

The Multi-Level Parallel Algorithm Research Applying on Seismic Migration Imaging

CHEN Hui^{1,2}, LI Luming², LUO Shengxian², LIU Yali³

1. Key Lab of Geomathematics of Sichuan Province, Cheng Du University of Technology, Chengdu, china

2. Key Lab of Earth-exploration and Information Techniques of Education Ministry of China, Chengdu, China

3. College of Computer Science and Technology, Xuzhou Normal University, Xuzhou, China

e-mail: sirchenh@163.com

Abstract: Seismic migration imaging technology can effectively solve the imaging of complex surface area or complex reservoir; however, its application and promotion are affected by the huge amount of computation. Although the high-performance PC cluster technology has upgraded computational efficiency greatly, but increasing the number of CPU nodes will lead to high cost of production, high cluster heat productivity and seriously decline of computing performance. For all above reasons, the paper realizes the pre-stack depth migration algorithms, proposes the multi-level parallel migration algorithm because of kernel features in nodes, based on MPI, upgrades CPU calculating performance of the single node, and improves the parallel efficiency fully.

Keywords: migration imaging; parallel compute; multi-level parallel; PC cluster

地震偏移成像中的多层次并行算法研究

陈 辉^{1,2}, 李录明², 罗省贤², 刘亚丽³

1. 成都理工大学“数学地质”四川省高校重点实验室, 成都, 中国, 610059

2. “地球探测与信息技术”教育部重点实验室, 成都, 中国, 610059

3. 徐州师范大学计算机科学与技术学院, 徐州, 中国, 221116

e-mail: sirchenh@163.com

【摘 要】地震偏移成像技术能够有效解决复杂地表地区或复杂油气藏的构造成像问题, 然而巨大计算量一直影响其应用和推广。虽然高性能 PC 机群技术使计算效率得到提升, 但单纯的增加 CPU 节点个数导致生产成本的增加, 并致使集群发热量增大又会导致计算性能的严重下降。鉴于此, 本文深入研究了叠前深度偏移算法, 在实现 MPI 并行偏移的基础上, 利用节点内的多内核特性, 提出了多层次并行偏移算法, 有利于提升单个节点的 CPU 计算性能, 充分提高并行效率。

【关键词】偏移成像; 并行计算; 多层次并行; PC 集群

1 引言

地震叠前深度偏移是复杂地质构造精确成像的重要手段, 它是解决复杂构造条件下石油勘探开发问题的关键技术, 在油气勘探与开发中发挥了重要作用^[1]。目前, 工业上普遍使用的是 Kirchhoff 积分法, 它是一种高频近似方法, 当构造复杂时, 由于多值旅行时计

算、偏移孔径选择及振幅保真等方面处理的困难, 该方法常得不到令人满意的偏移效果。基于波场外推的偏移方法, 如频率空间域的差分法和混合法是精度较高的方法, 且无条件稳定, 但是这些方法巨大计算量问题一直影响其在实际生产中的应用和推广^[2-3]。

随着计算机硬件价格的急速下降和高性能集群技术的飞速发展, 针对地震勘探资料处理并行算法的研究卓有成效地开展起来^[4-8]。并行计算的性能除了依赖并行软件之外, 更多的是依赖计算机硬件, 而提升计算机硬件性能的方式主要是增加节点个数和提升单个

基金项目: 教育部高校博士点基金项目(20070616004)与数学地质四川省高校重点实验室开放基金资助

Foundation Item: Doctoral Fund of Ministry of Education of China (NO. 20070616004); Fund of Key Lab of Geo-mathematics of Sichuan Province

节点的 CPU 计算性能。增加 CPU 节点个数直接导致生产成本的增加，并引发散热问题又会导致计算性能的严重下降，所以计算机集群技术并不能一味的依靠增加节点个数来提升计算性能，因此，必须考虑利用多核技术提升单个节点的 CPU 计算性能。

单炮叠前深度偏移精度高，物理意义明确，处理野外数据灵活，但计算量大。如何提高单炮偏移的效率是基于炮集叠前深度偏移方法能否实用化的重要问题。本文首先研究了叠前深度偏移算法，以 MPI 为基础，对偏移算法的 MPI 与 OpenMP 多层次并行技术进行深入研究，将二者有机结合，在充分利用 MPI 良好的并行性和可移植性前提下，通过 OpenMP 技术提升多核性能。实验和分析表明，MPI 与 OpenMP 相结合的多层次并行模型性能高于纯 MPI 编程模型的性能。

2 波动方程叠前深度偏移

由三维声波方程

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

对(1)式作三维傅里叶变换，可求解得到

$$\bar{\bar{P}}(k_x, k_y, z, \omega) = \bar{\bar{P}}(k_x, k_y, 0, \omega) e^{\pm ik_z z} \quad (2)$$

式中， $k_z^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 - k_y^2$ 。(2)式称为相移延拓公式，仅适应 v 为常数的情况^[3]。

实际速度是纵横向变化的，因此(2)式中的平方根存在误差

$$\xi = \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}} - \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}} \quad (3)$$

通常是引入一个常速度值作为背景速度，然后围绕背景速度值进行泰勒展开得到不同阶次的近似解。

令：

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}}, \quad k_{z0} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}}$$

将 k_z ， k_{z0} 绕背景速度值进行泰勒展开，并将展开后的结果代入到(4)式，可得

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\omega}{c} (u-1) - \frac{1}{2} \left[\frac{v^2}{\omega^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] \frac{\omega}{c} u (1-u) \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \binom{m}{n} \left[\frac{v^2}{\omega^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right]^n \frac{\omega}{c} u (1-u) \delta_n \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $u = \frac{c}{v} \leq 1$ ， $\delta_n = \sum_{l=0}^{2n-2} u^l$ ， $m = \frac{1}{2}$ ，

$$\binom{m}{n} = \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!}$$

根据实际处理精度的需要，可以选择不同的计算精度，但随着阶数的增加，对计算精度的贡献逐渐降低，而且计算量也随着阶数的增加而增大，通常只需二阶泰勒级数展开就可以达到精度要求。

设 $\bar{\bar{S}}(k_x, k_y, 0, \omega)$ 为震源函数 $S(x, y, 0, t)$ 的三维傅里叶变换， $\bar{\bar{R}}(k_x, k_y, 0, \omega)$ 为地面接收的地震记录 $R(x, y, 0, t)$ 的三维傅里叶变换，则将震源函数在频率波数域正向延拓 z 的公式为

$$\bar{\bar{S}}(k_x, k_y, z, \omega) = \Lambda(0 \rightarrow z) \bar{\bar{S}}(k_x, k_y, 0, \omega) \quad (5)$$

将记录 R 反向延拓 z 的公式为

$$\bar{\bar{R}}(k_x, k_y, z, \omega) = [\Lambda(0 \rightarrow z)]^{-1} \bar{\bar{R}}(k_x, k_y, 0, \omega) \quad (6)$$

对(5)、(6)式作三维反傅里叶变换，并根据时间或深度一致性成像原理，求两波场互相关为

$$I(x, y, z) = \int \bar{\bar{S}}(x, y, z, \omega) \bar{\bar{R}}^*(x, y, z, \omega) d\omega \quad (7)$$

即得成像结果，其中 $\Lambda(0 \rightarrow z)$ 为偏移算子。

3 叠前深度偏移并行化

基于共炮道集的波动方程叠前深度偏移的基本思路是，首先对每一个单炮进行叠前深度偏移成像，然后再把各炮成像结果在对应的地下位置上叠加，从而得到整个成像剖面。对于每一炮，标准的波动方程叠前深度偏移可以分为3步：(1)震源波场的正向延拓；(2)炮集记录波场的反向延拓；(3)求取成像值。

3.1 基于 MPI 的单层次并行算法

通过炮集偏移基本思路的分析，每个单炮记录偏移可以独立运算，与其它单炮记录互不影响，无需相互通信，主节点收集数据，将任务分配给从节点，并控制着从节点的操作顺序和所有的数据传输。这种并行策略有利于充分利用各节点的计算能力，并最低限度的减少节点之间的通信量。这样就可以由主节点读取地震记录，并将任务分配给各从节点，对于每个单炮记录都可以在不同的节点上独立运行，最后由主节点将各从节点的偏移结果进行叠加，得到最终的成像结果，基于 MPI 的单层次并行偏移思路如图 1 所示。

3.2 基于 MPI+OpenMP 的多层次并行算法

多层次并行是在MPI的波动方程叠前深度偏移并行算法的基础上提出，它可以在每个节点内部各内核之间再次并行。炮集偏移首先通过主节点读取地震记录，并将任务分配给各从节点，每个单炮记录都可以在不同的节点上独立运行，在每个节点内部，通过OpenMP 技术将偏移数据按照频率分配给各内核处理，各内核之间相互独立，并行运行。这就提升了单个节点的并行效率，充分利用了节点的内核。然后将各内核处理结果叠加，得到该节点的处理结果。最后由主节点将各从节点的偏移结果进行叠加，得到最终的成像结果。具体思路如图 2 所示。

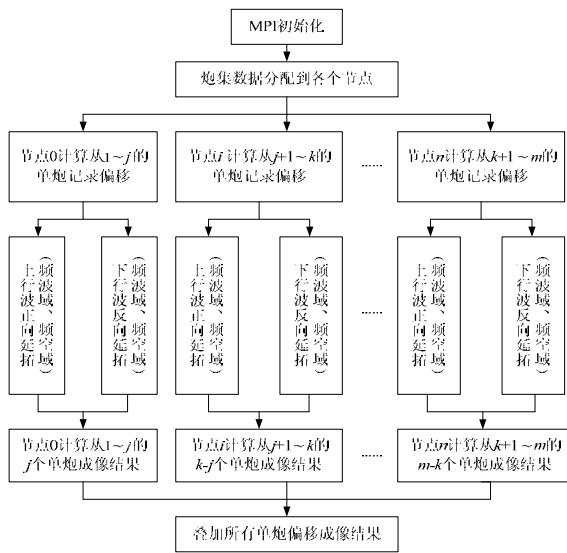


Figure 1. Parallel chart based on shot pre-stack migration
图 1. 基于炮集叠前偏移的并行方案流程图

4 模型验证与分析

在 Sun Fire GV890 系统上实现了偏移算法的多层次并行编程。Sun Fire GV890 处理器类型为 UltraSPARC IV+，操作系统为 Solaris9，处理器个数为 8，每个处理器皆为双核处理器。该系统编译器支持 OpenMP 制导。

4.1 模型验证

本文采用凹陷模型用于炮集偏移，速度场维数为 256×256，道间距 10 米，深度采样间隔为 4 米。对该速度模型，为了透彻研究地下地质情况，只移动炮点，检波点不变。首先从第 4 道开始，每炮间隔 8 道，共计放 32 炮。每炮 256 道接收，每道时间样点数为 256，时间采样率为 4 毫秒。图 3 为凹陷模型，图 4 为偏移后的剖面。

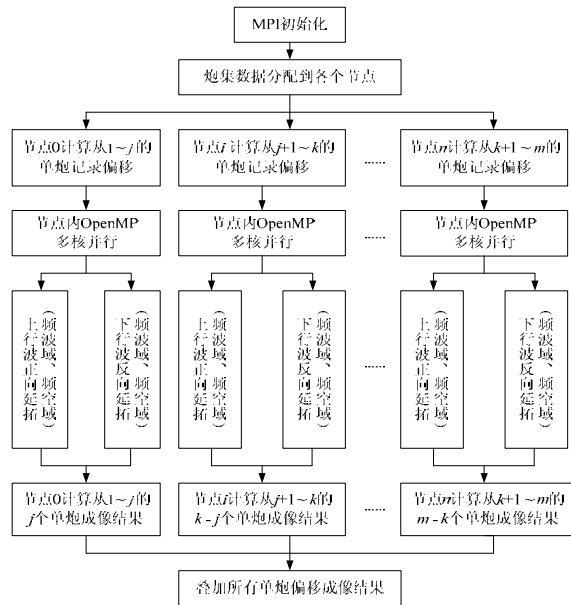


Figure 2. Multi-level parallel chart based on shot pre-stack migration

图 2. 基于炮集叠前偏移的多层次并行方案流程图

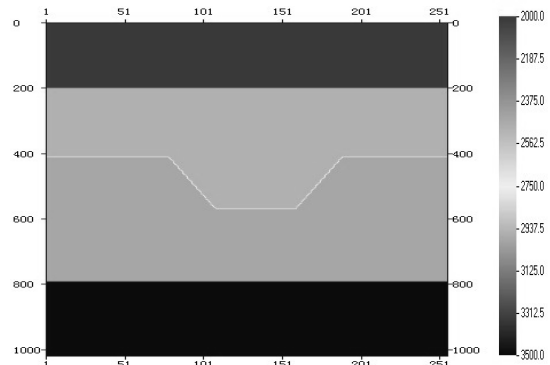


Figure 3. Concave model
图 3. 凹陷模型

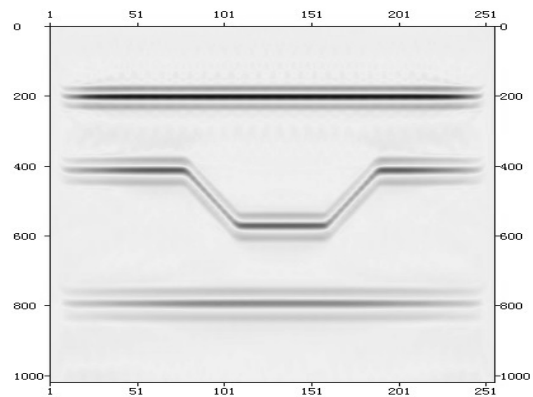


Figure 4. Pre-stack migration stacked profile
图 4. 叠前偏移叠加剖面

本文对偏移算法并行问题给出了两种不同的实现方法，即单层次 MPI 并行和多层次 MPI+OpenMP 混合同步并行。表 1 至 2 给出了炮集叠前深度偏移使用不同数量的处理器的并行效率测试结果。

Table 1. Shot pre-stack migration Parallel efficiency table based on MPI

表 1. 炮集叠前偏移 MPI 并行效率表

节点数 / 个	CPU 时间 / 秒	加速比	效率 / %
1	627.521		
2	314.492	1.995	99.75
4	157.327	3.988	99.7
8	78.877	7.955	99.4
16	41.62	15.077	94.2

Table 2. Shot pre-stack migration Parallel efficiency table based on MPI and OpenMP

表 2. 炮集叠前偏移 MPI+OpenMP 并行效率表

节点数 / 个	CPU 时间 / 秒	加速比	效率 / %
1	623.563		
2	310.977	2.01	100.2
4	155.874	4.00	100
8	78.45	7.95	99.4
16	43.63	14.29	89.3

4.2 模型分析

从表 1 至表 2 可以看出，无论是 MPI 单层次还是 MPI+OpenMP 多层次并行，都能够大大提升计算效率。在 CPU 个数较小的情况下，并行加速比和并行效率都较高，但是随着 CPU 个数的增多，而并行任务未增加的情况下，并行加速度比和并行效率都有所下降，但并行效率仍在 85% 以上，表现出较好的并行性能。

分别对比炮集单/多层次并行表 1 和表 2，MPI+OpenMP 的多层次并行执行时间总体小于 MPI 并行执行时间，但是在 MPI 的同时使用 OpenMP 增加了系统开销，当任务量较小的情况下，反而降低并行性能，增加计算时间，如炮集记录的多层次并行执行时间甚至超过了单纯的 MPI 并行。目前测试所用机器为 Sun Fire V890，该系统支持 MPI 和 OpenMP 并行，硬件配置共 8 个 CPU (即 8 枚处理器)，每枚处理器是双核，在运行过程中，每枚处理器把它的两个核虚拟为两个独立的处理器，这样 V890 中的 8 枚处理器，共计 16 个内核就被虚拟为 16 枚处理器。在 MPI+OpenMP 多层次并行过程中，OpenMP 并行实质仅仅是在每个内核多线程并行，所以多层次并行效率虽然有所提高，但提高并不明显，这是由于硬件限制的原因，相信采用真正的多核硬件，一定会提升整体并行计算的性能。

表 2 中的加速比出现了超线性的情况，是因为当

程序在单处理机上运行时，若数据量较大，Cache 的命中率下降，虚存数据交换较频繁，降低 CPU 性能，并且处理机频繁地进行空间回收和再分配引起的开销很大，而在单处理机系统上运行时，每台处理机花费在存储管理方面的开销相对较小^[9]。此外，炮集多层次并行的多线程运行也再次提升了并行效率，所以引起该现象的出现。

5 结论

为了适应 PC 集群技术和多核技术的发展，有效解决波动方程叠前深度偏移的巨大计算量问题，本文在对偏移算法研究的基础上，利用 MPI+OpenMP 技术，提出了多层次叠前深度偏移的并行算法，这种多层次并行计算模式利用于充分发挥多核处理器的计算性能，比单纯的 MPI 消息传递编程模式更有利于提高算法的并行度，从而为实际资料处理中的叠前深度偏移和偏移速度分析提供一种高效的并行策略。

References (参考文献)

- [1] Bednar.J. Bee.A brief history of seismic migration[J].Geophysics,2005, v 70, n 3: 3MJ-20MJ.
- [2] Zhang Wensheng,Zhang Guanquan.3-D prestack depth migration for SEG/EAEG subsalt with the SSF method[J]. Expanded Abstracts of 71th Annual Internat SEG Mtg,2001:1061-1064.
- [3] LI Lu-ming, LUO Sheng-xian. Variable Range 3-D Pre-stack Depth Migration by Phase Shift Plus Correction[J]. Journal of ChengDu University of Technology(Natural Science Edition), 1999, 26(4): 229-333.
李录明, 罗省贤. 相移加校正变范围三维叠前深度偏移[J].成都理工大学学报(自然科学版), 1999, 26(4): 229-333.
- [4] LI Jian-jiang, SHU Ji-wu, WANG You-xin. A Parallel Algorithm for Pre-stack Depth Migration Based on Shared Memory[J]. Journal of Software, 2002,13(12):2231-2237.
李建江, 舒继武, 王有新等.一种基于共享存储的叠前深度偏移并行算法[J].软件学报,2002,13(12):2231-2237.
- [5] Florent Sourbier, Stéphane Operto, Jean Virieux.FWT2D: A massively parallel program for frequency-domain full- waveform tomography of wide-aperture seismic data—Part2: Numerical examples and scalability analysis[J].Computers & Geosciences, 2009, V35, Issue 3: 496-514.
- [6] Calandra, Bothorel, Vezolle.A massively parallel implementation of the common azimuth pre-stack depth migration[J].IBM Journal of Research and Development,2008, v 52, n1-2:83-92.
- [7] Dai Hengchang. Parallel processing of Prestack Kirchhoff Time Migration on a PC Cluster [J]. Computers and Geosciences, 2005, v 31, n7:891-899.
- [8] Kim, Yang, Shin.3-D seismic imaging using high-performance parallel direct solver for large-scale finite element analysis[J].Proceedings - Eighth International Conference on High-Performance Computing in Asia-Pacific Region, HPC Asia 2005, v 2005:187-194.
- [9] YANG Shang-qin LUO Sheng-xian. Implementation and Analysis of Matrix Multiplication Algorithm with Hierarchical Parallel Programming[J].2008, 2008 Academic Annual National High Performance Computing:290-296.
杨尚琴,罗省贤.基于多层次并行模型的矩阵乘算法的实现与分析[J].2008,2008年全国高性能计算学术年会: 290-296.