

大规模三维地震数据 Kirchhoff 叠前深度偏移及其并行实现

王华忠^① 刘少勇*^① 孔祥宁^② 蔡杰雄^{①②} 方伍宝^②

(^①同济大学海洋与地球科学学院海洋地质国家重点实验室,上海 200092;

^②中国石化石油物探技术研究院,江苏南京 210014)

王华忠,刘少勇,孔祥宁,蔡杰雄,方伍宝. 大规模三维地震数据 Kirchhoff 叠前深度偏移及其并行实现. 石油地球物理勘探,2012,47(3):404~410

摘要 本文提出了基于共炮检距数据体的适用于大规模三维地震数据体的 Kirchhoff 叠前深度偏移(PSDM)并行实现方案。其基本思路为:①利用任意介质中的动态规划法三维旅行时计算方法提供旅行时场;②按照炮检距组织数据;③根据机器物理内存大小分配成像深度段;④对共炮检距数据分深度段进行基于消息传递接口(MPD)的进程并行处理;⑤对单进程作业进一步利用 OpenMp 并行同时实现多个单道的成像处理。此方案可充分利用节点内存,减少数据输入/输出(I/O)量。该方案是将单个炮检距的某个深度段的成像空间和需要的所有炮的对应深度段的旅行时场调入内存中,每一深度层的成像均在内存中进行,而且 Inline 和 Crossline 方向的偏移孔径可以自适应地根据偏移速度和成像深度进行选择,并采用空变反假频技术,可较大地提高成像精度。成像结果按体偏移形式输出,同时也可以输出成像道集。该方案在内存利用、数据 I/O 量和计算效率上达到最佳平衡。并行方式充分采用 MPI+OpenMp 混合编程模式,可高效、高精度地处理大规模三维地震数据。理论和实际数据的偏移成像结果均证明了本文方案的正确性和高效性。

关键词 大规模地震数据体 Kirchhoff 叠前深度偏移 三维旅行时计算 并行策略

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

20世纪70年代Schneider^[1]的经典论文奠定了Kirchhoff积分偏移的理论基础。从20世纪90年代初到现在,Kirchhoff叠前深度偏移在学术界受到特别关注,且在工业界得到广泛应用^[2,3]。然而,三维Kirchhoff PSDM的完美实现还存在很多问题,譬如反假频问题、加权算子的计算问题、偏移孔径的选择问题等。旅行时计算方式是既影响成像质量又制约成像效率的重要因素,I/O方式及并行模式是影响工业界大规模地震数据叠前深度偏移实用化的核心问题。当前如何利用分布式并行计算机集群实现对大规模地震数据体的三维Kirchhoff PSDM,并达到计算效率、数据I/O效率和计算精度的最佳化,依然是一项很有挑战性的工作。

Gray^[4]使用一种空变频率选择的积分算子压制偏移算子的假频;Zhang等^[5]讨论过积分法的振幅加权的理论表达,但不适用于变速介质;Hertweck等^[6]分析了偏移孔径对成像结果的影响;王华忠等^[7]提出时间偏移的自适应孔径选择问题;Gray等^[8]使用差分法求解程函方程进行Kirchhoff偏移,指出了用解程函方程的方法计算旅行时(不需要插值)比传统射线追踪更具有优势;王华忠等^[9]提出的适合介质速度任意横向变化的三维旅行时计算方法是解决Kirchhoff PSDM中旅行时计算的较好方法。

在前人研究的基础上,本文提出了一种适合大规模三维地震数据的Kirchhoff PSDM的并行实现方案,并重点讨论自适应偏移孔径的选择问题和提高数据I/O效率及并行计算效率问题,这两个问题对Kirchhoff PSDM的实际应用具有重要意义。

*上海市同济大学海洋与地球科学学院海洋地质国家重点实验室,200092。Email:liusy1985@126.com。

本文于2011年10月19日收到,最终修改稿于2012年3月8日收到。

本研究由国家高技术研究发展“863”计划项目(2006AA09Z323)和国家重点基础研究发展“973”计划项目(2006CB202402)联合资助。

对于自适应偏移孔径的选择问题,本文采用快速扫描方法找到反射波对应的等时面,用等时面的范围来决定偏移孔径的大小。鉴于积分法 PSDM 单道处理的实现方案比波动方程 PSDM 的实现更为灵活,其主要问题是如何实现数据 I/O 和计算设备的较好匹配,其中数据包括旅行时场数据和地震数据两部分。本文对旅行时场采用一次读入一个深度段(深度段数根据内存大小来定),在该深度范围内遍历一遍地震数据的 I/O 方式,可以达到 I/O 数据量、内存利用率的平衡,大幅度提高程序运行的效率。该数据 I/O 方式,对每一个共炮检距数据的不同的深度段进程并行,进程内对单道成像处理利用多线程并行以达到节省内存、提高并行效率的目的。本文采用 Gray 等^[4]提出的空变滤波器进行反假频滤波,采用常速介质中 Green 函数来计算振幅加权系数。

利用本文提出的方案对 SEG/EAGE 三维盐丘模型和中国南方某山地探区的一个实际三维地震资料进行处理,处理结果显示能准确对陡构造和盐丘边界成像,且计算效率远高于裂步傅里叶(SSF)方法,表明该方案可高效地、高精度地用于三维大规模地震数据体的叠前深度偏移。

2 Kirchhoff 积分偏移方法原理

根据“惠更斯—菲涅尔原理”,已知地表一个线段上(二维)或一个面积上(三维)的地震波场,可以计算该线段外或该面积外任意点处的向前或向后传播的波场。其数学表达式可用 Kirchhoff 积分公式表示为

$$U(\mathbf{r};\omega) = \int dA \frac{\partial G(\mathbf{r},\mathbf{x};\omega)}{\partial \mathbf{n}} U(\mathbf{x};\omega) \quad (1)$$

式(1)是一个频率—空间域的地震波正向传播的 Kirchhoff 积分描述公式。当已知 Green 函数 $G(\mathbf{r},\mathbf{x};\omega)$ 和某一个面上的局部观测值 $U(\mathbf{x};\omega)$, 就可以计算观测面外任意点的波场 $U(\mathbf{r};\omega)$ 。局部观测值 $U(\mathbf{x};\omega)$ 可以认为是二次源, Green 函数是二次源到计算点之间的脉冲响应。 \mathbf{x} 代表观测点的坐标, A 代表观测范围, \mathbf{r} 代表要计算的场点坐标。

对于 Kirchhoff 偏移,已知 Green 函数 $G(\mathbf{r},\mathbf{x};\omega)$ 和局部观测值 $U(\mathbf{x};\omega)$, 把局部观测值 $U(\mathbf{x};\omega)$ 作为二次源(虚拟的二次源)进行反向传播后,观测到的能量汇聚于散射点(真实的二次源)。提取出汇聚

后的场作为成像结果就实现了 Kirchhoff 偏移成像。显然, Kirchhoff 偏移实现了绕射波的叠加。因此, Kirchhoff 偏移成像公式为^[1]

$$I(\mathbf{r}, t = 0) = -\frac{1}{2\pi} \int dA_0 \frac{\cos\theta}{RV} \left[\frac{\partial U}{\partial t}(\mathbf{x}, t_0) + \frac{V}{R} U(\mathbf{x}, t_0) \right]_{t_0 = t + \frac{R}{V}} \quad (2)$$

其中: A_0 为地表处炮点和检波点的分布范围; θ 是从成像点到一个接收点时地震波传播所沿射线的出射角; R 代表反射点到检波点时地震波所走过的距离; $\cos\theta = z/R$ 为倾斜因子(z 代表成像点的深度), 倾斜因子表示散射点作为二次源时振幅随出射角的变化; $t' = R/V$ 为延迟时间; t_0 为炮点到接收点的反射时间, V 为地震波传播速度。Kirchhoff 偏移的加权系数是由 Green 函数决定的, 式(2)是在假设地下介质为常速时得到 Green 函数, 并代入式(1)导出的。显然, 在变速介质中这样的加权系数是不准确的。在变速介质中, 一般用波场的 WKBJ 近似来表示 Green 函数^[10], 而由积分法估计反射系数的反演必须考虑变速介质的 Green 函数, 具体可参考 Bleistein 的专著^[11]。在当前计算机条件下, 工业界大规模使用的 Kirchhoff 偏移的加权系数还是由常速介质下的 Green 函数导出, 即式(2)的形式。由于常速介质 Green 函数的假设对构造成像影响不大, 本文仍采用式(2)定义的 Green 函数。

3 大规模三维地震数据体的 Kirchhoff PSDM 实现方案

3.1 实现方案描述

当前的计算机集群发展迅速, 三维 Kirchhoff PSDM 的实现一定要适应计算机集群的结构才能达到最佳的计算效率。对于大规模地震数据的叠前深度偏移, 由于要输出叠前成像道集, 它占用的硬盘空间非常大, 而 PC-Cluster 系统配备的局部盘不足以容纳全部甚至部分叠前道集数据。另外, 事先计算好的旅行时场数据量也是巨大的, 旅行时数据的 I/O 量和 I/O 方式也对程序运行效率影响很大。由于 Kirchhoff PSDM 是一个单道处理, 对每个地震道进行并行可以充分利用当前大规模计算机集群, 但实际上这样做是效率极低的。因为这不仅会造成巨量的旅行时场的重复 I/O, 而且成像道集的输出

也会有巨大的 I/O 压力,另外当前计算机集群单节点内存较大的特点也没有充分利用。因此高效并行实现 Kirchhoff PSDM 需要综合考虑节点存储能力、内存大小、I/O 量及并行效率等多方面因素。

考虑当前计算机集群节点多、单节点内存大、本地盘小、共享盘大和多 I/O 通道等特点,综合考虑内存使用量、地震数据 I/O 量、旅行时数据 I/O 量、成像结果 I/O 量和偏移成像的精度,我们设计了一个面向大规模地震数据体的三维 Kirchhoff PSDM 并行实现方案。该方案的设计主要遵循以下几项原则:

- (1)对共炮检距数据体进行三维 Kirchhoff PSDM,把叠前偏移转化为一系列类似的三维叠后偏移;
- (2)旅行时的输入与成像深度层匹配起来,把当前成像深度段的所有旅行时场调入内存;
- (3)按成像深度层而不是成像线(Inline 方向的成像线)进行成像等时面处理,可自适应处理孔径;
- (4)对共炮检距数据体利用消息传递接口(MPI)进程并行,在单个共炮检距数据体内利用 OpenMp 线程并行。

图 1 是依据以上原则设计的实现框架。旅行时场计算直接采用 MPI 主从模式对所有炮并行, Kirchhoff 积分 PSDM 则采用 MPI 主从模式对炮检距并行,每个炮检距内采用 OpenMp 并行,每一个共炮检距道集的成像结果存放在每个处理器附带的局部盘上。把所有等炮检距的成像数据体收集在一起,放到全局盘上,通过重排序,就可以产生叠前成像道集。成像道集加工处理后叠加,就形成最终的叠前偏移成像结果。

图 2 是单个节点上共炮检距数据局处理流程及 OpenMp 并行方案,在实施过程中输入全部“炮点”

位置的旅行时数据体。此处加引号的含义是这样的炮点为旅行时计算点,并非真实的野外炮点位置。这样做的好处是:①旅行时数据的 I/O 量仅仅是把所有旅行时数据读取一次的量,不需要重复读取;②可实现沿深度片的 Kirchhoff 偏移成像,孔径容易处理。这样做的缺点是:内存中的旅行时场是一个庞大的五维数组。

3.2 旅行时场的存储及插值

在 3D Kirchhoff PSDM 过程中,旅行时场的计算并非严格按照每道炮检坐标位置进行,而是按照成像坐标范围进行较粗的规则网格剖分(比如 $200m \times 200m$)。本文采用王华忠等^[7]提出的任意变化介质中的动态规划法计算旅行时场。图 3 是旅行时计算炮点分布示意图,黑色网格线交点为旅行时计算炮点位置,即在一定范围内计算 $N_{sx} \times N_{sy}$ 炮的旅行

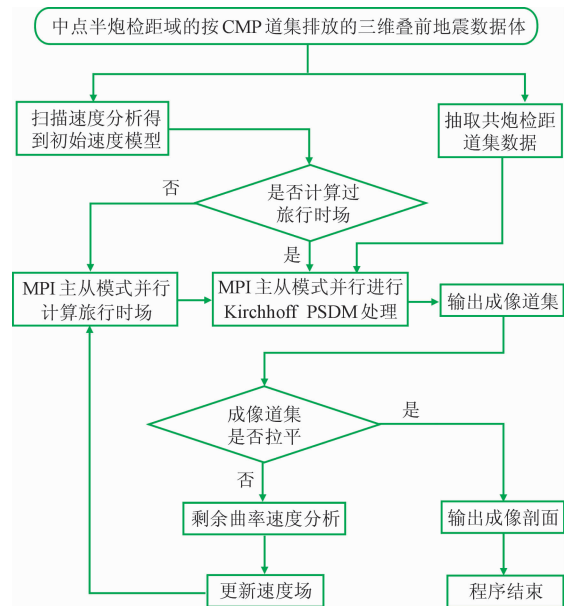


图 1 本文方案总体实现流程

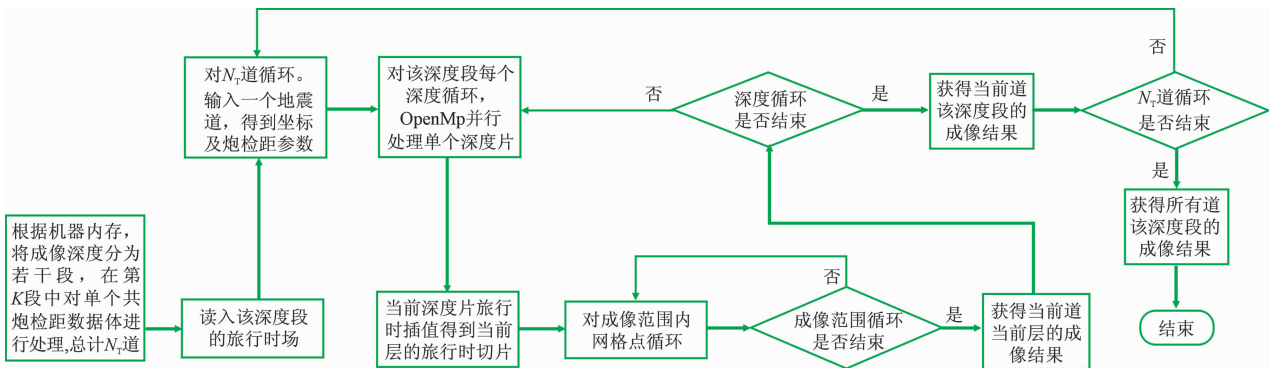


图 2 单个节点共炮检距数据成像流程

时计算波场,其中 N_{SX} 和 N_{SY} 分别为 X 和 Y 方向的炮点数。根据互易原理,检波点的旅行时场不再计算。实际的炮检点的旅行时场通过插值得到。考虑偏移孔径后确定一个旅行时场计算范围,单炮旅行时场是一个 $N_{TX} \times N_{TY} \times N_z$ 的三维场,其中 N_{TX} , N_{TY} , N_z 分别是旅行时计算在三个方向的样点数。

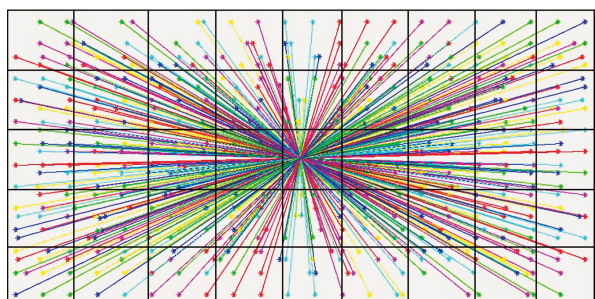


图 3 旅行时场炮点分布及野外炮检点分布示意图

彩色点为野外炮检点,关于中心点对称的相同颜色表示一对炮检点;黑色网格线交点为旅行时计算炮点

由于单炮旅行时是一个三维场,内存中的旅行时场实际上是一个大小为 $N_{TX} \times N_{TY} \times N_{SX} \times N_{SY} \times N_z$ 的五维数组,对上千平方千米的连片数据当前计算机难以满足内存需求。我们的解决方案是:①对旅行时场采用压缩处理,例如采用两字节整形变量存储;②降低旅行时场采样密度,炮点及每一炮的采样都可以稀疏化;③在深度上分 K 段处理,其中 K 为大于等于 1 的正整数。将 5 维数组转化成 4.5 维 $N_{TX} \times N_{TY} \times N_{SX} \times N_{SY} \times N'_z$,其中 $N'_z = N_z/K$,极端情况下是一个四维数组($N'_z = 1$)。匹配 OpenMp 线程并行共享内存的特点,该方案可以在当前主流计算机集群(单节点内存 8G~48G)高效实现。

由于每一道的炮检点很可能不落在旅行时场的炮点网格点上(图 3),这就需要一次插值来得到当前道对应旅行时。另外由于对每一炮的计算网格也稀疏化了($40\text{m} \times 40\text{m}$),而成像点的网格往往比较密($20\text{m} \times 20\text{m}$),所以也需要插值来得到当前成像网格点上的旅行时。本文选用双线性插值来实现这一过程,如图 4 所示,矩形总面积为 S ,它是 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 四个小矩形面积之和。四个顶点坐标分别为 (x_i, y_j) 、 (x_{i+1}, y_j) 、 (x_i, y_{j+1}) 和 (x_{i+1}, y_{j+1}) ,则 $P(x, y)$ 点的插值公式为

$$f(x) = c_1 f(x_i, y_j) + c_2 f(x_{i+1}, y_{j+1}) + c_3 f(x_{i+1}, y_j) + c_4 f(x_i, y_{j+1}) \quad (3)$$

其中: $c_1 = S_3/S$; $c_2 = S_1/S$; $c_3 = S_4/S$; $c_4 = S_2/S$ 。

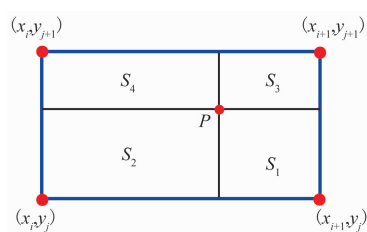


图 4 双线性插值示意图

3.3 I/O 量和内存量的估计

上述并行方案旨在最大限度利用内存以减少 I/O。假设叠前地震数据体大小为 500GB,地震数据的总 I/O 量为 $K \times 500\text{GB}$ (K 为深度上分段数目)。假设五维旅行时场大小为 50GB,则旅行时场的总 I/O 量小于 $N_p \times 50\text{GB}$ (N_p 为并行节点个数)。假设成像结果的大小为 2GB,则成像道集的总 I/O 量为 $N_H \times 2\text{GB}$ (N_H 为成像点道集的炮检距个数)。总共 I/O 量应该小于 $K \times 500\text{GB} + N_p \times 50\text{GB} + N_H \times 2\text{GB}$ 。传统单道读取旅行时实现仅旅行时场 I/O 量就达 $N_T \times 50\text{GB}$ (N_T 为总道数),通常要高出本文总 I/O 总量几个数量级。在减少 I/O 总量同时,本文采用每次读取一个 4.5 或者 5 维旅行时场的 I/O 方式,这要优于传统每次读取一个三维旅行时场的方式,大大减少了 I/O 压力。

关于内存量的要求,每个节点内存需要放下一个深度段的旅行时场和成像结果,旅行时场是一个 $N_{TX} \times N_{TY} \times N_{SX} \times N_{SY} \times N'_z$ 的五维数组,成像结果是 $N'_z \times N_{MX} \times N_{MY}$ (N_{MX} 、 N_{MY} 为水平方向成像空间样点数)的一个三维数组。要尽最大的内存量开这两个数组,因为内存量越大, I/O 量越小,计算效率越高。最好把成像结果都放到内存中,这样 $K = 1$,叠前地震数据仅仅遍历一次。本方案 OpenMp 线程级并行的主要优势就是节省内存,利用空间来平衡计算量和 I/O 时间。

3.4 自适应偏移孔径的选择

本文在考虑实现效率的同时可以方便地实现自适应孔径的选择。由于每一段成像体的旅行时都驻留内存中,因此可根据最大旅行时找到一个合适的偏移孔径,从而减少偏移噪声,提高成像精度。

自适应孔径的实现原理与时间偏移实现类似^[5],但是在做法上更为简单。首先在 X 方向和 Y 方向上给定一个相对较大的孔径,并在孔径内做单道偏移,对于输入的某一道,在某一个深度对应的旅行时已知,判断该时间是否在初至波旅行时和最大

的旅行时(记录的长度对应的时间)之间,若在此范围内则进行成像,不在此范围的则跳出循环。这样做实际上做到了沿 Inline 方向和 Crossline 方向的偏移孔径随速度和深度的自适应变化。不需要再单独考虑孔径如何选择。

4 数值算例

4.1 理论模型和实际资料结果

本文利用 SEG/EAGE 三维盐丘模型测试上述方法的效率及效果。模型数据描述为:25束线,炮线间距为320m,炮间距为80m;线间距为80m,道间距为40m;每束线96炮,每炮65道,记录长度5s,采样点数625个,时间采样率8ms。数据 Crossline 方

向覆盖 Line20~Line218 共199条线,Inline 方向覆盖 CDP191~CDP590 共400个点。Line140 和 Line150 位于高速盐丘凸起部位。图5a和图6a为本文方案的成像结果,图5b和图6b为对应的速度模型。对比速度模型和成像剖面可以看出,本文的 PSDM 实现方案能准确对陡构造和盐丘边界成像,效果良好,盐丘底部由于受到高速岩体的影响,积分法不能对其精确成像。

应用本文的3D Kirchhoff PSDM 方案对中国南方某山地区的一个三维实际资料进行处理,工区 Crossline 方向覆盖 Line570~Line660 共90条线。其中 Line600 和 Line610 的本文方案的成像结果如图7a和图8a所示。对比本文结果和裂步傅里叶(SSF)偏移结果(图7b和图8b)可以看出,本文成像

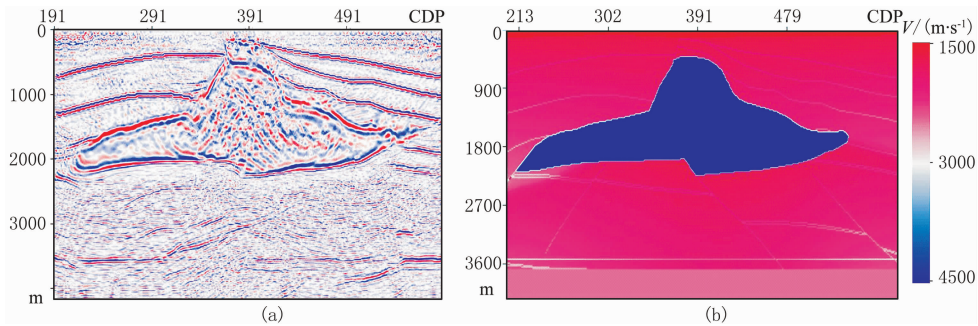


图5 Line140的成像结果(a)与速度模型(b)

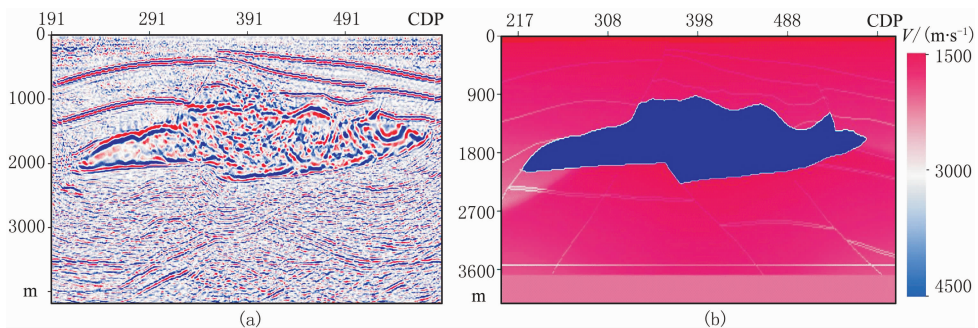


图6 Line 150的成像结果(a)、与速度模型(b)

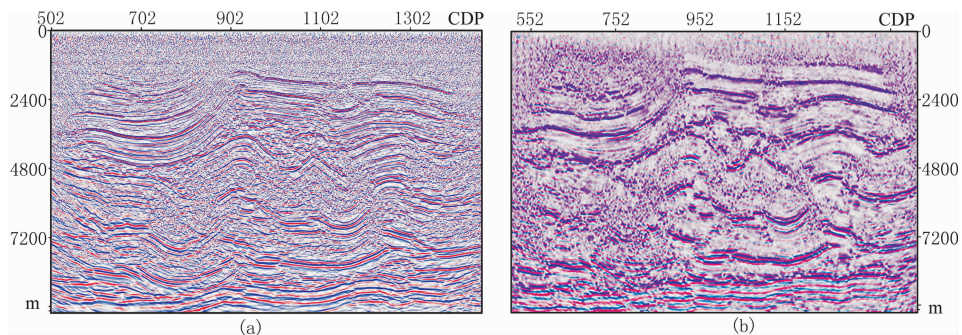


图7 实际三维数据 Line600的 Kirchhoff PSDM 偏移结果(a)与 SSF 偏移结果(b)

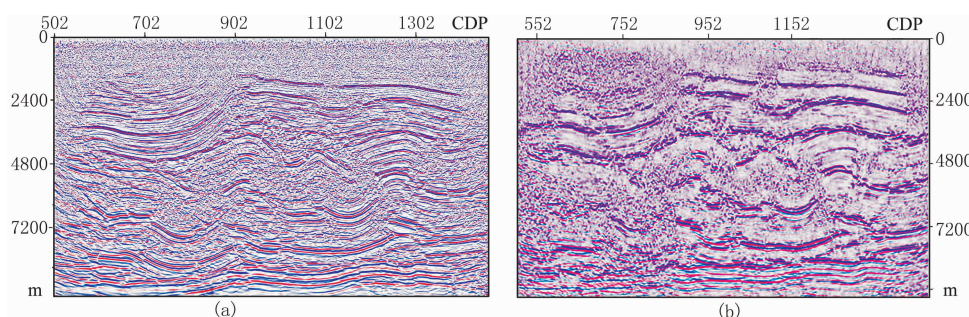


图 8 实际三维数据 Line610 的 Kirchhoff PSDM 偏移结果(a)与 SSF 偏移结果(b)

剖面清晰,断层刻画更干脆,可见在山地勘探中应用高精度积分法成像要优于波动方程深度偏移成像。此外,该方法可以方便地输出成像点道集,实现基于成像点道集的速度分析或者其他基于道集的研究。

4.2 效率对比分析

裂步傅里叶法(SSF)是波动方程偏移中一种高

效方法,本文对比该方法与本文 Kirchhoff PSDM 算法的效率,结果见表 1。表中数据显示,本文实现方案未经过 OpenMp 优化的情况下效率是 SSF 的两倍以上。

MPI+OpenMp 这种混合编程模式提供节点内和节点间的两级并行,能充分利用共享存储模型和

表 1 Kirchhoff PSDM 与 SSF 效率对比

机器条件及数据规模	该工区数据规模为 70GB,共 594 万道(工区 54.8km ²)。机器硬件条件为:①处理器,Intel(R) Xeon(R); ②处理器主频为 2.66GHz; ③物理内存为 16GB; ④每个节点 2 个 CPU (每个 CPU 4 个核)		
偏移方法	单核处理时间/h	总进程数/个	总耗时(单核时间×进程数)/h
Kirchhoff PSDM	44.3	113	5005.9
SSF	45.8	257	11770.6

消息传递模型的优点,有效地提高了计算效率。经过 OpenMp 多线程优化后,基本可以达到线性加速比,测试结果见表 2。表中数据显示 4 进程 2 线程运算效率最高,基本达到线性加速比(8 个进程或者线程情况下,加速比为 8 时称为线性加速)。如果只采用传统 MPI 并行,加速比为 5.7,低于 MPI+OpenMp 混合编程模式。实际上混合编程模式的加速比达到传统 MPI 并行加速比就很有计算优势了,因为混合编程模式可以通过共享内存来减少 I/O 数据量。在实际处理中推荐使用单节点单进程匹配 8 线程或者单节点 2 进程匹配每进程 4 线程,这样可以节省 8 倍或者 4 倍的内存,从而可以减少数据 I/O 量达到提高效率的目的。

表 2 Kirchhoff PSDM OpenMp 线程优化加速比测试结果

进程数/个	每个进程的线程数/个	完成任务时间/s	完成任务总时间/s	并行加速比
1	1	656.6	657	1.0
1	8	112.9	903	5.8
2	4	107.2	858	6.1
4	2	83.0	664	7.9
8	1	116.0	928	5.7

5 结论与讨论

本文针对当前工业界拥有大规模地震数据的特点及对该类数据进行 Kirchhoff PSDM 高效、高精度实现问题,基于当前分布式计算机特点,在平衡内存需求量、数据 I/O 量、成像精度及并行力度等方面的问题的基础上,提出了一套 Kirchhoff PSDM 高效实现方案。其主要措施如下:

(1)采用 MPI+OpenMp 混合编程模式并行实现 Kirchhoff PSDM,通过炮检距分组地震数据,并对每个共炮检距数据分深度段成像进行进程级作业分组,单道成像则进行线程级作业分组,这样可最大限度地利用节点内存并保证并行力度。

(2)对旅行时场用压缩存储和稀疏采样来节省内存(成像时对旅行时插值相当于时间换空间)。同时根据计算节点物理内存把成像深度样点分成若干深度段,每一段所用的旅行时场和成像空间可以驻留在内存中,这样可保证旅行时场数据 I/O 量最小(旅行时场数据 I/O 是计算效率的瓶颈)以提高计算效率。

(3)对于自适应偏移孔径的选择问题,我们用快速扫描方法找到反射波对应的等时面,用等时面的范围来决定偏移孔径的大小。该方法可以根据速度和深度变化自适应找到合适的孔径,从而减少偏移噪声,提高成像精度。

理论模型和实际数据证明了本文的实现方案的优越性。该方案可以方便地发展到跳线偏移,进一步提高计算效率,为深度域速度分析提供高效引擎。在该方案基础上考虑在数据域的 Beam-Ray 处理^[12]和成像域的 Beam-Ray 处理^[13]及采集脚印^[14]的压制会进一步提高 Kirchhoff 积分偏移的成像效率和效果。本文方案对于这些更高精度的三维 Kirchhoff 积分的叠前成像方法而言是一项基础工作。

感谢胜利油田物探研究院和中国石化集团公司科技部的资助。

参考文献

- [1] Schneider W A. Integral formulation for migration in two and three dimensions. *Geophysics*, 1978, 43(1): 49~76
- [2] 张红军,黄川丽,沈阳. 三维叠前深度偏移技术在非洲 A 区的应用. *石油地球物理勘探*, 2008, 42(增刊 2): 125~129
Zhang Hongjun, Huang Chuanli, Shen Yang. Application of 3D prestack depth migration in A region of Africa. *OGP*, 2008, 42(Sup 2): 125~129
- [3] 王翠华,何光明,张帆. 三维叠前深度偏移在川中地区的应用. *石油地球物理勘探*, 2009, 43(增刊 1): 72~75
Wang Cuihua, He Guangming, Zhang Fan. Application of 3D prestack depth migration in the middle of Sichuan. *OGP*, 2009, 43(Sup 1): 72~75
- [4] Gray S H. Frequency-selective design of the Kirchhoff migration operator. *Geophysical Prospecting*, 1992, 40(5): 565~571
- [5] Zhang Y, Gray S and Young J. Exact and approximate weights for Kirchhoff migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19: 1036~1039
- [6] Hertweck T, Jager C and Goertz A et al. Aperture effects in 2. 5D Kirchhoff migration: A geometrical explanation. *Geophysics*, 2003, 68(5): 1673~1684
- [7] 王华忠,蔡杰雄,孔祥宁等. 适于大规模数据的三维 Kirchhoff 积分法体偏移实现方案. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1699~1709
Wang Huazhong, Cai Jiexiong, Kong Xiangning et al. An implementation of Kirchhoff integral prestack migration for large-scale data. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(7): 1699~1709
- [8] Gray S H and May W P. Kirchhoff migration using eikonal equation traveltimes. *Geophysics*, 1994, 59(5): 810~817
- [9] 王华忠,方正茂,匡斌等. 任意介质中的动态规划法地震波走时计算. *地球物理学报*, 2001, 44(增刊): 179~189
Wang Huazhong, Fang Zhengmao and Kuang Bin et al. 3-D travelttime calculation in arbitrary distribution with dynamic programming approach. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(Sup): 179~189
- [10] Clayton R W and Stolt R H. A Born-WKB inversion method for acoustic reflection data. *Geophysics*, 1981, 46(11): 1559~1567
- [11] Bleistein N, Cohen J K and Stockwell J W J. *Mathematics of Multi-dimensional Seismic Imaging and Inversion*. New York: Springer-Verlag Inc, 2001
- [12] 王华忠,张元巧,任浩然. 叠前地震数据射线束道集叠加压制噪音. *石油物探*, 2007, 46(6): 356~360
Wang Huazhong, Zhang Yuanqiao, Ren Haoran. Prestack noise suppression with ray-beam gather stacking. *GPP*, 2007, 46(6): 356~360
- [13] Sun Y H and Qin F H. 3-D prestack Kirchhoff beam migration for depth imaging. *Geophysics*, 2000, 65(5): 1592~1603
- [14] Wang Xiongwen, Wang Huazhong, Cai Jiexiong. Reducing the acquisition footprint using coordinate transformation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 3015~3019

(本文编辑:宜明理)