

基于 L_1/L_2 范数的表面多次波自适应相减方法

井洪亮^{①②} 石颖*^{①③④} 李莹^① 宋元东^①

(^①东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆 163318; ^②中国石油东方地球物理公司吐哈物探处,新疆哈密 839009; ^③“大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室”,辽宁大连 116024; ^④黑龙江省普通高校科技创新团队“断层变形、封闭性及与流体运移”,黑龙江大庆 163318)

井洪亮,石颖,李莹,宋元东. 基于 L_1/L_2 范数的表面多次波自适应相减方法. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4): 619-625.

摘要 依据 L_1 和 L_2 范数自适应相减方法的特性,提出了联合 L_1/L_2 范数的表面多次波自适应相减方法,并引入 GPU 并行加速,在充分发挥两种方法优势的同时,有效缓解了两种自适应相减方法限制性条件引发的问题,在较短的时间内获得收敛的维纳滤波器,并且较好地拟合多次波模型和原始记录中的多次波。文中方法无需 L_2 范数方法的假设条件,相比于 L_1 范数方法提高了计算效率。理论模型和实际海洋地震数据测试表明,基于 L_1/L_2 范数的 GPU 并行加速的表面多次波自适应相减方法可有效压制地震数据中的表面多次波。

关键词 SRME 自适应相减 L_1 范数 L_2 范数 GPU

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.04.007

1 引言

海洋地震勘探数据中常含丰富的低阶或高阶多次反射波,而目前的地震成像方法主要基于一次反射波能量,多次波的存在直接影响成像的真实性和可靠性,降低地震数据的信噪比,同时也会使目的层的反射波形态发生畸变,严重影响对地震资料的正确认识。近三十年来,地震资料表面多次波压制技术得到了快速发展,但主要方法仍可分为两大类:即滤波法和基于波动方程的方法。前者计算成本低,但通常对简单或中等复杂构造的地震资料有效;后者可有效处理复杂构造地震数据,其中基于波动方程的表面多次波压制方法^[1,2],又称 SRME (Surface-related Multiple Elimination) 方法完全基于数据驱动,不需要任何先验的地下信息,目前在理论研究和方法应用上都得到了诸多关注。

SRME 方法通常由多次波模型预测,以及多次波的自适应匹配相减两步完成。针对预测多次波模型信息,匹配滤波相减将进一步完善多次波模型的

振幅、相位、旅行时以及频带等信息,进而更好地与实际地震记录中的多次波拟合。选取有效的匹配滤波方法对自适应相减至关重要,目前的自适应匹配滤波方法主要包括时间域维纳滤波方法^[3]、频率域最小能量优化方法^[4]、预测误差滤波方法^[5,6]以及基于盲信号分离的独立成分分析方法^[7]等。不同的滤波方法依据不同的假设条件,常用的基于 L_2 范数最小准则的时间域维纳滤波法存在两个隐含假设条件:一是地震记录中的一次波与多次波具有正交性;二是压制多次波后的地震记录剩余能量最小。在上述假设条件不成立的情况下,预测的多次波与原始数据中的多次波将难以正确匹配。基于 L_1 范数匹配滤波方法^[8-10]无需上述假设条件,但是计算成本较高,求解较为复杂。鉴于此,本文提出联合 L_1 和 L_2 范数的表面多次波自适应相减方法,克服了 L_2 范数方法的假设条件限制,同时也降低了 L_1 范数方法的计算成本。为进一步提高计算效率,将 GPU 并行加速技术用于本文算法,充分利用 GPU 的并行计算能力和高密度计算优势,完成自适应匹配相减算法中的矩阵乘法运算及矩阵与向量乘法运算。

* 黑龙江省大庆市东北石油大学地球科学学院 308,163318. Email: shiyingdgp@163.com

本文于 2014 年 5 月 26 日收到,最终修改稿于 2015 年 6 月 9 日收到。

本研究受国家自然科学基金青年基金项目(41474118,41104088)、国家“863”高技术研究发展计划项目(2012AA061202)、大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1509)共同资助。

本文对理论模型和实际海洋地震数据均进行了测试和计算。

2 方法原理

基于波动方程的 SRME 方法通常由多次波预测(SRMP)和自适应相减两步实现。首先简要叙述 SRMP(Surface-related Multiple Prediction)原理,然后重点阐述基于 L_1/L_2 范数结合的迭代匹配滤波方法。

2.1 SRMP 原理

SRMP 方法依据地震数据预测多次波,而数据本身被作为波场延拓算子,通过地震数据及其本身的多维褶积,实现低阶和高阶的表面多次波预测。在波场延拓中,将格林函数作为延拓路径,利用 Rayleigh 积分的非稳态空间—频率域褶积表示形式,则表面多次波 $M_0(g, s, \omega)$ 的预测可表示为

$$M_0(g, s, \omega) = - \int_{x_k} X_0(g, x_k, \omega) P(x_k, s, \omega) dx_k \quad (1)$$

式中: $X_0(g, x_k, \omega)$ 为无表面多次波的脉冲响应; $P(x_k, s, \omega)$ 为含多次波的总波场; g 为检波点坐标位置; s 为震源位置; x_k 是求和变量,即震源点和检波点组成的二维测线上的空间坐标。

实际应用中炮点和检波点波场是以离散点形式组合,可将积分公式(1)写成如下的离散求和形式

$$M_0(g, s, \omega) = - \sum_{x_k} X_0(g, x_k, \omega) P(x_k, s, \omega) \quad (2)$$

若对所有的炮点和检波点组合重复应用式(2),则多次波预测可表示为

$$M_0 = - X_0 P \quad (3)$$

实际上无表面多次波的脉冲响应 X_0 通常难以获取,因此,常用一次波的估计代替 $-X_0$,并通过迭代不断更新 P_0 ,迭代预测表面多次波可表述为

$$M_0^{(i+1)} = P_0^{(i)} P \quad (4)$$

式中: i 为迭代次数;初次迭代取 $P_0^{(0)} = P$ 。

2.2 基于 L_1/L_2 范数的迭代自适应匹配滤波方法

SRMP 方法预测的多次波与原始数据中的多次波在振幅、相位、旅行时、频带等方面存在差异,自适应匹配滤波器可在不同程度上对其补偿。设 $y(t)$ 为原始单道地震记录, $m_i(t)$ 为 SRMP 方法预

测的多次波模型, $y_0(t)$ 为地震记录中的一次波, $f(t)$ 为自适应滤波器,将预测的多次波模型 $m_i(t)$ 通过自适应滤波器 $f_i(t)$,使其与真实多次波之间的差异达到最小。令相减得到的一次波 $y_0(t)$ 的某个统计量最小^[11,12],根据拟多道自适应匹配滤波原理,有

$$y_0(t) = y(t) - \sum_{i=1}^k f_i(t) * m_i(t) \quad (5)$$

式中: k 为多次波模型数; $*$ 为褶积。

假设压制多次波后地震记录能量最小,则基于 L_2 范数匹配滤波方法可表示为

$$e_2(f) = \operatorname{argmin}_f \left\{ \left\| y - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_i \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

式中 \mathbf{M}_i 为 $m_i(t)$ 形成的循环矩阵。求解能量最小化问题可转化为 $\frac{\partial e_2}{\partial f_i} = 0$,则可初步反演出自适应滤波器的最小二乘解 f_i 。然而, L_2 范数方法的假设条件是一次波与多次波具有正交性,并且无法避免大值条件的局限,在不满足假设条件的情况下,滤波器 f_i 难以准确地拟合多次波模型与原始数据中的多次波,多次波能量也常难以有效压制。

为提高自适应相减方法对地震数据的适应性,并且不受限于压制多次波后地震记录能量最小的条件, Guitton 等^[8]提出了基于 L_1 范数匹配滤波方法,可表示为

$$e_1(f) = \left| y - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_i \right|_1 \quad (7)$$

尽管基于 L_1 范数的方法改善了一次波与多次波的正交性条件,同时对大值条件是开放的^[13],但因其昂贵的计算成本,对海量地震勘探数据来说, L_1 范数方法仍面临计算效率低的问题。本文对 L_1 范数匹配滤波方法加以改进,提出结合 L_1 和 L_2 范数的自适应相减方法,将 L_2 范数最小二乘反演获得的滤波器用于 L_1 范数自适应匹配滤波方法中。相比于常规基于 L_1 范数匹配滤波方法,所提出的方法减少了迭代次数,提高了计算效率。

基于 L_1/L_2 范数^[9]的匹配滤波方程可表示为

$$e_p(f) = \frac{1}{p} \left\| y - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_i \right\|_p^p = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n |r_j|_p^p \quad (8)$$

式中: $p(1 \leq p \leq 2)$ 为求解线性方程组的 L_p 范数的类型; $r_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 为第 j 个采样点压制多次波后的剩余值,即 $r_j = y_j - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_{ij}$,对于任意给定

的 r_j , 根据 Bube 等^[9] 提出的 L_1/L_2 范数混合迭代重加权最小平方方法求解, 引入了新的参数变量 ϵ , 并将其作为过渡点, 控制 L_1 和 L_2 范数求解的转化, 令

$$q(r_j) \approx \begin{cases} \frac{1}{2}(r_j/\epsilon)^2 & 0 \leq |r_j| \leq \epsilon \\ |r_j|/\epsilon & \epsilon < |r_j| \end{cases} \quad (9)$$

当 $|r_j|/\epsilon$ 较小时, 求取 L_2 范数的解, 即 $p=2$, 目标函数为 $e_2(f)$; 当 $|r_j|/\epsilon$ 较大时, 求取 L_1 范数的解, 即 $p=1$, 但是目标函数 $e_1(f)$ 为奇异函数, 在原点处不可导, 无法满足诸如高斯消去法、牛顿迭代法、共轭梯度法等常规线性优化方法的求解条件。为此, 本文引入加权矩阵 \mathbf{W} , 利用迭代重加权的 L_2 范数方法较好地近似 L_1 范数, 即目标函数 $e_1(f)$ 可表示为

$$e_1(f) = \operatorname{argmin}_f \left\{ \left\| \mathbf{W} \left(\mathbf{y} - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_i \right) \right\|_2^2 \right\} \quad (10)$$

式中 \mathbf{W} 为加权矩阵, 可表示为

$$\mathbf{W} = \operatorname{diag} \left(\frac{1}{(1 + r_j^2/\epsilon^2)^{1/4}} \right) \quad (11)$$

式中 ϵ 为恒定先验值, 控制 L_1 和 L_2 范数最小解的过渡, 通常取 $\epsilon = \frac{\max |y|}{100}$ 。

在式(10)的等号两边对 f_i 求偏微商并令其为零, 则式(10)所述的目标函数转化为如下的线性方程组

$$\mathbf{M}_i^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_i = \mathbf{M}_i^T \mathbf{W}^T \mathbf{M}_i \mathbf{y} \quad (12)$$

因矩阵 $\mathbf{M}_i^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i$ 非 Toeplitz 矩阵, 故无法应用莱文森快速求解方法。Guitton 等^[8] 采用了牛顿迭代法求解, 但其收敛速度较慢; 李学聪等^[10] 以及李鹏^[14] 提出采用一种直接迭代的方法, 简化了求解过程, 令初始滤波器 f_i 为单位列向量, 迭代 5 次可得到收敛的 f_i , 但仍面临计算成本高的问题。利用式(12), 本文方法在初次迭代时, 并未将滤波器 f_i 设为单位列向量, 而是借助式(6), 初步求取基于 L_2 范数的自适应滤波器, L_2 范数算法稳定、求解计算效率高, 相比于直接迭代法求解, 可减少匹配迭代次数。

基于 L_1/L_2 范数的自适应匹配滤波方法的实施步骤如下:

(1) 利用最小二乘准则, 初步获得基于 L_2 范数匹配滤波的自适应滤波器 f_i ;

(2) 将求得的滤波器 f_i 代入到压制多次波后的剩余值公式, 即 $r_j = y_j - \sum_{i=1}^k \mathbf{M}_i f_{ij}$, 并且保存 r_j ;

(3) 由原始地震数据 $y(t)$ 计算过渡点 $\epsilon = \frac{\max |y|}{100}$, 从而判断 $|r_j|/\epsilon$ 的值, 若该值较小时, 可近似满足压制多次波后有效信号能量最小, 则选取基于 L_2 范数匹配滤波方法, 求取目标函数 $e_2(f)$; 若 $|r_j|/\epsilon$ 值较大时, 利用 L_1 范数最小二乘准则, 将保存的 r_j 值代入到加权矩阵表达式式(11)中, 获得初次迭代加权矩阵 \mathbf{W} ;

(4) 将上一步求出的加权矩阵 \mathbf{W} 代入式(12), 并求解线性方程组, 获得新的维纳滤波器 \tilde{f}_i ;

(5) 依据更新后的滤波器 \tilde{f}_i , 重复步骤(2)~步骤(4), 直至获得收敛的滤波器或者满足压制多次波后能量最小, 进而终止迭代, 通常需要完成 2~3 次迭代。

2.3 GPU 加速自适应匹配滤波方法

与常规的匹配滤波方法相比, 基于 L_1/L_2 范数的自适应相减方法可提高计算精度, 但其计算成本较高。为此, 本文提出采用 GPU 并行加速技术提高自适应相减方法的计算效率。观察式(12)线性方程组, 可知本文所述的匹配滤波方法含有维度较大的矩阵乘法运算, 这些运算耗费了大部分的计算时间。因此, 提高矩阵乘法的计算效率是降低本文方法计算成本的重要途径。矩阵乘法为一种计算和访存密集型的典型应用, 其计算效率与处理器的计算能力、访存带宽、寄存器个数等参数密切相关, GPU 特殊的硬件体系结构为高性能计算提供了良好的可编程性, 尤其适合矩阵乘法计算, 矩阵乘法计算中各个元素间无相互干扰、并行度较高, 转移到 GPU 上执行可减少各元素的重复读取次数。

本文借助 CUDA 软件架构平台实现文中所述的自适应匹配滤波方法, 由 CPU 端调用运行在 GPU 上的内核函数, 内核函数在 GPU 上由线程网格 Grid 运行。图 1 为 GPU 线程分配原理示意图。运行的内核函数存在两个层次的并行, 即线程网格中的 Block 间并行和 Block 中的 Thread 间并行。在一个 Grid 中, Block 之间没有同步和通信机制, 因此 Block 之间必须是独立的。在一个 Block 里面, 线程之间可以用同步原语 `_syncthreads()` 来同步。

本文采用棋盘分割的计算方式优化矩阵乘法, 同时也充分利用共享存储器带宽较大、延迟很小的

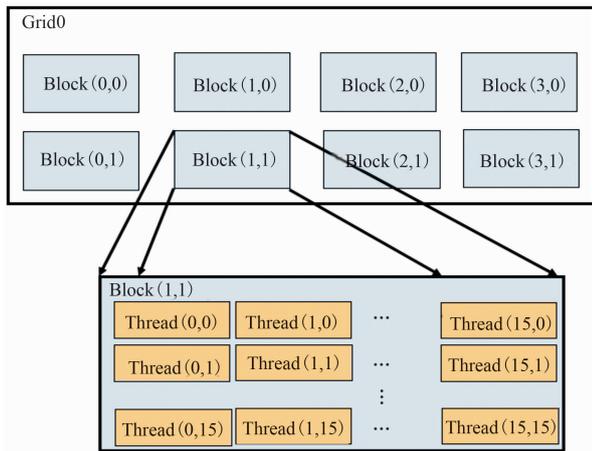


图1 GPU线程分配示意图

特点,令其参与加速计算。因访问共享存储器时间延迟远小于全局存储器,所以先将待计算矩阵输入到GPU的共享存储器上,可节约大量的全局存储器带宽。再利用棋盘分割形式形成多个矩阵子块 C_{sub} ,每个Block负责一个子块的计算,每个线程Thread负责计算 C_{sub} 的一个元素,并将一个Block上的所有线程利用同步原语`_syncthreads()`命令执行同步计算,计算结果保存在寄存器上,一旦所有的子块计算结束,最后把计算结果写回全局存储器上,传给CPU主控端,CPU再顺序执行其他命令。GPU/CPU异构计算及其数据传送流程如图2所示。

采用的GPU计算平台为NVIDIA Tesla K10,计算能力为3.0,GPU时钟频率为0.75GHz。

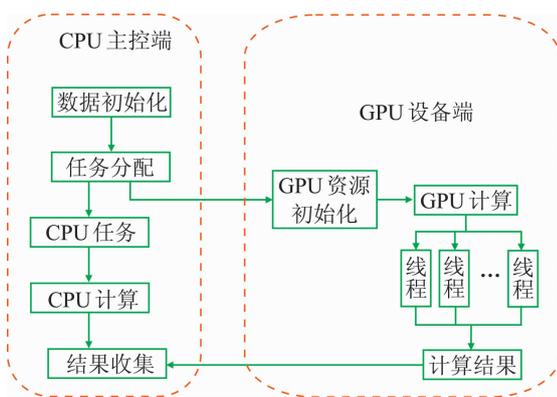


图2 GPU/CPU异构编程模型计算执行流程图

3 数值算例

3.1 单炮理论模型

为验证本文算法的有效性,用含表面多次波的

单炮理论数据进行测试。速度模型如图3所示,包含四个水平地下反射界面,模拟所用震源子波为主频25Hz的零相位Ricker子波,共800道接收,道间距为15m,时间采样间隔为4ms。

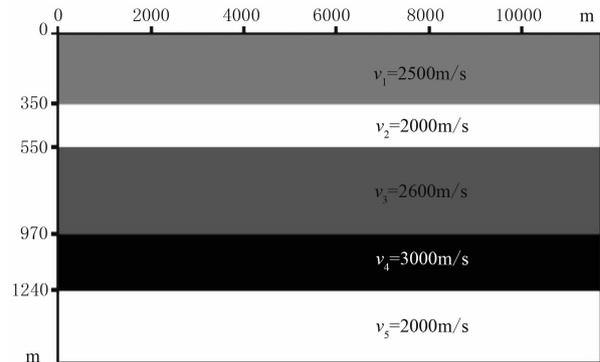


图3 水平层状介质速度模型

图4为不同滤波方法多次波压制的单炮记录。由图可见, L_2 范数匹配滤波方法压制表面多次波结果(图4c箭头标注处)明显有残余的表面多次波;常规 L_1 范数匹配滤波方法迭代5次,CPU串行计算耗时为15278s,其表面多次波压制结果(图4d)与图4c相比,压制结果有明显改善,尤其箭头所标注位置,表面多次波能量有较大的衰减;利用本文方法迭代2次,CPU串行计算时间为6401s,其表面多次波压制结果如图4e所示,与常规基于 L_1 范数匹配滤波方法相比,计算成本有明显的降低。

本文方法利用GPU/CPU异构并行计算耗时104s,与CPU串行计算耗时6401s相比,效率提高约61倍。因此,本文方法可在保证计算效率的情况下,获得较为理想的表面多次波压制效果。

3.2 SMAART模型

为了验证基于 L_1/L_2 范数的自适应相减方法对复杂构造地震数据的适应性,本文对SMAART模型进行了试算。该模型含能量很强的海底表面多次波以及较大反射系数的盐丘构造界面形成的表面多次波。图5为SMAART模型多次波压制前及预测的多次波单炮记录。图6为图5a数据不同方法多次波压制后的单炮记录。由图可见,图6a中的箭头标注位置残留表面多次波;利用 L_1/L_2 范数的自适应相减方法不受一次波与多次波具有正交性等假设条件的限制,压制表面多次波后效果明显改善,尤其在箭头标注处多次波同相轴能量得到了较大程度的衰减(图6b)。

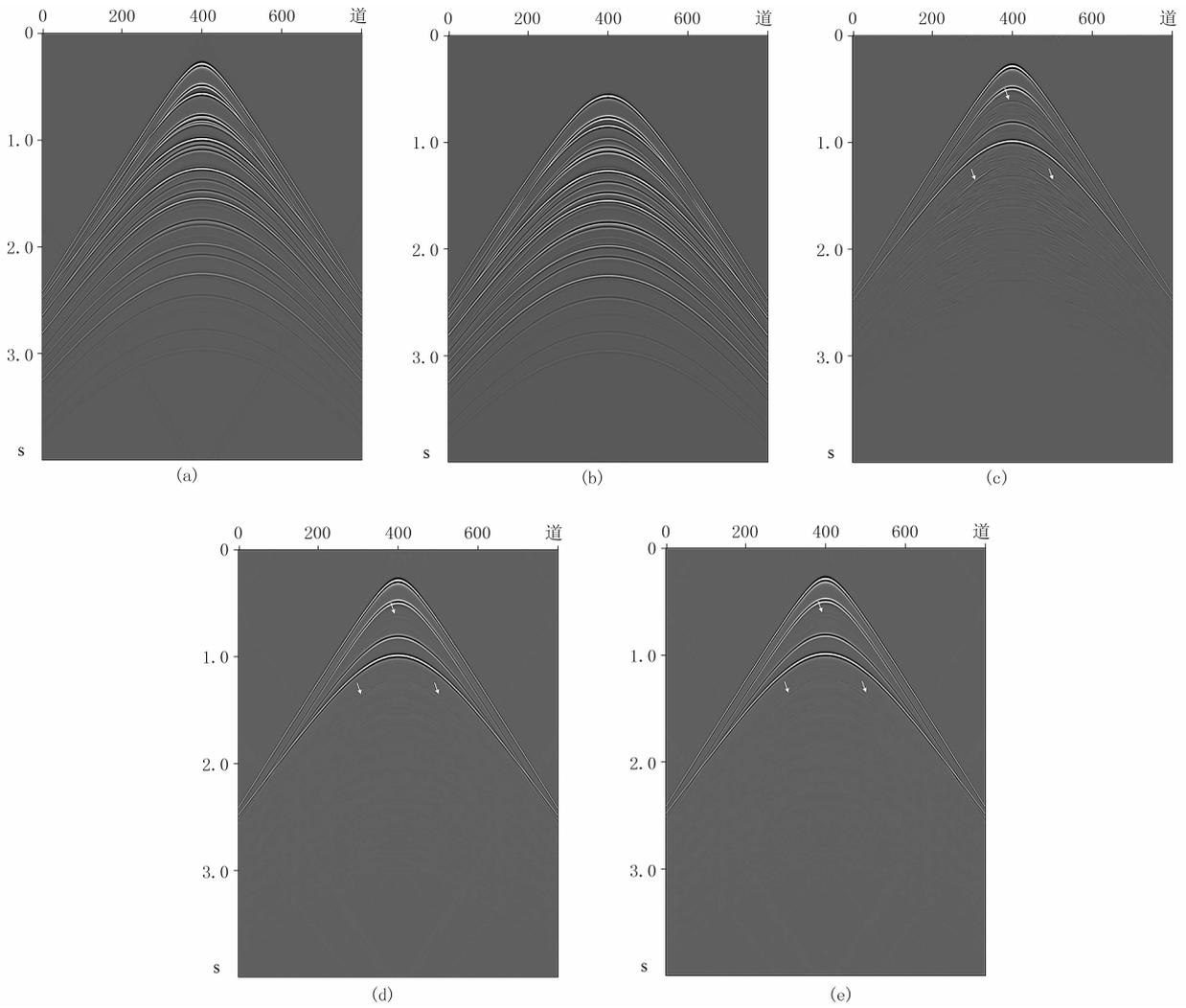


图 4 不同滤波方法压制多次波的单炮记录

(a)含多次波的原始地震数据;(b)理论多次波数据;(c) L_2 范数自适应相减方法压制多次波;
(d) L_1 范数自适应相减方法压制多次波;(e) L_1/L_2 范数自适应相减方法压制多次波

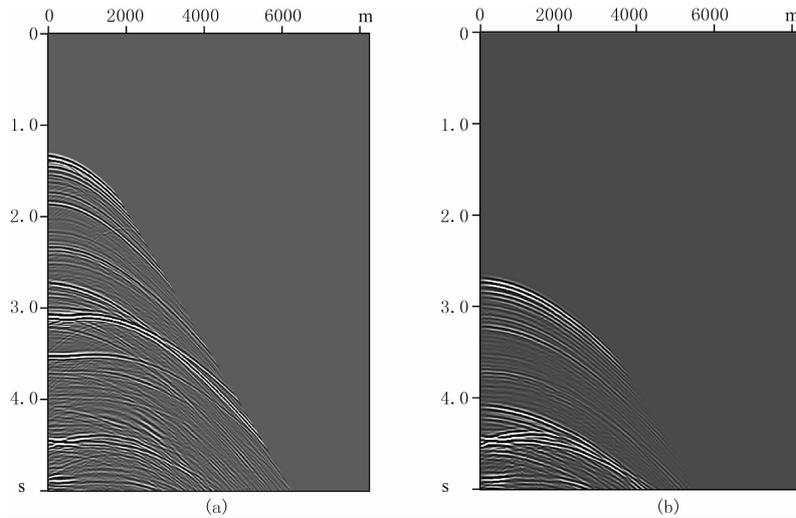


图 5 SMAART 模型多次波压制前(a)及预测的多次波(b)单炮记录

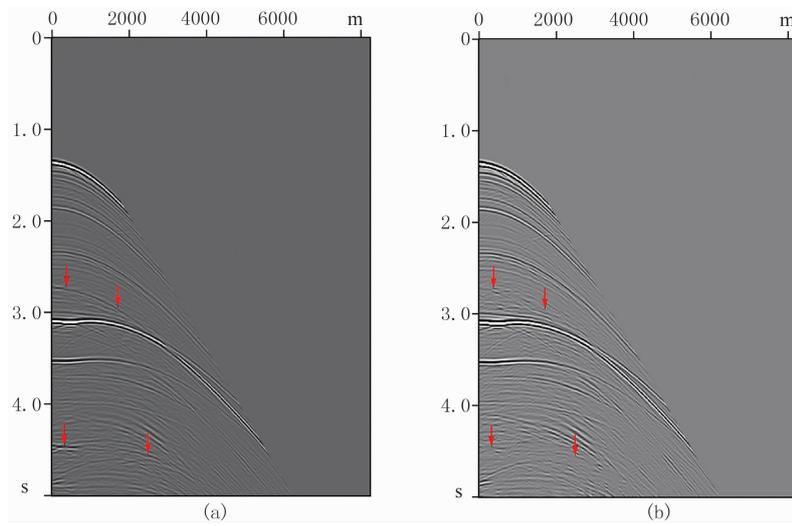


图 6 图 5a 数据不同方法多次波压制后的模拟单炮记录

(a) 基于 L_2 范数自适应相减方法压制多次波; (b) 基于 L_1/L_2 范数自适应相减方法压制多次波

3.3 实际数据

利用本文所阐述的方法对 A 水域地震资料进行试算, 该数据包含 300 炮, 每炮 300 道接收, 道间

距和炮间距均为 12.5m, 采样间隔为 2ms。图 7 为实际地震数据多次波压制后叠加剖面。由该图可见, 在含多次波的共炮检距叠加剖面中显示该水域

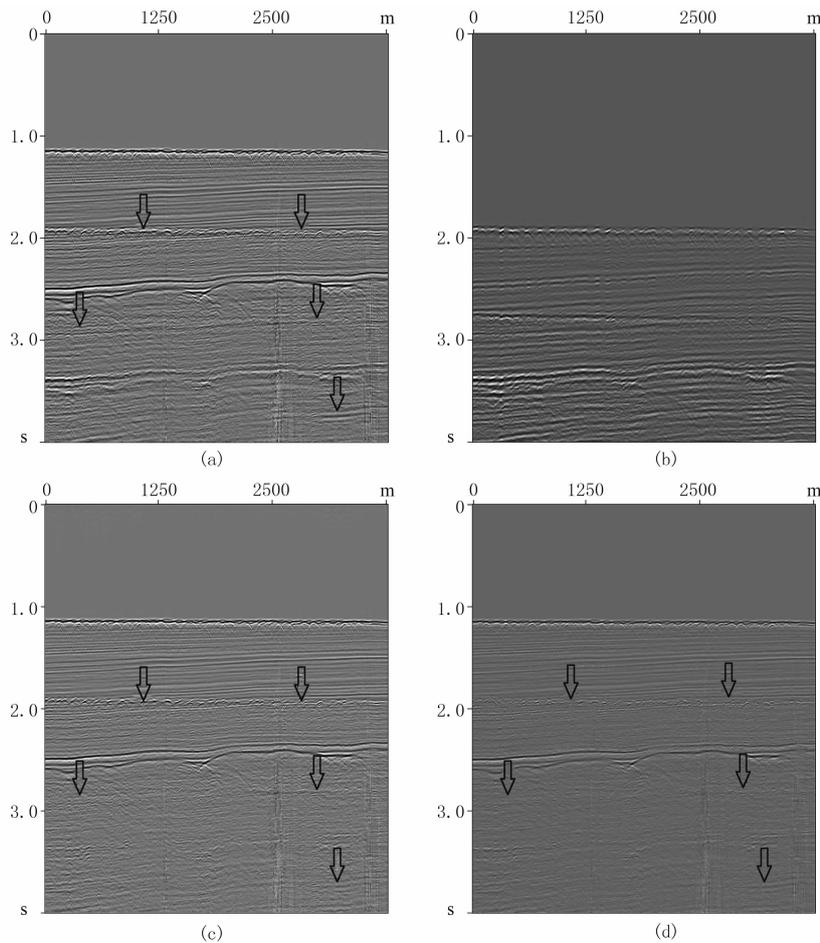


图 7 实际地震数据多次波压制后叠加剖面

(a) 含多次波数据的共炮检距剖面; (b) SRME 方法预测的多次波; (c) 基于 L_2 范数方法; (d) 本文方法

海底相对较为平坦(图 7a),基于 L_2 范数压制表面多次波后剖面中仍有较多的残余多次波(图 7c),而利用本文方法压制表面多次波更加干净、彻底,表面多次波能量得到了较大程度的衰减(图 7d)。

4 结论

(1)联合 L_1 和 L_2 范数压制表面多次波的迭代自适应匹配滤波方法弱化了 L_2 范数的两个假设条件,使方法在一定程度上可适应一次波和多次波非正交的数据,更好地拟合多次波模型和实际地震数据中的多次波。

(2)本文方法不严格受限于衰减多次波后地震记录能量最小的假设,利用 L_1 范数的鲁棒性,有效克服大值条件的约束。

(3)将 L_2 范数自适应相减方法求出的滤波器用于残差值和加权矩阵的计算,参与 L_1 范数自适应匹配滤波计算中,提高了 L_1 范数方法的收敛速度。

(4)利用 GPU/CPU 异构并行加速技术,提高 L_1 和 L_2 范数联合压制表面多次波自适应相减方法的计算效率。

(5)对含表面多次波的理论模型和实际海洋数据测试表明:本文方法的计算精度较 L_2 范数方法有改善,既可达到 L_1 范数方法的计算精度又降低了计算成本。

参考文献

- [1] Berkhout A J, Verschuur D J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part I : Theoretical considerations. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1586-1595.
- [2] Verschuur D J, Berkhout A J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part II : Practical aspects and examples. *Geophysics*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [3] Wang Yanghua. Multiple prediction through inversion; a fully data-driven concept for surface-related multiple attenuation. *Geophysics*, 2004, 69(2): 547-553.
- [4] Verschuur D J, Berkhout A J. Adaptive surface related multiple elimination. *Geophysics*, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [5] Spitz S. Pattern recognition, spatial predictability, and subtraction of multiple events. *The Leading Edge*, 1999, 18(1): 55-58.
- [6] 陆文凯, 骆毅, 赵波等. 基于独立分量分析的多次波自适应相减技术. *地球物理学报*, 2004, 47(5): 886-891.
- Lu Wenkai, Luo Yi, Zhao Bo et al. Adaptive multiple wave subtraction using independent component analysis. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(5): 886-891.
- [7] Guitton A. Multiple attenuation with multidimensional prediction-error filter. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2003, 22: 57-74.
- [8] Guitton A and Verschuur D J. Adaptive subtraction of multiples using L_1 -norm. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52(1): 27-38.
- [9] Bube K P and Langan R T. Hybrid L_1/L_2 minimization with application to tomography. *Geophysics*, 1997, 62(4): 1183-1195.
- [10] 李学聪, 刘伊克, 常旭等. 均衡多道 L_1 范数匹配多次波衰减的方法与应用研究. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 963-973.
- Li Xuecong, Liu Yike, Chang Xu et al. The adaptive subtraction of multiple using the equipoise multichannel L_1 norm matching. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 963-973.
- [11] 李钟晓, 陆文凯, 庞廷华等. 基于多道卷积信号盲分离的多次波自适应相减方法. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1325-1334.
- Li Zhongxiao, Lu Wenkai, Pang Tinghua et al. Adaptive multiple subtraction based on multi-traces convolutional signal blind separation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1325-1334.
- [12] 石颖, 刘洪, 邹振. 基于波动方程表面多次波预测与自适应相减方法研究. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1761-1774.
- Shi Ying, Liu Hong, Zou Zhen. Surface-related multiples prediction based on wave equation and adaptive subtraction investigation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1716-1724.
- [13] 武银婷, 刘伊克, 常旭等. 改进的 L_1 范数匹配滤波法及在南海深水盆地的应用. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 1007-1016.
- Wu Yinting, Liu Yike, Chang Xu et al. An improved matching method based on L_1 -norm for multiple elimination and application in deepwater basin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 1007-1016.
- [14] 李鹏. 复杂介质多次波处理方法研究 [博士学位论文]. 北京: 中国科学院地质与地球物理所, 2007.
- Li Peng. The Seismic Processing Method of Multiple Suppression of Complication Medium [D]. Beijing, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [15] 张舒, 褚艳丽, 赵开勇等. GPU 高性能运算之 CUDA. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

(本文编辑: 金文昱)

作者简介



井洪亮 硕士研究生, 1988 年生; 现在就读于东北石油大学固体地球物理专业, 主要研究地震资料处理中多次波的预测和压制方法。