

地震资料逆时偏移中的图形处理器加速算法^①

柯璇, 石颖, 刘诗竹

(东北石油大学 地球科学学院, 大庆 163318)

摘要: 叠前逆时偏移(RTM)方法是目前地震勘探领域最为精确的一种地震数据成像方法, 其运用双程声波方程进行波场延拓, 可实现对复杂构造介质的准确成像. 文中采用互相关成像条件对震源波场与检波点波场在同时刻相关成像. 针对 RTM 方法计算量大的问题, 将图形处理器(GPU)引入到 RTM 计算中, 充分挖掘 GPU 的众核结构优势, 利用基于 CUDA 架构的并行加速算法取代传统 CPU 的串行运算, 对逆时偏移算法中较为耗时的波场延拓和相关成像过程进行加速. 复杂模型测试结果表明, 在确保 RTM 成像精度的前提下, 相比于传统 CPU 计算, GPU 并行加速算法可大幅度地提高计算效率, 进而实现基于 GPU 加速的叠前逆时偏移算法对复杂介质的高效、高精度成像.

关键词: GPU; CUDA; 逆时偏移; 加速; 地震资料

GPU Acceleration Algorithm of the Reverse Time Migration with Seismic Data

KE Xuan, SHI Ying, LIU Shi-Zhu

(School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Currently, prestack reverse-time migration is the most accurate imaging method for seismic data in seismic prospecting domain. It extrapolating the wave field with the two-way acoustic wave equation, and it can image complex geological structure accurately. The cross-correlation imaging condition is used for the imaging of source wavefield and receiver wavefield at the same time in the paper. For computationally intensive problems of RTM, we introduce the graphics processing unit (GPU) into RTM algorithm, and exploit the multicore advantages of GPU. In this paper, we use the parallel acceleration algorithm base on the CUDA architecture to replace the serial computation on the traditional CPU and accelerate the process of the wavefield extrapolation and cross-correlation imaging in reverse time migration. The test on complex modeling show that we can achieve imaging result for complex medium with high efficiency and precision by pre-stack reverse time migration algorithm base on GPU acceleration. Under the premise of ensuring the calculation accuracy of the RTM, comparing with the traditional CPU calculation, GPU parallel acceleration algorithm can improve the computational efficiency greatly.

Key words: GPU; CUDA; reverse time migrations; acceleration; seismic data

早期的计算机运算都是在 CPU 端进行的, 随着计算机技术的广泛应用与发展, CPU 的计算性能已无力进行大规模高精度图像处理, 因此诞生了显卡设备, 专门进行图形渲染方面的运算. 显卡的应用方向决定了其彼此独立的并行内核结构, 随着工艺的改善, 显卡的性能也发生了飞跃性的提高, 仅仅进行图形处理运算无疑成为对显卡的计算资源的一种无形的浪费,

早期开发者针对显卡开发出一些并行算法, 但均需要非常专业的计算机知识才能应用, 且加速效能并不明显, 因此没有得到普及. 2007 年, NVIDIA(英伟达)公司针对其产品推出了 CUDA (Compute Unified Device Architecture)架构^[1], 该架构允许编程者利用显卡本身的多核结构和优秀的计算性能进行编程, 通过 GPU 解决复杂的计算问题^[2,3].

^① 基金项目:国家自然科学基金(41004057,41104088);国家 863 高技术研究发展计划(2012AA061202);中国石油科技创新基金(2011D-5006-0304)

通讯作者:石颖, E-mail: shiyingdqi@163.com

收稿时间:2013-04-14;收到修改稿时间:2013-05-14

当前,利用双程波对地震数据进行叠前逆时深度偏移^[4]是一种成像精度较高的地震勘探成像方法,可以对传统单程波偏移所很难成像的陡倾角甚至垂直面进行有效的成像.其精确的处理效果,一直为地震勘探学者们称赞,但叠前逆时偏移对计算量的要求也是非常巨大的,也因此,在早期一直没有得到广泛的应用,随着计算机技术的普及发展与性能的提高,叠前逆时偏移才从理论分析逐渐走向实际应用,但海量的计算需求仍旧使其很难进行大规模的工业化应用.对此,本文就叠前逆时偏移中最为耗时的波场延拓和相关成像部分进行基于 CUDA 平台的算法加速,通过模型试算与传统算法进行效率对比,较大程度的提高了运算效率,使叠前逆时偏移迈向实际应用成为可能.

1 逆时偏移方法原理

叠前逆时深度偏移计算的主要流程为:参数设定,炮记录读入,波场正反向延拓^[5],成像条件的应用,结果输出.成像条件通常分为激发时刻成像条件、相关成像条件和振幅比值成像条件.

本文采用的是相关成像条件,将震源波场(经过激发点和正演模拟波的传播)和检波点波场(经由检波点逆时反推炮记录)进行波场延拓和同时刻互相关成像,由于前者是正传波场,后者是逆时反传波场,若要将两者进行同时刻互相关,需要保存其中一个波场(通常为激发点波场)的每一时刻的信息,因此需要占用大量的存储,在实际数据的应用中,现实的条件很难满足如此海量的存储需求.

对于这类问题,本文采用随机散射边界条件^[6,7],当波场传播至边界处将以随机噪音的形式返回,不会引起波场信息的丢失,且几乎不影响原始波场的成像,而且应用随机散射边界条件,波场的计算是完全可逆的,所以只需保持最大时刻的两个震源波场,无需存储中间时刻的波场信息,然后同时反推震源波场和检波点波场,进行互相关成像.这种方法避免了巨大的存储量需求,但是同时也对计算能力提出了进一步的要求,是一种以计算换存储的策略^[8].

2 图形处理器加速计算

2.1 GPU 工作原理

GPU 英文全称 Graphic Processing Unit,即图形处理器,通常指代个人计算机中的显卡设备,近几年被

陆续应用于科学计算领域,其中基于 CUDA 架构的并行计算方法应用最为广泛.

CUDA 架构是 Nvidia 公司 2007 年推出的“通用并行计算架构”,基于此架构,计算过程中我们将 GPU 的多核处理器划分为相应个数的计算块,通常称为 Block,每个 Block 中又可以划分为若干个线程,称之为 Thread,为了使 GPU 更高效的运算,在进行大规模计算时,每个 Block 中通常分配 256 个 Thread^[9].通过这种分配方式,就可以把传统 CPU 端需要循环串行的数据计算在 GPU 端进行并行化计算,省去了重复繁杂的循环,达到提高计算效率的问题.图 1 为 GPU 线程分配原理示意图.

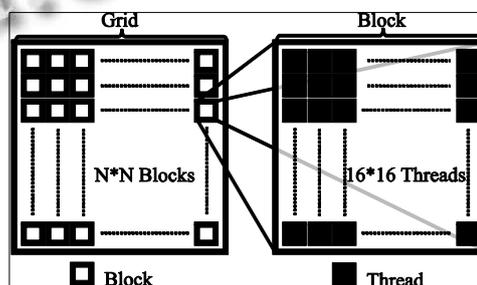


图 1 GPU 线程分配示意图

2.2 叠前逆时偏移的 GPU 加速原理

叠前逆时偏移算法的主要部分:震源波场的正传,检波点波场的反传以及相关成像条件均是 CPU 串行计算最为耗时的部分.为此,我们把波场数据在内部存储器端做好规则化工作,然后将激发点的初始波场值和检波点的最大时间波场值由内部存储器(内存)传至设备存储器(显存)中,这样可以有效降低由多次重复对内部存储器的数据读写所引起的时间延迟.为了充分发挥 GPU 的并行计算优势,我们把 GPU 端的每一个线程设置负责地下介质每一点的波场值的计算,计算过程中,随着延拓时间的变化,每点的波场值同时进行着计算,利用 GPU 的多核结构,取代了传统 CPU 繁杂的循环串行运算,达到加速的效果.随后的互相关成像也是同理.最后把结果数据传回内部存储器,通过 CPU 端进行相关的输出操作^[10].

3 算例分析

本文对 Sigsbee2A 模型进行叠前逆时偏移测试,该模型是基于墨西哥湾深层海底断崖地质形态所设计

的一个速度模型,如图 2 所示.该模型可用来测试叠前逆时偏移算法对地下地质体高低起伏的上边界,底边界的陡倾角处以及地下深层的复杂断层结构和分布其中的绕射点的成像效果.

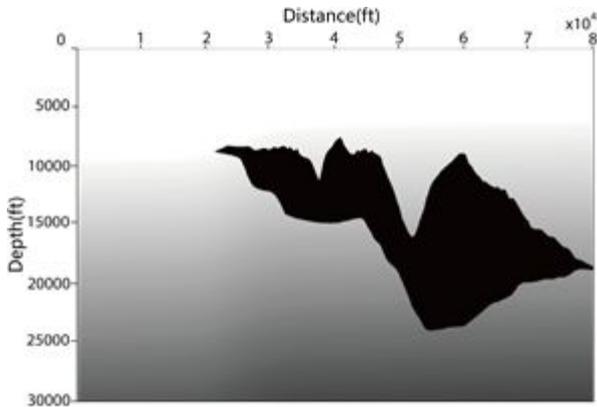


图 2 Sigsbee 速度模型

测试计算机主要配置参数为:

CPU: Intel i3 2120;

内存: 2*4G DDR3 1600;

硬盘: 希捷 1TB 7200r/s;

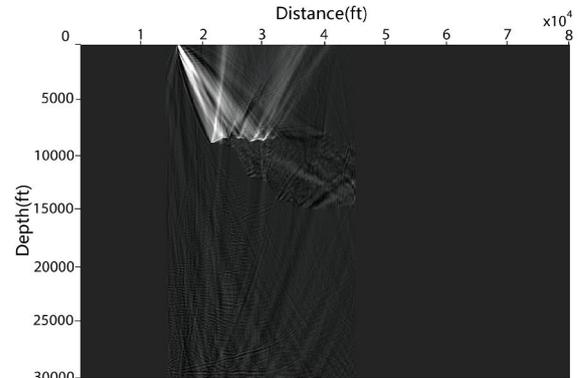
显卡(GPU): Nvidia Geforce GTX560, 1024M 显存, 显存位宽 256bit, 核心频率 850MHz, 显存频率 4500MHz, 流处理器个数 336 个.

Sigsbee2A 模型正演采用 40HZ 的 Ricker 子波, 共 500 炮数据, 采用 348 道右侧单边记录, 炮间隔为 75 英尺, 道间隔为 150 英尺, 最小炮检距为 0 英尺, 最大炮检距为 26025 英尺, 时间采样率为 8ms, 时间记录长度为 12000 毫秒. 模型的横向尺寸为 80000 英尺, 纵向尺寸为 30000 英尺, 网格间距为横向 37.5 英尺, 纵向 25 英尺.

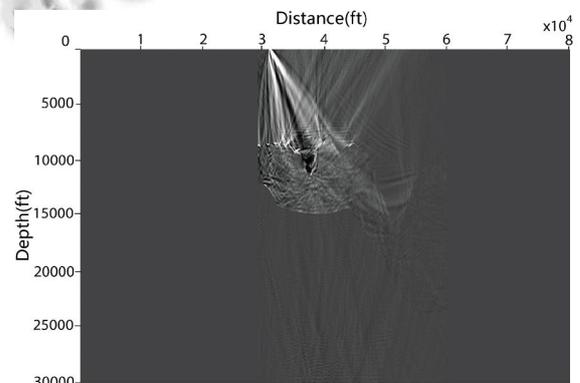
文中利用互相关成像条件对正传的震源波场和反传的检波点波场在同时刻相关成像, 对 GPU 并行加速和 CPU 计算单炮偏移分别进行测试. 单炮偏移 CPU 耗时 548 分钟, GPU 耗时 490 秒; 加速倍比为 67.1 倍. Sigsbee2A 模型含 500 炮地震数据, GPU 耗时约 408 分钟, 约合 2.8 天. 若采用文中计算机配置, 按加速比推算, CPU 计算将耗时约 274000 分钟, 约合 190 天.

随机抽取的四炮叠前逆时偏移的结果如图 3 所示, 500 炮的偏移叠加结果如图 4 所示, 不难发现, 浅层低频噪音极为严重. 因此采用拉普拉斯去噪的方法压制

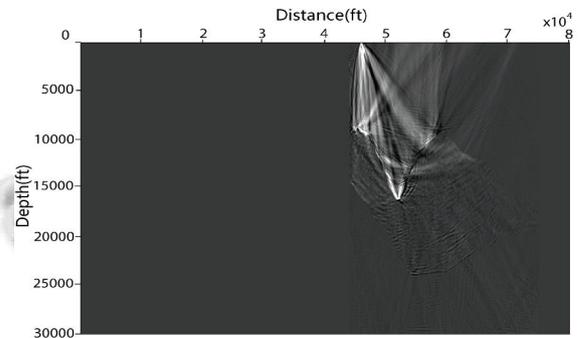
低频噪音, 成像效果较好, 有效的压制了浅层低频噪音, 陡倾角位置能够清晰成像, 如图 5 所示.



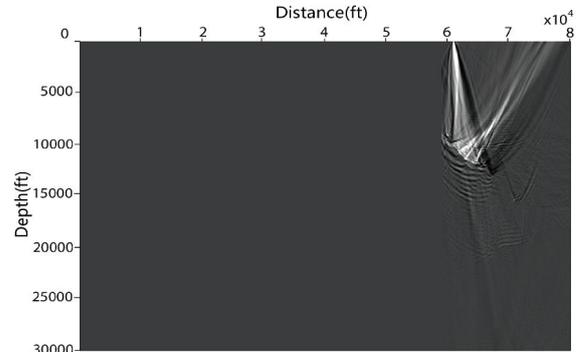
(a) 第 100 炮偏移结果



(b) 第 200 炮偏移结果



(c) 第 300 炮偏移结果



(d) 第 400 炮偏移结果

图 3 随机抽取的四炮逆时偏移结果

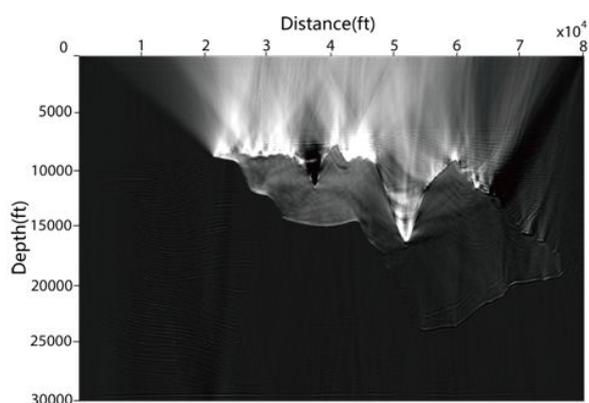


图 4 去噪前的逆时偏移结果

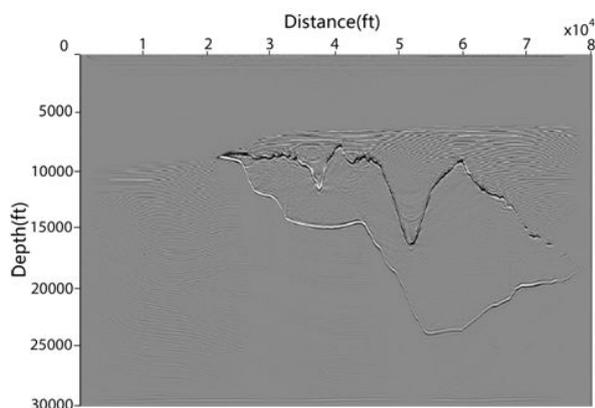


图 5 拉普拉斯滤波法去噪后的逆时偏移结果

4 结语

本文针对偏移精度较高的地震勘探成像 RTM 算法计算量大的瓶颈问题, 提出运用 GPU 优化加速算法, 实现 RTM 方法波场延拓及相关成像的并行加速计算, 测试分析表明, 相对于传统 CPU 端的串行计算方式, 优化的 GPU 并行加速计算可使计算效率提升 67 倍左

右, 极大地缩短了地震数据的处理周期。本文下步的研究方向是优化对设备存储器的访问, 高效地开发利用共享存储器能力, 以进一步降低数据访问所造成的时间延迟。

参考文献

- 1 张舒, 褚艳丽, 赵开勇, 张钰勃. GPU 高性能运算之 CUDA.1. 北京: 中国水利水电出版社. 2009.
- 2 张清, 迟旭光, 谢海波, 赵开勇, 吴庆, 陈维, 王狮虎, 褚晓文. 基于 GPU 实现叠前时间偏移走时计算的并行算法. 计算机系统应用, 2011, 20(8): 42-46.
- 3 林茂, 塔依尔, 邹杰, 景少军, 关宇. GPU 计算在油气勘探中应用前景. 计算机系统应用, 2013, 22(3): 6-10.
- 4 Baysal E, Kosloff DD, Sherwood JWC. Reverse time migration. *Geophysics*, 1983: 382-385.
- 5 陈可洋. 基于高阶有限差分的波动方程叠前逆时偏移方法. 石油物探, 2009, 48(5): 475-478.
- 6 Clapp RG. Reverse time migration with random boundaries. 79th Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts.
- 7 McMechan GA. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31: 413-420.
- 8 刘红伟, 刘洪, 邹振, 崔永福. 地震叠前逆时偏移中的去噪与存储. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2171-2180.
- 9 Jason Sanders, Edward Kandrot. CUDA 范例精解—通用 GPU 编程. 北京: 清华大学出版社. 2010: 0-290.
- 10 李博, 刘红伟, 刘国峰, 佟小龙, 刘洪, 郭建, 裴江云. 地震叠前逆时偏移算法的 CPU/GPU 实施对策. 地球物理学报, 2010, V53(12): 2938-2943.

(上接第 122 页)

- formation. *International Journal of Modern Physics C*, 2002, 13(1): 115-123.
- 3 刘常昱, 胡晓峰, 司光亚等. 基于小世界网络的舆论传播模型研究. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3608-3610.
 - 4 Shen B, Liu Y. An opinion formation model with two stages. *International Journal of Modern Physics C*, 2007, 18(8): 1231-1242.
 - 5 余秀才. 网络舆论传播的行为与动因[博士学位论文]. 武汉:

华中科技大学, 2010.

- 6 徐娟. 论社会性网络对我国大学生网络人际传播的影响[硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- 7 南国农, 李运林. 教育传播学. 北京: 高等教育出版社. 2005.8.
- 8 Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of small world networks. *Nature*, 1998, 393(4): 440-442.
- 9 Barabasi AL, Bonabeau E. Scale-free networks. *Scientific American*, 2003, 288: 60-69.