”, 这是实际海上勘探中存在的一个难题。依此构建的模型为上层为水层, 下方岩层形态不规则。由正演数据可以看出, 由于受到“气云”的影响, “气云”下方的地震数据振幅能量差异大, 噪声复杂多样, 有效信号淹没在噪声中。

图 5 和图 6(图 5 的局部放大图)是二维模型数据应用 MEMD 得出的结果, 其中(a)为原始剖面, (b)为去噪后的剖面, (c)为去除的噪声。

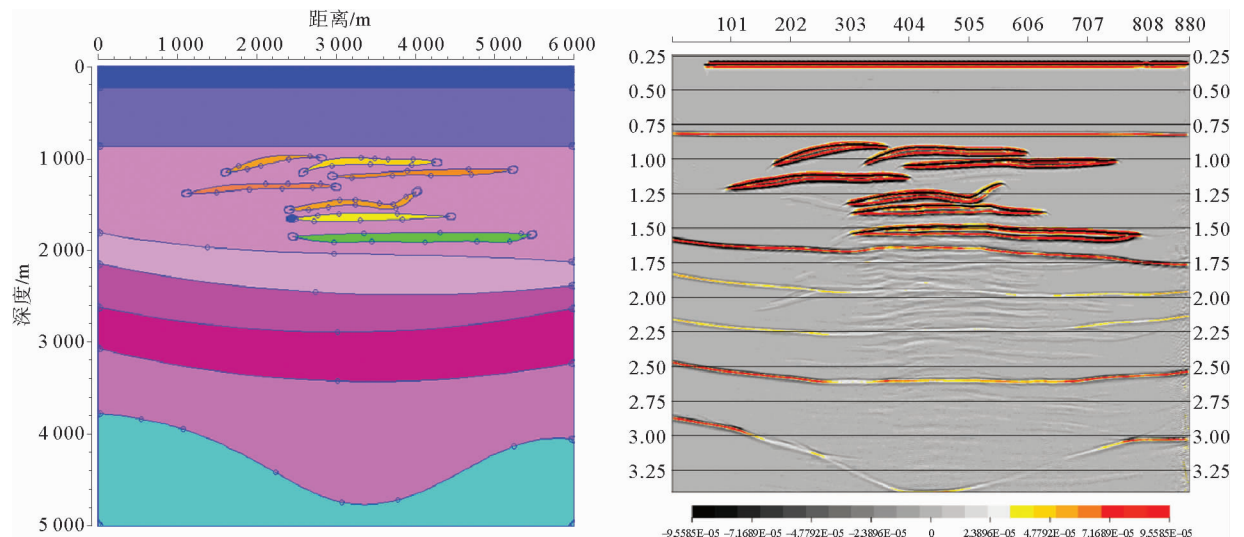


图 4 二维模型及其正演数据

Fig. 4 2D model and forward data



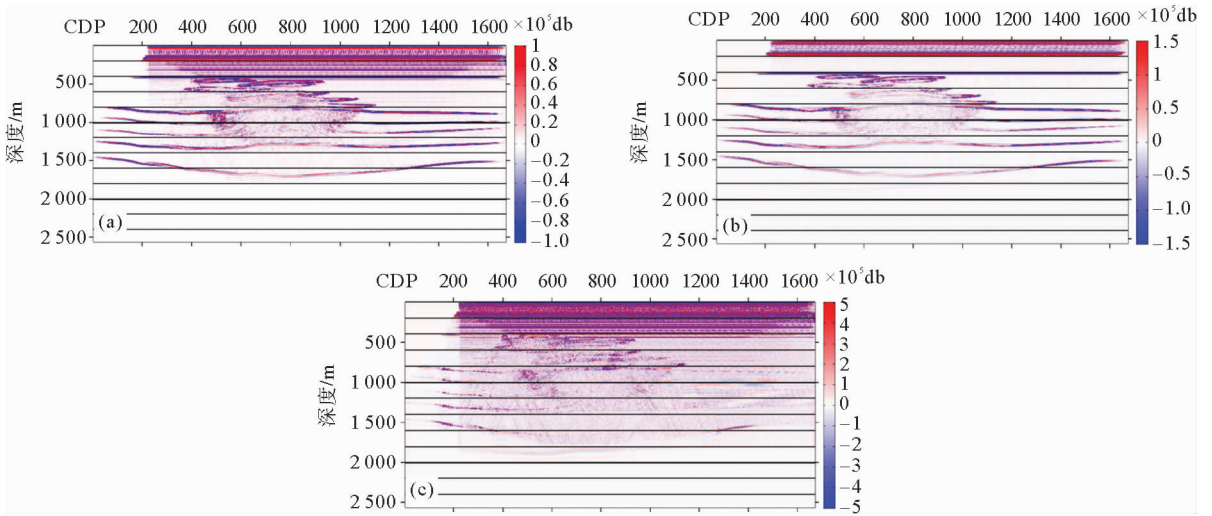


图 5 二维模型数据去噪结果 (a) 原始剖面; (b) 去噪后剖面; (c) 去除的噪声

Fig. 5 2D model denoising section: (a) raw data; (b) denoising section; (c) removed noise

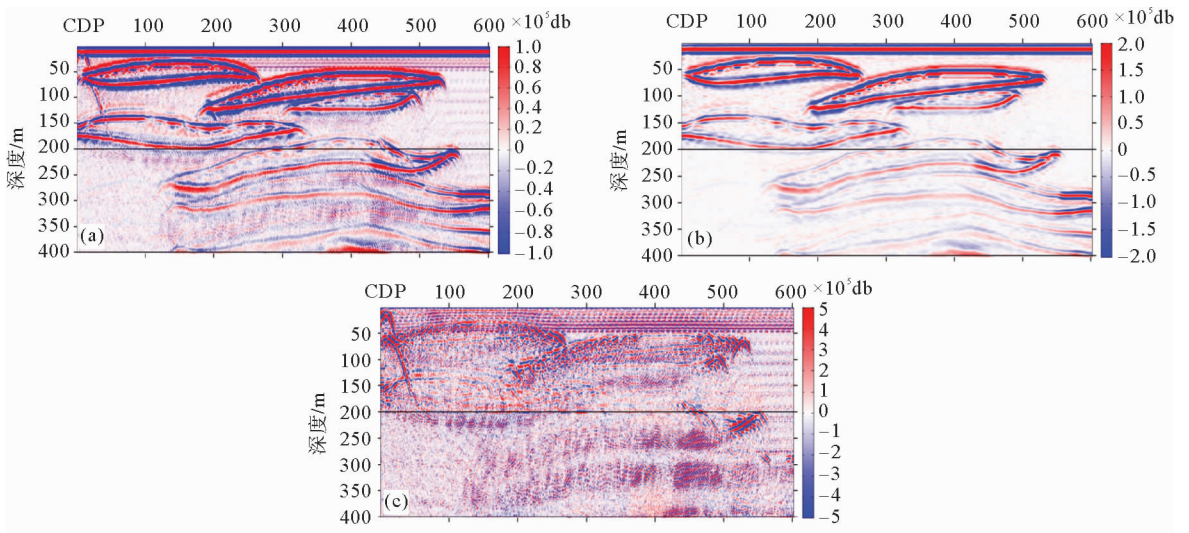


图 6 二维模型数据降噪结果: (a) 原始剖面; (b) 去噪后剖面; (c) 去除的噪声

Fig. 6 2D model denoising section: (a) raw data; (b) denoising section; (c) removed noise

从以上两张图对比来看,基于 MEMD 的相干噪声压制算法估计出的地震有效反射信号得到了很好的恢复,并且其提取的精度也比较高。剖面的连续性比原剖面保持得更好。由此可以证明本算法在地震弱信号提取的正确性、有效性。

#### 4 实际资料处理试验

上面小节使用模型数据验证本文提出算法的正确性和有效性。现在需要从实际资料的角度来验证本文提出算法的有效性和稳健性。

本文选取了南海某工区的拖缆采集的三维数据,该工区数据浅层信噪比较高,中深层受火山屏蔽影响,信噪比较低,比较适合用来检验本文方法的有效性和适应性。

图 7 和图 8 是对不同实际的地震资料进行验证。图 7 是信噪比相对较高的区域,而图 8 则是信噪比相对较低的区域。从图 7 处理效果来看,本文方法有效去掉了图 7a 中不易察觉的相干噪声,提升了信号的信噪比,去掉的相干噪声在图 7c 中非常明显,是一组陡倾角噪音。图 8 信噪比低的剖面通过使用本文方法得到大幅度的提升,

原来图 8a 中得同相轴只能隐约可见,通过本文算法的处理,在图 8b 中,同相轴则变得非常清晰,为后续反演等应用提供了较好的基础数据。图 8c 去除的噪声也是非常复杂,既有高斯噪声也有相

干噪音。

综合上述图 7、图 8 去噪结果对比,本文提出的算法对各种实际资料中的高斯噪声和相干噪声,有比较好的去除效果。

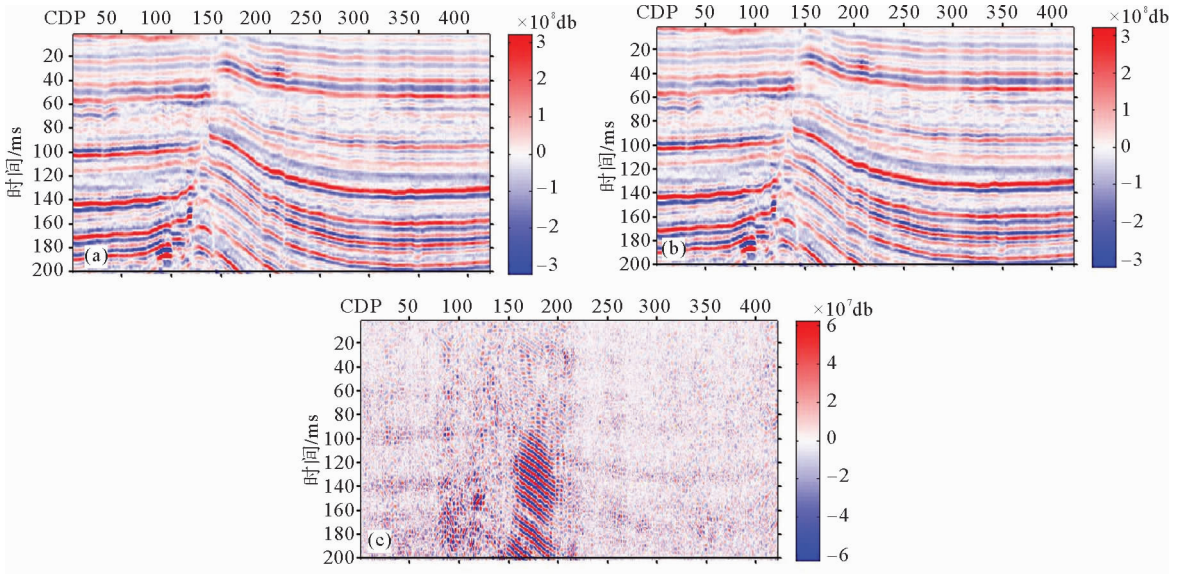


图 7 高信噪比数据去噪对比图:(a)去噪前剖面;(b)去噪后剖面;(c)去除的噪音

Fig. 7 Denoising section of high S/N area: (a)raw data; (b)denoising section; (c) removed noise

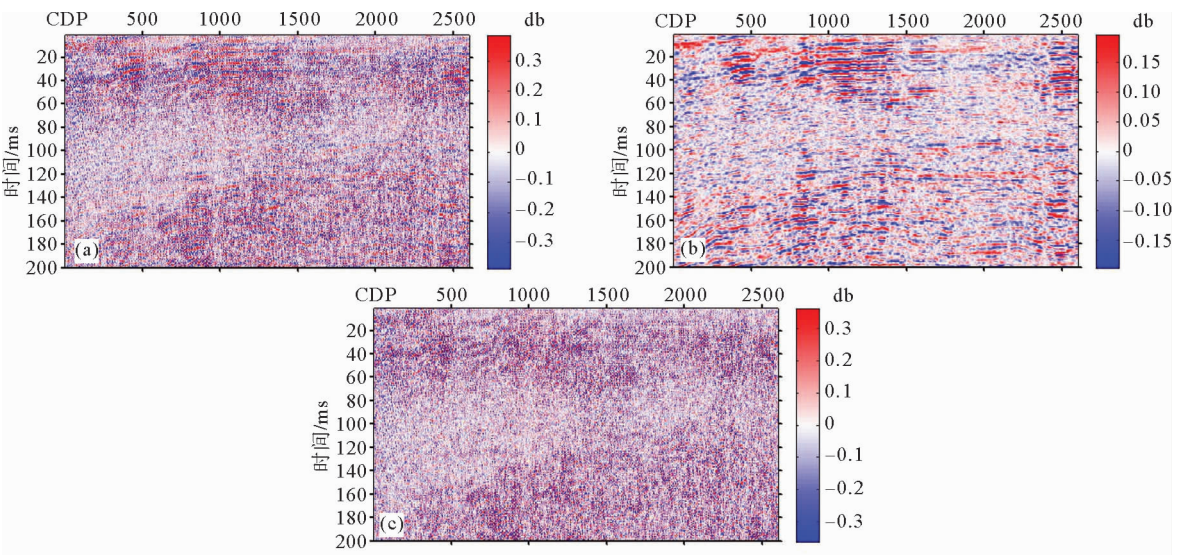


图 8 低信噪比数据去噪对比图:(a)去噪前剖面;(b)去噪后剖面;(c)去除的噪音

Fig. 8 Denoising section of low S/N area: (a)raw data; (b)denoising section; (c) removed noise

## 5 结语

相干噪声压制对地震资料处理是十分重要

的。传统的相干噪声压制方法在消除相干噪声同时往往会对有效信号造成一定程度的损害,或者根本无法有效压制干扰波。本文从多道联合时频率分析角度出发,结合利用EMD数据驱动分解

特性,提出了基于多元经验模态分解的多道地震相干噪声去除方法,能够在有效去除相干噪声同时,保证有效信号不受伤害。本文通过模型和实际资料的处理充分证明了基于多元经验模态分解的降噪方法的有效性和稳健性。

#### 参考文献:

- [1] Turner G. Aliasing in the tau-p transform and the removal of spatially aliased coherent noise[J]. *Geophysics*, 1990, 55(11): 1496-1503.
- [2] Nuzzo L. Coherent noise attenuation in GPR data by linear and parabolic Radon Transform techniques[J]. *Annals of Geophysics*, 2003, 46(3): 533-547.
- [3] Laster S J, Meek R A, Shirley T E. Method for removing coherent noise from seismic data: U. S. Patent 5,191,526 [P]. 1993-3-2.
- [4] Chiu S K, Howell J E. Attenuation of coherent noise using localized-adaptive eigenimage filter [M] // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008. Society of Exploration Geophysicists, 2008: 2541-2545.
- [5] Nuzzo L, Quarta T. Improvement in GPR coherent noise

attenuation using  $\tau$ -p and wavelet transforms[J]. *Geophysics*, 2004, 69(3): 789-802.

- [6] Henley D C. Coherent noise attenuation in the radial trace domain[J]. *Geophysics*, 2003, 68(4): 1408-1416.
- [7] Neelamani R, Baumstein A I, Gillard D G, et al. Coherent and random noise attenuation using the curvelet transform [J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(2): 240-248.
- [8] 王兆湖,王建民,高振山,等. 叠前自适应 f-x 域相干噪声衰减技术及应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2605-2610.
- [9] 高少武,赵波,周兴元. 自适应相干噪声衰减技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(3): 242-246.
- [10] 鲁娥,李庆春. 混合 Radon 变换地震噪声压制的应用 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(4): 706-710.
- [11] 覃天. 基于小波分频叠前相干噪声压制方法[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(4): 1426-1430.
- [12] Bekara M, van der Baan M. Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition [J]. *Geophysics*, 2009, 74(5): 89-98.
- [13] Rehman N, Mandic D P. Multivariate empirical mode decomposition [J]. *Proceedings Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2010, 466(2117): 1291-1302. DOI: 10.1098/rspa.2009.0502.

## MULTIVARIATE EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION BASED MULTITRACE SEISMIC COHERENT NOISE REMOVAL

YAN Hongyan<sup>1,2</sup>, QIU Binhuang<sup>1,3\*</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, FANG Zhongyu<sup>1</sup>, CHANG Kun<sup>1</sup>

(1 Data Processing Co. Geophysical-China Oilfield Services Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China;

2 School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3 College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Seismic signals collected by seismic surveys often contain a large amount of coherent noises, which often results in poor data quality and seriously impedes researchers from performing correct seismic interpretation. Therefore, suppression of coherent noises is quite significant and necessary. The traditional method to eliminate coherent noises, however, may often cause a certain degree of damage to the effective signals at the same time, or simply lack the capability to suppress the interference wave. In order to solve the above problems, this paper proposes a multi-trace seismic coherent noise removal method based on multivariate empirical mode decomposition combined with EMD data-driven decomposition from the perspective of multi-joint frequency analysis, which can effectively remove coherent noises and ensure effective signals not to be hurt. In this paper, the superiority and robustness of noise reduction method based on multivariate empirical mode decomposition are fully proved by the processing of model and actual data.

**Key words:** coherent noise; multi-trace denoise; multivariate empirical mode decomposition; seismic survey