

# 三维表面多次波压制方法

马继涛\*<sup>①②</sup> 陈小宏<sup>①②</sup> 薛亚茹<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; <sup>②</sup>中国石油大学(北京)CNPC 物探重点实验室,北京 102249)

马继涛,陈小宏,薛亚茹. 三维表面多次波压制方法. 石油地球物理勘探,2015,50(1):33-40.

**摘要** 地震数据处理中二维情况下的表面多次波压制(SRME)算法已很成熟;但在三维情况下,当地下地层在横测线方向存在一定倾角时,利用二维 SRME 算法进行多次波预测存在一定误差,且通过自适应相减无法弥补所预测多次波模型的误差,因此开发了三维 SRME 算法。由于地震数据采集的限制,三维情形下震源和检波器在横测线方向分布过于稀疏,直接将二维 SRME 算法拓展到三维无法准确预测多次波。本文假定三维情况下每道记录对应的多次波贡献道集是一个双曲线形态,通过对对应多次波贡献道集进行稀疏反演,实现了三维情况下多次波的预测。模拟三维数据的处理结果验证了方法的可行性与有效性。

**关键词** 三维表面多次波压制 稀疏反演 贡献道集 地震数据处理

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.01.006

## 1 引言

多次波压制一直是地震数据处理的重点与难点之一。多次波的存在影响地震成像的可靠与真实性,也影响地震资料解释结果。因此,进行多次波的压制尤为重要。

在诸多多次波压制方法中,最为突出的当属 Verschuur 等<sup>[1,2]</sup>提出的表面多次波压制(Surface Related Multiple Elimination, SRME)方法。该方法的优势是完全数据驱动,不需地下介质的任何信息,也不需考虑地震波在地下传播的细节,如 AVO 效应、波的模式转换、层间多次波的影响等。SRME 对地震波传播时入射角及波场的复杂度均无要求,但该算法要求所采集的地震数据是规则化数据,如典型的要求为地震数据中由零炮检距至最大炮检距区间均有数据分布、炮点间隔与检波点间隔相等、检波点在同一条直线上、不存在拖缆漂移等。

二维 SRME 算法已相当成熟,并得到广泛应用。SRME 算法自身的理论基础是基于三维的,且适用于全三维数据表面多次波的预测。然而,由于常用采集系统在横测线方向采样严重不足,无法实施三维 SRME 算法;另外计算量巨大也限制了其在

工业界的应用。但二维算法假设地下构造和采集系统是二维的,当地层沿横测线方向存在一定倾角或拖缆存在漂移时,多次波在表面发生下行反射的位置处于该二维测线垂直平面以外;利用二维 SRME 算法进行多次波预测时,其二次震源位置无法取在该垂直平面以外,因此预测的多次波就会存在一定误差。在横测线方向地层倾角较小或拖缆漂移位移量较小时,利用自适应相减可校正所预测多次波的误差;然而当横测线方向地层倾角较大或拖缆漂移位移量较大时,仍利用自适应相减就无法弥补所预测多次波的误差。尽管人们采取种种措施,使得采集数据满足二维 SRME 算法的要求,如沿着构造最大倾角方向布线,尽量减小拖缆漂移位移量等,然而实际采集中总存在种种误差,使得所采集地震数据无法满足二维算法的假设。因此开发三维 SRME 算法势在必行,要求三维 SRME 算法能避免前文提到的种种限制。

现今计算机技术的快速发展,已可承受三维 SRME 巨大的计算量。然而实际观测系统采集到的数据仍然存在采样不足的问题。依据对采样不足问题的处理方式,可将三维 SRME 方法分为两类:一为插值后进行全三维表面多次波的预测,或在预测过程中进行插值处理;二为不做插值,直接用稀疏

\* 北京昌平府学路中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,102249. Email:majitao1983@126.com

本文于2013年12月23日收到,最终修改稿于2014年12月12日收到。

本研究受中国石油科技创新基金项目(2013D-5006-0301)和国家科技重大专项课题(2011ZX05023-005-005)联合资助。

反演进行三维多次波预测。下面简介三维 SRME 方法的发展历程。

开始阶段,人们针对三维多次波的主要思路是进行二维算法预测,并对自适应相减方法做一定改进<sup>[3,4]</sup>,该类算法的主要思路是利用一些先验信息,如海水深度、速度、地层倾角等,计算出三维情况下表面多次波的旅行时,并校正二维算法的预测结果,而后再进行自适应相减操作。当然,此类算法仍然不是真正意义上的三维预测,所预测的多次波也存在一定误差。对于真三维表面多次波预测,该算法要求表面上震源和检波点在纵测线和横测线两个方向上密集、规则分布,由于现今实际采集的数据还无法满足该项要求,人们一开始想到的方法是在横测线方向进行插值处理,再做多次波预测<sup>[5~8]</sup>;由于此插值处理是在三维表面多次波预测之前进行,被称为全局数据重建,该重建过程的目标是重建出三维 SRME 所需的全部数据。与之不同的是在多次波预测过程中进行插值,Sun<sup>[9]</sup>假设同一 CMP 道集中地震道随角度无变化,因此可先进行多次波预测,再做插值处理,然后在横测线方向通过一个稀疏反演运算重建菲涅尔带,得到三维表面多次波预测结果。该算法与全局数据重建后进行三维 SRME 相比,计算效率提高了。van Dedem 等<sup>[10,11]</sup>基于 Sun<sup>[9]</sup>的方法,提出利用多次波贡献道集重建进行三维 SRME 的方法。即首先沿纵测线方向对多次波进行预测,得到由有限几个地震道组成的多次波贡献道集,道集中每个地震道代表一个震源对该多次波的贡献。这些多次波贡献道集由弯曲同相轴构成,若是理想的三维数据体,对该多次波贡献道集求和即可得到要预测的多次波;实际数据的多次波贡献道集地震道极为稀疏,直接求和会导致严重的频散现象,因此需对多次波贡献道集中的地震道做插值处理;由于地震道数有限,直接插值效果差,需加入一些先验信息改进插值效果。van Dedem 等<sup>[10,11]</sup>假设多次波贡献道集具有双曲线形态,利用稀疏反演法描述由有限几个地震道构成的双曲线形态同相轴,即一个多次波贡献道集,得到双曲 Radon 域模型记录,再通过双曲 Radon 正变换得到规则密集采样的多次波记录,从而达到真实三维表面多次波预测目的。Hokstad 等<sup>[12]</sup>和 van Borselen 等<sup>[13]</sup>也采用类似思路进行三维 SRME 运算,他们将方法中顶点移动的双曲线替代为顶点移动的抛物线,故可将在时间域

进行的双曲 Radon 变换改为在频率域进行,以便在减小计算量的同时,还能保持多次波预测的准确度。

在中国国内,李宏图等<sup>[14]</sup>介绍了三维 SRME 技术的现状及实现途径,并利用三维 SRME 技术进行了多次波压制处理,与二维压制结果的对比表明,三维 SRME 技术具有明显优势。石颖等<sup>[15]</sup>全面介绍了全三维多次波预测算法的理论、计算方法及实现条件,并利用 GPU 技术加速全三维 SRME,提高了计算效率,但该文并未提及横测线方向稀疏时的三维表面多次波的预测情况。

本文在上述研究基础上实现了对纵测线方向多次波贡献道集的计算,得到多次波贡献道集并对其进行稀疏反演计算,并最终预测出三维表面多次波。基于模拟数据,本文展示了三维 SRME 的全过程,并与二维 SRME 结果进行对比,显示出三维 SRME 的明显优势。

## 2 三维 SRME 算法原理

### 2.1 二维形式的 SRME

SRME 方法的理论公式推导是利用地震数据波场的传播矩阵实现的,该矩阵的具体形式可参考 Berkhout 的相关论文<sup>[16]</sup>。

对于二维数据的多次波压制,可利用如下迭代形式实现

$$\mathbf{P}_0^-(\omega)^{(n+1)} = \mathbf{P}^-(\omega) - A(\omega)\mathbf{P}_0^-(\omega)^{(n)}\mathbf{P}^-(\omega) \quad (1)$$

该式左侧代表压制掉第 1~n 阶多次波的一次波数据,循环迭代初值可用原始地震数据代替。每次迭代都会利用自适应相减,将多次波压制简化为一个线性问题。迭代的次数取决于数据中多次波出现的最高阶数,实际数据处理时,对常规地震数据采用一次迭代(预测+相减)即可。

### 2.2 三维形式的 SRME

二维 SRME 的矩阵形式对于三维同样成立。频率域的多次波模型可通过两个数据矩阵的乘积得到

$$\bar{\mathbf{M}}^-(\omega)^{(n)} = \mathbf{P}_0^-(\omega)^{(n)}\mathbf{P}^-(\omega) \quad (2)$$

由该式可看出,对于多次波矩阵  $\bar{\mathbf{M}}^-$  中某个元素的预测,需用矩阵  $\mathbf{P}_0^-(\omega)^{(n)}$  的第  $i$  行与矩阵  $\mathbf{P}^-(\omega)$  第  $j$  列的点积得到。将相乘改写为以震源和检波点空间位置为坐标的求和形式,则有

$$\begin{aligned} \bar{M}(x_r, y_r, x_s, y_s, \omega) &= \sum_{y_k} \sum_{x_k} P_0(x_r, y_r, x_k, y_k, \omega)^{(n)} P(x_k, y_k, x_s, y_s, \omega) \\ &= \sum_{y_k} \sum_{x_k} M_{xy}(x_r, y_r, x_s, y_s, x_k, y_k, \omega) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $(x_r, y_r)$  为检波点坐标;  $(x_s, y_s)$  为炮点坐标;  $(x_k, y_k)$  为求和变量, 即炮点和检波点出现的空间坐标位置。三维表面多次波预测实现的过程, 与二维 SRME 类似, 仍是一个地表一致性的褶积过程, 通过一个三维共检波点道集与三维共炮点道集的褶积实现多次波预测。式(3)中三维多次波的预测有两次求和过程, 可分为两步进行。

(1) 通过对三维多次波贡献道集沿纵测线  $(x_k)$  方向的求和运算, 得到横测线多次波贡献道集

$$\begin{aligned} M_y(x_r, y_r, x_s, y_s, \omega) &= \sum_{x_k} M_{xy}(x_r, y_r, x_s, y_s, x_k, y_k, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 对横测线多次波贡献道集沿横测线  $(y_k)$  方向求和, 得到预测三维多次波, 它与真实多次波存在一定的振幅和相位差别, 称为多次波模型记录, 即

$$\begin{aligned} \bar{M}(x_r, y_r, x_s, y_s, \omega) &= \sum_{y_k} M_y(x_r, y_r, x_s, y_s, y_k, \omega) \end{aligned} \quad (5)$$

预测得到多次波后, 再通过时在空域进行自适应相减去除多次波。

### 3 三维 SRME 实际运算中的问题

由于实际观测系统采集中诸多因素的限制, 对于三维海洋数据体, 直接应用三维 SRME 算法无法

得到令人满意的多次波预测结果。在诸多的限制因素中, 最为突出的有两个: 一为炮点和检波点沿两个方向的空间采样间隔的不同; 二为所采集数据区域孔径的大小。下面本文利用一个模拟数据来测试上述两个因素的影响。

本文模型由两个界面组成: 第一个界面在  $x$  方向倾角为  $-8^\circ$ ,  $y$  方向倾角为  $8^\circ$ ; 第二个界面在  $x$  方向倾角为  $15^\circ$ ,  $y$  方向倾角为  $-10^\circ$ 。两层介质的速度分别为 1500, 2000m/s, 密度分别为 1.0, 2.5 g/cm<sup>3</sup>, 两个分界面对应的深度分别为 500, 1000m。

在此模型测试中, 利用前文的三维 SRME 算法(式(3))计算单个地震道的多次波。预测过程分为两步, 首先利用式(4)对纵测线方向的道集进行求和, 得到横测线方向的多次波贡献道集; 然后利用式(5)做横测线方向的求和运算, 得到三维地震道所对应的多次波记录。

密集规则采样时, 纵测线及横测线方向检波器间隔均为 25m, 横测线方向孔径  $y_k$  为  $-1000 \sim 1000$ m, 利用式(4)求得的多次波贡献道集个数等同于横测线方向检波器的个数, 在此为 81 道(图 1a); 而稀疏采样时, 纵测线方向采样点间隔仍为 25m, 横测线方向采样点间隔变为 400m, 孔径  $y_k$  为  $-400 \sim 400$ m, 利用式(4)求得的多次波贡献道集个数为 3 道(图 1b); 对图 1a 和图 1b 利用式(5)进行横测线方向的求和运算, 得到的多次波预测结果分别为图 1c 中的第 2 及第 3 道。

由图 1 可看到, 如果地震数据采集时为全三维数据采集, 可很好地预测出多次波记录(图 1c 的第 2 道); 而实际地震数据采集无法满足三维 SRME

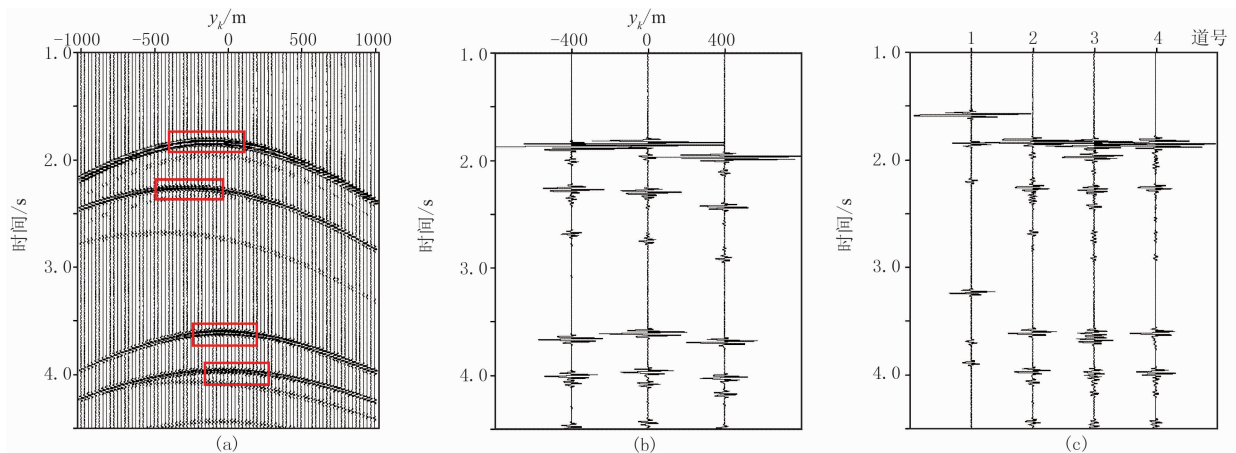


图 1 密集(a)和稀疏(b)采样时计算得到的横测线多次波贡献道集及其 SRME 结果(c)

图 c 中第 1 道为原始地震道, 第 2 和第 3 道分别为对图 a 和图 b 求和得到的多次波记录, 第 4 道为利用本文方法计算得到的多次波记录

方法的要求,从而导致预测出来的多次波记录具有非常严重的假频现象(图 1c 的第 3 道)。若实现三维多次波精确预测,最低要求为:表层观测角度足够大,以覆盖数据同相轴所有的顶点位置(图 1a 中用方框所标注);在观测角度范围内,震源和检波点的间隔足够小,以避免假频的出现。

实际观测系统采集由于经济等因素的限制,无法满足三维 SRME 算法的最低要求,尤其在横测线方向,采样的间隔远远不能满足多次波预测的需求。由于横测线方向的震源极为稀疏,计算多次波贡献道集时,只能在横测线方向震源和检波器大致重合的位置计算多次波贡献道集;多次波贡献道不仅十分稀疏,其采集的方位角也十分有限,直接应用三维 SRME 方法进行横测线菲涅尔带求和,会引入极为强烈的假频噪声。

#### 4 横测线多次波贡献道集—双曲 Radon 变换

由于数据采集的限制,横测线多次波贡献道集中地震道个数极为有限,直接求和会导致严重频散。因此可考虑将式(5)中求和  $\sum y_k$  利用一个变换代替。van Dedam 等<sup>[11]</sup>已证明,横测线多次波贡献道集具有双曲线结构,其对应的速度为横测线方向速度的一半。因此可利用双曲线 Radon 变换对横测线方向多次波贡献道集进行重建,得到密集规则采样的多次波贡献道集,并对其求和,即可得到预测的多次波结果。

双曲线 Radon 变换中所提取信息包括双曲线顶点旅行时(多次波贡献的旅行时),顶点位置(多次波贡献同相轴的顶端位置),曲率(多次波贡献同相轴的曲率及振幅)。将横测线多次波贡献道集转变为上述三参数的 Radon 域数据,需假设多次波贡献道集有一个双曲动校时差,这个假设已得到证明<sup>[11]</sup>。

横测线多次波贡献道集用三个参数进行参数化:多次波贡献同相轴的旅行时(截距时间  $\tau$ ),横测线多次波贡献道集  $y_0$  的顶点位置,横测线多次波贡献道集顶点附近的双曲线曲率函数  $q$ 。利用这三个“参数化”,就可以将多次波贡献道集由数据域变换到模型域  $(q, y_0, \tau)$ 。

数据域  $d(y_k, t)$  代表横测线多次波贡献道,该

数据为横测线位置、时间的函数;模型域  $m(q, y_0, \tau)$  包含横测线多次波贡献道里面的多次波信息。数据域向模型域的变换通过

$$\hat{m}(q, y_0, \tau) = \sum_{y_k=y_{k,\min}}^{y_k=y_{k,\max}} d(y_k, t = \sqrt{\tau^2 + q(y_0 - y_k)^2}) \quad (6)$$

实现。该式可写成算子形式

$$\hat{m} = L^T d \quad (7)$$

其中  $T$  代表“共轭”。式(6)的反变换为

$$d(y_k, t) = \sum_{q=q_{\min}}^{q=q_{\max}} \sum_{y_0=y_{0,\min}}^{y_0=y_{0,\max}} m(q, y_0, \tau = \sqrt{t^2 - q(y_0 - y_k)^2}) \quad (8)$$

可写为算子形式

$$d = L m \quad (9)$$

共轭算子  $L^T$  可将横测线多次波贡献道集  $d$  中的双曲线同相轴映射到模型域  $\hat{m}$  中。但由于采集过程中的角度有限,横测线多次波贡献道的分布也很稀疏,因此变换到模型域的点有很强的剪刀状发散形状。本文利用图 1a 中的密集采样的横测线多次波贡献道集展示剪刀状发散的情况。在图 2a 中可清楚地看到由变换引起的三维模型域中的剪刀状发散情况。而实际采集时横测线方向多次波贡献道集并不会像图 1a 中那样密集,横测线方向可能只有有限的几个拖缆作为多次波贡献道的输入(图 1b),因此稀疏的输入数据会对变换的模型数据引入更为严重的频散与剪刀状发散效应,进而进一步降低模型域中的数据质量。横测线的采样稀疏特性及输入数据的采集角度有限特性同时存在时,所得到的变换域中的数据就会如图 2b 所示,可见模型域中的数据与期望值相差甚远。输入数据中的横测线多次波贡献道集的同相轴,在实际情况下无法变换为模型域中孤立的子波脉冲。

为得到更高分辨率的双曲 Radon 道集,将共轭算子  $L^T$  用算子  $L$  的逆来代替,因此将此变换问题转换为一个反演问题。模型域与数据域之间的关系可由

$$d = L m + n \quad (10)$$

表示,其中  $n$  为(随机)噪声,且具有高斯概率密度函数的特征。对此不适定问题进行求解,需要结合一定的先验信息对此反演问题进行规则化。期望输出

是高分辨率的模型域结果,其中包含稀疏的子波脉冲,高分辨率的子波脉冲对应的是横测线多次波贡

献道集的顶点位置。在模型域参数施加一个柯西密度函数,可以达到模型域稀疏的目的。

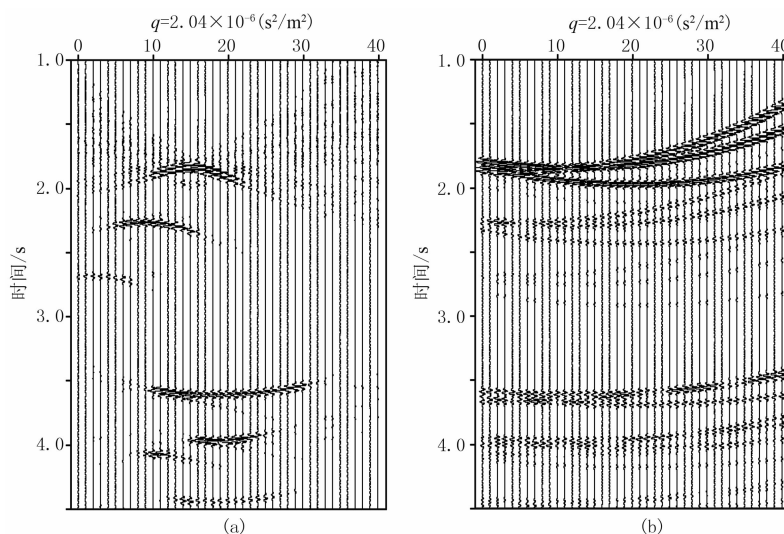


图 2 将共轭变换算子( $L^T$ )应用到图 1a 和图 1b 中估计得到的模型域数据  $\hat{m}(q, y_0, \tau)$   
(a)对应图 1a; (b)对应图 1b

## 5 高分辨率双曲 Radon 变换

在模型域参数中加入柯西概率密度函数,不仅可以稳定反演过程,还可以提高模型域的分辨率。常用的高斯正则化,会使模型域的能量分散化,使得剪刀状的形状加剧<sup>[17,18]</sup>。在模型域参数中加入柯西概率密度函数,可使模型域中的大部分数据趋于零值,而异常值则成为模型中的主要数据,因此可明显提高分辨率。

本文所用的柯西概率密度函数的稀疏性质,经常性的用在反演问题的规则化问题中,而反演问题规则化的目的是为了得到高分辨率的模型结果。Sacchi 等<sup>[17]</sup>利用柯西准则对有限孔径采集所引起的频率域的剪刀状发散问题进行了改进,利用柯西范数准则,提高了模型域的分辨率。Zwartjes 等<sup>[18]</sup>也利用柯西准则进行了地震数据的规则化运算,得到了类似的高分辨率结果。

将柯西准则与式(10)中的最小二乘反演问题相结合,得到一个最大后验概率估计

$$\hat{m} = (L^T L + \lambda Q^{-1})^{-1} L^T d \quad (11)$$

式中:  $\lambda = \sigma_n^2 / \sigma_m^2$ ;  $Q$  是一个  $N_m \times N_m$  的对角矩阵,其对角元素为

$$Q_{ii} = 1 + \frac{m_i^2}{\sigma_m^2} \quad i = 1, \dots, N_m \quad (12)$$

式(11)代表的是式(10)中反演问题的最小二乘解,其中阻尼项  $\lambda Q^{-1}$  是解  $m$  的一个函数。与先验信息的结合使得线性反演问题变为一个非线性最优化问题。

非线性反演的解  $\hat{m}$  由  $\sigma_n^2$  和  $\sigma_m^2$  两个参数控制。 $\sigma_n$  表征数据中所出现的(高斯)噪声水平,噪声包括随机噪声及采集时一些不相关的误差等;  $\sigma_m$  控制数据解的稀疏特性。当比值  $m_i^2 / \sigma_m^2$  较大时,加在模型参数  $m_i$  上的阻尼因子(稳定因子)较小;当比值较小时,模型参数被阻尼,因此模型值接近零值。该算法只会对于数据相关的模型参数进行加强,因此会提高模型域分辨率。两个参数利用  $\lambda$  联系起来,控制反演的稳定性(在稀疏性和数据适应性二者之间均衡)。实际上,  $\sigma_n$  一般是固定不变的,利用  $\sigma_m$  的变化调节反演的效果。式(11)中的非线性问题可用非线性共轭梯度法求解<sup>[19]</sup>。

## 6 模型实例

### 6.1 单道示例

为阐述本文方法的应用效果,利用图 1b 的数据进行了三维数据多次波的预测。如图 3 所示,此道数据的震源坐标为  $(x_s, y_s) = (4475, 0)$ , 检波点坐标为  $(x_r, y_r) = (2475, 0)$ 。由震源出发,在表层观测到的下行反射位置,即二次震源位置  $y$  坐标分别为

$y = -400, y = 0, y = 400$ 。下面详细阐述一下对此地震道进行三维多次波预测的步骤:

(1)由地震数据中抽取 $(x_s, y_s) = (4475, 0)$ 对应的共炮点记录、 $(x_r, y_r) = (2475, 0)$ 对应的共检波点记录,共检波点记录对应的震源  $y$  坐标分别为  $y = -400, y = 0, y = 400$ ;

(2)对(1)抽取的共炮点记录与共检波点记录做时空域褶积,生成位于  $y = -400, y = 0, y = 400$  位置处的多次波贡献道,此 3 道贡献道组成所要预测多次波地震道对应的多次波贡献道集;

(3)对得到的多次波贡献道集进行稀疏反演,将其变换到双曲 Radon 域;

(4)将得到的双曲 Radon 域数据做正变换,得到规则密集采样的多次波贡献道集(图 4a);

(5)沿  $y$  坐标对多次波贡献道集进行求和,得到该地震道所对应的多次波记录(图 4b)。

预测结果如图 1c 第 4 道所示。比较第 4 道与

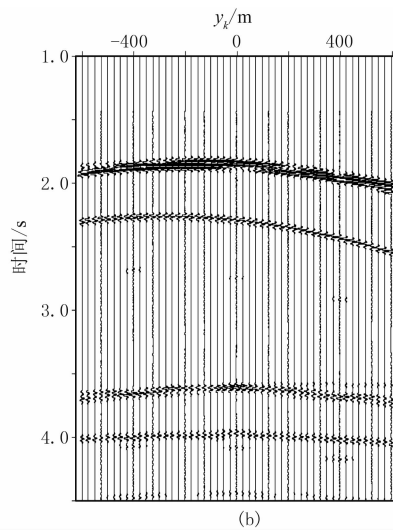
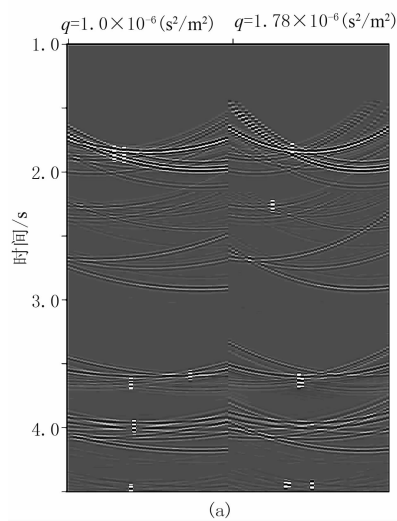


图 4 对图 1b 多次波贡献道集做稀疏反演得到的模型域数据(a)及其正变换得到的规则密集采样的多次波贡献道集(b)

## 6.2 单炮示例

对三维单炮记录进行多次波预测的过程与上述单道示例中阐述的过程是类似的,对三维单炮记录中所有地震道按上述单道示例中所阐述的过程依次进行预测,得到的结果如图 5b 所示(图 5a 为原始三维单炮记录),而利用二维 SRME 算法预测多次波的结果如图 5c 所示。为使对比效果更加明显,还抽取了  $y = -400\text{m}$  处的测线记录及预测多次波结果(图 6)。

从图 5 和图 6 可明显看出,由于地层在  $y$  方向

第 1 道可看出,本文方法与全三维数据所预测的多次波差别很小,可作为三维数据多次波预测的结果使用。

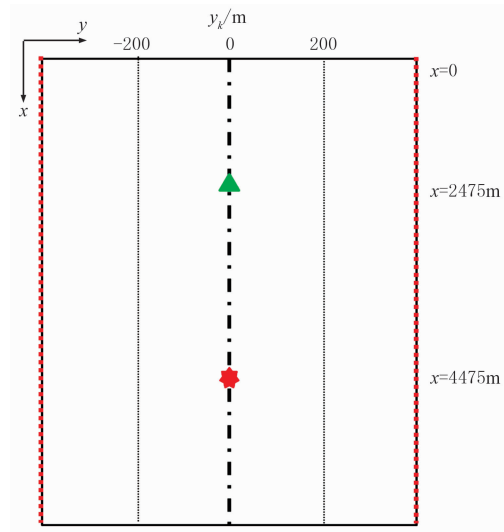


图 3 预测多次波的地震道位置示意图

存在一定倾角,自由表面多次波发生下行反射的位置位于纵测线垂直平面之外,因此直接用二维 SRME 会导致预测结果旅行时存在一定误差,这一点在预测结果中远炮检距处尤为明显。而本文方法综合考虑了多次波传播的三维效应,结合高分辨率双曲 Radon 变换,对横测线方向多次波贡献道集进行加密,预测的多次波在旅行时、同相轴形态方面与原始数据吻合较好。由于此次运算过程中分窗处理不当,导致结果在窗口重叠部分存在一定假频,有待后续改进。

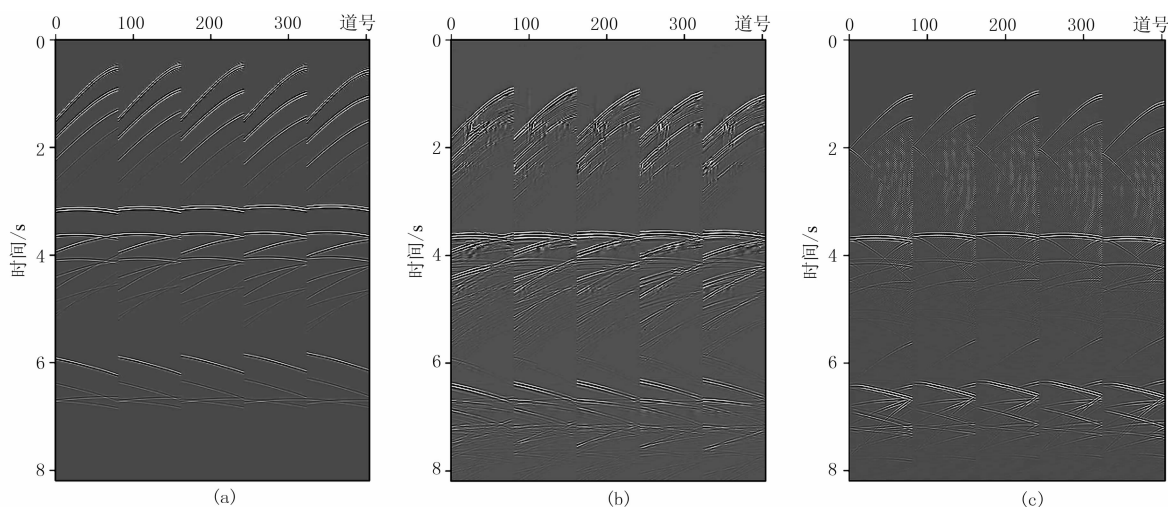
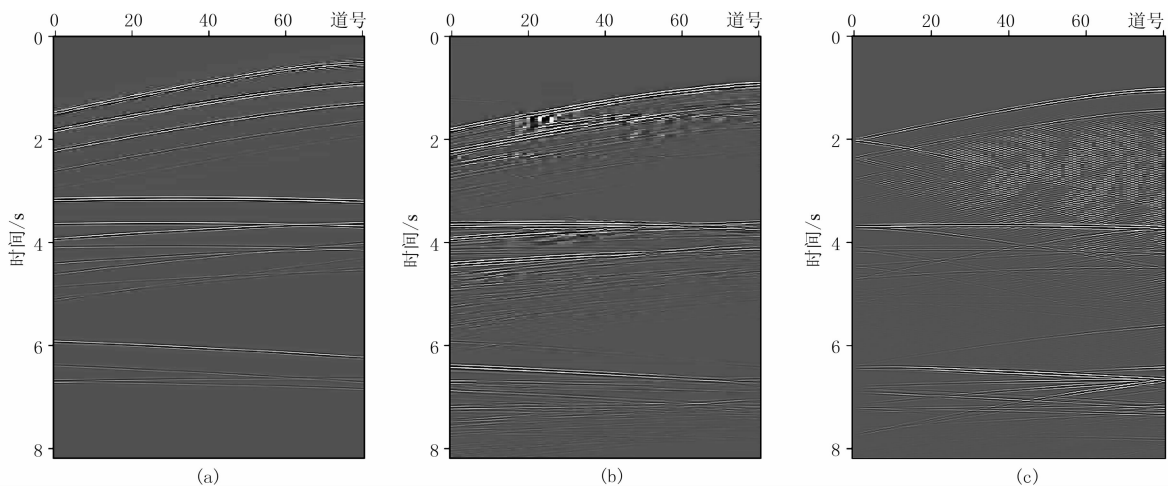


图 5 三维单炮记录及其多次波预测结果

(a)原始三维单炮记录;(b)本文方法预测的多次波;(c)二维 SRME 法预测的多次波

图 6  $y = -400\text{m}$  处测线记录及其多次波预测结果

(a)原始三维单炮记录;(b)本文方法预测的多次波;(c)二维 SRME 法预测的多次波

## 7 结束语

本文对三维 SRME 算法进行了研究,通过对待预测地震道对应的多次波贡献道集进行基于双曲线 Radon 变换的稀疏反演运算,实现了三维数据多次波的预测。从模拟三维数据的运算结果可看出,与二维 SRME 方法预测的结果相比:三维 SRME 算法预测多次波结果的旅行时更为准确,波的形态与原始数据中多次波的形态更加吻合。但本文算法还有待改进之处:①三维 SRME 预测结果存在一定的噪声假象,有可能是处理过程中分窗不当造成的;②与二维 SRME 相比,三维 SRME 计算量剧增,单机计算三维单炮多次波的结果约为 8h,而二维

SRME 仅需 1min 即计算完毕。但从三维 SRME 计算结果的准确度来看,计算量的增大还是值得的。

## 参考文献

- [ 1 ] Verschuur D J, Berkhout A J and Wapenaar C P A. Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [ 2 ] Verschuur D J. Surface-Related Multiple Elimination, an Inversion Approach[D]. Delft University of Technology, 1991.
- [ 3 ] Ross W S, Yu Y and Gasparotto F A. Traveltime prediction and suppression of 3-D multiples. *Geophysics*, 1999, 64(1), 261-277.
- [ 4 ] Ikelle L T and Yoo S. An analysis of 2D and 3D inverse scattering multiple attenuation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19: 1973-1976.
- [ 5 ] Nekut A G. 3 D surface-related multiple prediction. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998,

- 17;1511-1544.
- [ 6 ] Matson K H and Corrigan D. A 2.5D method for attenuating free-surface multiples based on inverse scattering series. 32nd Annual International Meeting, Offshore Technology Conference, Proceedings, 2000, 12046.
- [ 7 ] Biersteker J. MAGIC; Shell's surface multiple attenuation technique. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2001, 20; 1301-1304.
- [ 8 ] van Dedem E J. 3D Surface-related Multiple Prediction [D]. Delft University of Technology, 2002.
- [ 9 ] Sun Y. Anti-aliasing multiple prediction beyond 2-D. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1999, 18; 1338-1341.
- [ 10 ] van Dedem E J and Verschuur D J. 3D surface-related multiple prediction—An inversion approach. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19; 1965-1968.
- [ 11 ] van Dedem E J and Verschuur D J. 3D surface-related multiple prediction — A sparse inversion approach. Geophysics, 2005, 70(3); V31-V43.
- [ 12 ] Hokstad K and Sollie R. 3D surface-related multiple elimination using parabolic sparse inversion. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2003, 22; 1961-1964.
- [ 13 ] van Borselen R, Schonewille M A and Hegge R F. 3D surface-related multiple elimination; Acquisition and processing solutions. The Leading Edge, 2005, 24( ): 260-268.
- [ 14 ] 李宏图, 黄志, 李振勇等. 三维 SRME 技术及其在深海资料处理中的应用. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊 1); 60-62.  
Li Hongtu, Huang Zhi, Li Zhenyong et al. 3D SRME (Surface-Related Multiple Elimination) technique and its application in deep sea seismic data processing. OGP, 2009, 44(S1); 60-62.
- [ 15 ] 石颖, 王维红, 李莹等. 基于波动方程三维表面多次波预测方法研究. 地球物理学报, 2013, 56(6); 2023-2032.  
Shi Ying, Wang Weihong, Li Ying et al. 3D Surface-related multiple prediction approach investigation based on wave equation. Chinese J Geophys, 2013, 56(6); 2023-2032.
- [ 16 ] Berkhout A J. Seismic Migration, Imaging of Acoustic Energy by Wavefield Extrapolation, Part A: Theoretical Aspects. Elsevier Scientific Publ Co Inc, 1982.
- [ 17 ] Sacchi M D and Ulrych T J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. Geophysics, 1995, 60; 1169-1177.
- [ 18 ] Zwartjes P M and Duijndam A J W. Optimizing reconstruction for sparse spatial sampling. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19; 2162-2165.
- [ 19 ] Shewchuk J R. An introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1994.

(本文编辑:朱汉东)

### 作者简介



马继涛 博士, 1983 年生; 2004 年本科毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业; 2009 年获中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士学位; 现在中国石油大学(北京)信息学院物探系从事地震资料处理方面的研究工作。

## 本期广告索引

东方地球物理公司	封 2, 插 1
东方地球物理公司研究院处理中心	插 2~4
环波软件公司	插 5~7
中油油气勘探软件国家工程研究中心有限公司	插 8, 9
GTC	插 13
斯伦贝谢科技服务(北京)有限公司	插 14, 15
北京网格天地软件技术有限公司	插 16
中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司	插 17, 18
中国石化胜利油田物探研究院	插 19, 20
大庆钻探工程公司地球物理勘探公司	插 21~23
东方地球物理公司研究院地质研究中心	插 24, 25, 封 4
东方地球物理公司油藏地球物理研究中心	插 26, 27
CNPC 物探重点实验室	插 28, 封 3