

基于 CUDA 的地震倾角方位角并行算法

陈鹏程¹, 向伟铭¹, 张全^{1,2*}

(1. 西南石油大学 计算机科学学院, 成都 610500; 2. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 成都 611731)

(* 通信作者电子邮箱 zhangquan@swpu.edu.cn)

摘要:为提高三维地震信号数据倾角、方位角算法的计算速度,针对其计算过程特点,提出了一种基于 CUDA 的并行算法。首先,对倾角方位角算法进行模块化分析并找到算法的计算瓶颈;然后,分别从差分计算、滤波以及后续的倾角方位角计算步骤入手,进行并行策略分析;最后,通过线程以及显存优化来提高算法的计算速度。通过实验验证,在大于 50×50 工区大小的地震数据中可以实现 7.7 以上的加速比,并能保证实际工程需求的计算精度。该并行算法对于三维地震数据的均值与中值滤波以及地震信号差分计算提出了一种可行的并行加速方案,可以广泛应用于地震信号处理领域中。

关键词: 倾角; 方位角; 并行计算; 计算统一设备架构

中图分类号: TP338.6 **文献标志码:** A

Seismic dip and azimuth parallel algorithm based on CUDA

CHEN Pengcheng¹, XIANG Weiming¹, ZHANG Quan^{1,2*}

(1. College of Computer Science, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

2. College of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: To improve the computational speed of 3D seismic signal dip and azimuth algorithm, for the characteristics of its computational process, a parallel algorithm based on CUDA was given. Firstly, dip and azimuth algorithm was modularly analyzed and the computational bottleneck of the algorithm was found. Then, from the difference calculation, filtering and subsequent dip and azimuth calculation steps, parallel strategy analysis was carried out. Finally, thread and graphics memory optimization were used to improve the calculation speed of the algorithm. It is verified by experiments that the acceleration ratio of 7.7 times or more can be achieved for seismic data larger than 50×50 , and the calculation accuracy of actual engineering requirements can be guaranteed. In the parallel algorithm, a feasible parallel acceleration scheme was proposed for the mean and median filtering of 3D seismic data and the differential calculation of seismic signals, which can be widely used in the field of seismic signal processing.

Key words: dip; azimuth; parallel computing; Compute Unified Device Architecture (CUDA)

0 引言

地震倾角、方位角是地震特征属性之一,其主要功能是可以很好地反演出地层下的目标层反射面。文献[1]首次提出地震倾角、方位角的概念,倾角和方位角属性在提取和处理水平相关地震属性方面起着重要作用,在叠后的倾角、方位角属性中能够跟踪细微的结构变化,并可以着重突出比较大的断层,增强地震数据数据的解释性^[2]。

在国外:文献[3]在文献[4]的研究基础上提出 3D 扫描技术;文献[5]在地震数据的机器自动解释上取得了成功,并对地震反射面的各种物理特性进行了有效测量计算;为避免传统倾角和方位估计产生的边界模糊,文献[6]提出了鲁棒性更好的倾角和方位角估计算法;文献[7]提出了一种连续估计三维地震体倾角、方位和断层的自动方法。

近些年在国内:文献[8]在总结了倾角方位角属性的同时,给出了地震资料解释中的自适应倾角导向技术进行断层识别的技术思路;文献[9]将倾角、方位角引入到三维相干数据体中,极大地提高解释的精度。国内的研究目光更多的投向倾角、方位角数据的应用层面上。

随着现代探测设备的发展,探测精度大幅提高,使得科研人员能够采集更多的数据以供分析。处理这些具有较大数量的数据不仅需要性能更好的计算设备,而且还会消耗大量的计算时间。所以为提高计算速度,必须寻求更新的高性能计算技术。近十年来,计算统一设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)技术作为一个高性能计算领域的重要方向得到迅猛的发展,并且地震数据处理领域中有着很广泛的应用^[10-12]。本文正是基于 CUDA 技术对倾角方位角算法进行并行化分析,并找到算法的计算瓶颈,然后对其进行优化,从而提高计算效率。

1 地震倾角方位角计算原理

在三维地震数据的解释过程中,倾角、方位角属性在地质领域的作用很大,因为倾角、方位角属性能很好地反演出地层下的目的层反射面,地质专家可以根据该反射面来确定在地层中该层位的连续性。发展至今,已经提出了很多计算倾角、方位角的方法,如复数道分析法、梯度结构张量法以及离散扫描法等,本文所采用的是复数道分析法^[5]。

收稿日期:2018-12-12;修回日期:2019-03-25。

作者简介:陈鹏程(1992—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,CCF 会员,主要研究方向:信号处理、并行计算;向伟铭(1998—),男,四川巴中人,主要研究方向:地震信号处理;张全(1985—),男,甘肃武威人,讲师,博士,CCF 会员,主要研究方向:地震信号处理、图像处理、并行计算。

1.1 倾角和方位角的物理几何意义

倾角和方位角是地震特征属性中一种具有实际物理几何意义的属性。在立体几何中,倾角表示的是需测量面与水平面所成的角,方位角表示的是与需测量面相垂直的面依顺时针方向到目标方向面之间的水平夹角。在地震数据处理中,如图 1 中所示,灰色所覆盖的区域是一个理想状态下的地震反射面。一般来说,地震反射面可以通过视倾角 θ_x 与 θ_y 表示。其中 θ_x 表示的是在 xoz 平面上反射面与坐标轴水平方向的夹角,同理 θ_y 表示的是在 $yozy$ 平面上反射面与坐标轴水平方向的夹角。 θ 表示的是该地层反射面的倾角,即反射平面与水平平面的二面角。 ψ 表示的是地层反射面的方位角,方位角是度量水平轴与北方(在该理想模型中为 $yozy$ 平面)的夹角。通过一些数学上的几何计算,可以直接利用视倾角来计算出倾角和方位角。

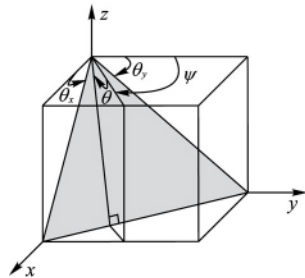


图 1 倾角方位角几何模型

1.2 倾角和方位角的计算方法

本文的三维地震数据中, X 轴与 Y 轴表示的是两个相互垂直的方向信息,而 Z 轴所表示的是瞬时相位数据在时间轴上的采样点数量。整个算法分为下面四个步骤: 瞬时频率计算、中值滤波、均值滤波和倾角与方位角计算。

1) 通过瞬时相位矩阵计算瞬时频率 p 与 q , 分别对应 X 与 Y 方向的瞬时频率。本文采用九点差分法来计算 Δx 和 Δy 和 Δz , 如图 2 所示, 该图描述的是九点差分法的矩形网络节点配置, 其原理是对所求点 (i, j) 与其周边邻域 8 个点同时进行差分计算, 这 9 个点同时在差分计算后再进行加权求和, 即可得出该点处的差分值。

$$p = \Delta x / \Delta z \quad (1)$$

$$q = \Delta y / \Delta z \quad (2)$$

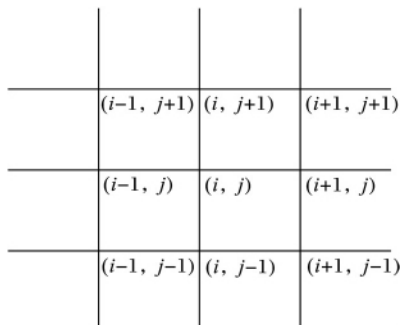


图 2 差分计算的矩形网络节点

2) 在地震数据采集过程中, 由于设备精度或是系统误差等原因, 会使得采集到的地震数据存在很多随机噪声, 在计算视倾角之前需要进行中值滤波和均值滤波处理^[8], 其主要功能是去除一些异常值以及提升数据信噪比^[13]。

3) 根据瞬时频率数据, 计算出视倾角 $\tan \theta_x$ 和 $\tan \theta_y$, 其中 v 为瞬时速度。之后再根据几何关系, 计算出倾角 dip 和方

位角 $amuzith$ 。

$$\tan \theta_x = p \cdot v / 2 \quad (3)$$

$$\tan \theta_y = q \cdot v / 2 \quad (4)$$

$$dip = \arctan(\sqrt{(\tan \theta_x)^2 + (\tan \theta_y)^2}) \quad (5)$$

$$amuzith = \arctan(\tan \theta_x / \tan \theta_y) \quad (6)$$

2 GPU 和 CUDA

NVIDIA 公司现在将更多的目光投向了深度学习以及人工智能等当下比较热门的科研方向上, 在新一代的 GPU 中, 提供了 TENSOR 内核专门供深度学习等功能所使用。于 2017 年所公布的 Volta 架构是现在功能最强大的 GPU 架构, 该芯片采用 12 nm FFN 工艺制造, 集成度更高, 计算能力更强。并且新一代的 NVIDIA NVLink 技术使得 GPU 吞吐量比上一代提升了两倍。

CUDA 是 NVIDIA 于 2006 年 11 月所推出的一种通用并行计算平台和编程模型, 它利用 NVIDIA GPU 中的并行计算引擎, 可以比 CPU 更有效地处理一些复杂的计算问题^[14]。CUDA 平台是第一种不需要借助图形学 API 就可以进行通用计算的软件体系, 可以说在该引擎一经面世就被各类科研计算所应用。

3 倾角和方位角计算并行算法的设计

通过分析计算方法, 可以看出倾角、方位角的计算大致分为三类过程: 第一类是对数据进行滤波的过程; 第二类是计算瞬时频率的过程; 第三类是三维地震数据的倾角计算过程, 其中包含视倾角以及倾角、方位角数据。而本文所讨论的内容是将这三类计算过程并行化, 来达到提升计算效率的目的。

3.1 算法性能瓶颈分析

取工区数据大小为 80×80 , 采样点数量为 1000, 经 30 组实验测试取均值, 可以得出该算法计算过程的时间在计算总时间中占比如表 1 所示。

表 1 该算法中计算过程时间占比

计算步骤	时间占比/%	计算步骤	时间占比/%
计算瞬时频率	24	均值滤波	28
中值滤波	32	计算倾角、方位角	16

通过表 1 数据可以看出, 在计算过程中, 中值滤波与均值滤波在计算过程中时间占比分别为 32% 和 28%, 并且也是计算量最大步骤。中值滤波需要在计算点周围取一个三维窗口, 并在该窗口中的值进行排序, 取其中值; 均值滤波需要将一个三维数据块上求和并求出均值。那么, 在三维数据中的每一个点依次进行中值滤波和均值滤波处理会产生很大的计算量, 所以减少滤波处理的计算时间开销是该算法需要解决的问题之一。

此外, 计算三维地震数据瞬时频率的计算占总耗时 24%, 该计算耗时的主要原因在于需要在计算过 X 、 Y 、 Z 三个方向的 Δx 、 Δy 和 Δz 之后, 再进行瞬时频率的计算。并且, 在求 Δx 、 Δy 和 Δz 的过程中每一个点需要计算三次差分计算, 这样的多次计算会增加很多的时间开销。所以减少瞬时频率的计算时间是需要解决的第二个问题。

3.2 中值滤波优化策略

在三维地震数据的均值滤波过程中, 滤波的范围是在 X 、 Y 、 Z 三个方向分别取一个滤波长度组成的一个三维窗口。对

该窗口中所有值排序,然后取中值作为滤波处理后的结果。

本文的优化策略是让单个线程做一个点的中值滤波工作,这样让所有的线程同时计算,即可完成整个工区的滤波处理。

数组的排序工作大致分为两种:1) 比较数组中值的大小;2) 找到数组中值的位置。这两种工作都会有很多的分支预测的工作。但是,GPU 对分支预测的运算能力并不好,而且不同数组排序的工作量也会不同,使得无法保证 GPU 中每一个线程的工作一致,这样也会降低 GPU 的运算效率。

3.3 均值滤波优化策略

用与中值滤波同样的方法取一个三维窗口,在该窗口中累计求和,然后求出均值,该均值即为该滤波窗口中心点的滤波结果。通过分析可以得出在进行均值滤波的计算时,需要对三维数据每一个点都进行加和,在三维滤波窗口中的加和会产生较大的计算量,所以,需要对加和的计算步骤作相应的优化。

首先,将均值滤波的步骤进行分解,使计算变得可并行化,算法分解步骤如图 3 所示。均值滤波的计算是取任意一个地震体元 (x, y, z) ,再取其为中心的三维邻域作为滤波窗口,其中,针对每一个体元均值滤波的计算过程分为三步来进行计算。

Step1 对每个地震体元滤波窗口在 XOY 平面的数据进行累加求和,将其保存到一个新的一维数组里,该数组的长度与所处理地震数据体 Z 轴采样点长度一致。

Step2 在新的一维数组中再次求和,此次求和的范围是在取 Z 轴方向的滤波窗口,然后依次每一个点执行此步骤。

Step3 将 Step2 中所计算出的和除以三维窗口的大小求得均值。

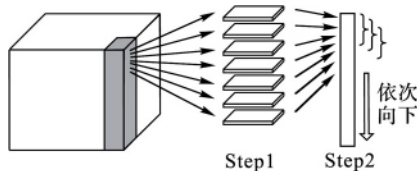


图 3 三维地震数据均值滤波的计算过程

通过算法的步骤分解,可以看出 Step1 中的计算求和步骤中每一层在计算时并没有依赖关系,可以直接让 GPU 中的每一个线程来计算每一个面窗口的求和。

在进行完 Step1 之后,得到一个一维数组,在这个一维数组中的每一个点都要在滤波窗口中进行求和,此时,让 GPU 中的每一个线程来计算每一个点的滤波窗口内进行加和,这样在 Step3 中直接对其进行均值计算即可。此种方法的时间复杂度主要依赖于数据中窗口的大小,如果假设在 Z 轴上的滤波窗口大小为 n ,那么每一个线程在都需要计算 n 次加法,那么其计算的时间复杂度为 $O(n)$ 。该计算过程的优势在于,计算思路清晰,每一个线程完成的任务一致,能保证对齐与合并内存访问,缺点在于各个计算窗口有很多的重叠数据,会有很多的冗余计算。

3.4 计算瞬时频率的并行优化策略

本文中的倾角、方位角的计算是依据地震特征属性中的瞬时相位来计算的。随着三维地震勘探技术发展以及勘探仪器精密程度的提升,一般来说需要计算的瞬时频率具有较大的数据量。因此,不仅要瞬时频率的计算要进行优化,而且要对显存的内存事务进行优化。

显存优化为使计算过程能够获得最优性能优化,优化内

存事务是关键的一步。在获取三维地震数据时,本文是将 X 、 Y 轴的坐标保持不变,将此处坐标 Z 轴方向的数据加载进全局内存中,从 X 、 Y 轴起始坐标处依次加载直到最后一个坐标。在进行计算时是以 Z 轴数据为第一维度进行存储来进行计算,这样可以保证对齐与合并内存访问,以达到读写数据时的最佳性能^[15]。

线程优化需要计算的是三维瞬时相位数据,此时直接让每一个线程都进行 X 、 Y 、 Z 三个方向的差分计算,相当于每一个线程都完成了三次差分计算的任务。

在得到 Δx 、 Δy 、 Δz 计算结果之后,计算瞬时频率,见式(1)与式(2)。此时仍然采取将 Z 轴中的采样点个数与 CUDA 线程一一对应的方法来计算,最终可以得到 X 与 Y 方向的瞬时频率数据。

3.5 倾角类计算并行优化策略

计算倾角类过程的主要特点是每个点的计算过程都是相互独立的,也就是说在不同计算过程每个采样点相互之间没有依赖关系。那么,可以将 CUDA 线程与每个点的计算一一对应。但事实上,三维地震数据具有较大的数据量,所以,设置的线程数与数据 Z 轴方向的长度保持一致,同时也保证全局内存的合并内存访问。

4 实验与结果分析

4.1 实验环境

本文实验所采用的硬件配置: Intel Core i7-7700HQ 主频 2.81 GHz CPU,内存 16 GB, NVIDIA GeForce GTX 1060 with Max-Q Design GPU。软件配置: Windows 10 64-bit 操作系统, VS2015 + CUDA8.0 编程环境。

4.2 倾角、方位角计算结果

图 4 的描述内容即为倾角、方位角在 CPU 平台以及 GPU 平台上的计算的剖面效果图对比,其中(a)、(c)为 CPU 平台计算效果图,(b)、(d)为 GPU 效果图。在实际工程需求精度的情况下,没有精度的丢失。图中计算的工区大小为 200×200 ,采样点为 1000 个。

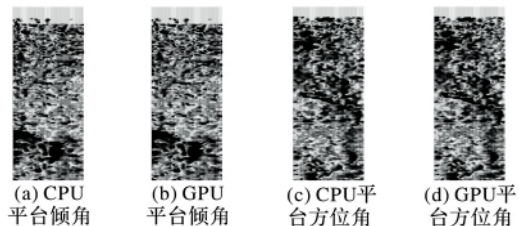


图 4 不同平台上计算的倾角和方位角剖面效果图对比

为了验证并行算法对计算性能的提升,选择了采样点均为 1000 的不同工区作为测试数据,分别测试了倾角、方位角算法在 CPU 平台与 GPU 平台上的计算时间,结果如表 2 所示,总体计算效率随着数据规模的提升而提升。该算法能够保证工程需求中的计算精度,而本文实验为验证并行算法的精度以及更大数据集的加速效果,采用双精度随机数的方法来模拟数据验证计算效果。

中值与均值滤波的处理过程只涉及到求和、排序及赋值的过程,对计算精度不会造成很大的影响;差分计算的过程中由于所涉及到的计算点众多,会导致一定的误差;在计算倾角、方位角的过程中,式(5)、(6)中应用到了较为复杂的数学计算,导致了计算结果的不准确。在经过 CPU 与 GPU 进行做差的运算,本文中的并行算法的误差绝对值能达到 10^{-9} 。

根据实验结果可以看出,随着工区数据的增加,瞬时频率

以及倾角、方位角的加速效果在逐步增加,这两个计算步骤中都需要较为复杂的数学计算,所以加速效果符合预期。中值滤波的计算步骤中有排序过程,排序的计算会对 GPU 的计算效率有一定的影响,所以中值滤波有计算效率的提升,但还是

有很大的时间开销。在本文中测试数据规模情况下,所提出的均值滤波加速策略能够提供很好的加速效果。因为减少了大量的冗余计算,随着数据量的增加,均值滤波能够提供更好的效果。

表 2 不同工区大小各个计算步骤加速对比

计算步骤	CPU/ms			GPU/ms			加速比		
	50 × 50	200 × 200	500 × 500	50 × 50	200 × 200	500 × 500	50 × 50	200 × 200	500 × 500
计算瞬时频率	1 857	15 367	55 679	46	243	398	40.4	63.2	139.8
中值滤波	2 185	30 732	105 931	705	5 209	9 132	3.1	5.9	11.6
均值滤波	2 069	24 666	82 554	16	39	64	130.0	632.5	1 289.9
计算倾角、方位角	1 008	16 035	58 457	151	901	974	6.7	17.8	60.0
总体加速	7 119	86 800	302 621	918	6 392	10 568	7.7	13.6	28.6

5 结语

通过实验可以看出,CUDA 在地震倾角、方位角的计算中的应用带来了计算速度较为明显的提升。本文通过瓶颈分析,针对具有较大时间开销的滤波处理和瞬时频率计算都给出了相应的并行加速方案。相比其他计算步骤,中值滤波的加速效果并不是十分理想,接下来的研究工作,主要是提升中值滤波的运算效率;并且本文仅仅是在单 GPU 平台中进行了算法的并行优化,在多 GPU 集群平台上进行优化是下一步的研究目标。

参考文献:

[1] DALLEY R M, GEVERS E, STAMPFLI G M, et al. Dip and azimuth displays for 3D seismic interpretation[J]. First Break, 1989, 7(3): 86 – 95.

[2] MONDT J C. Use of dip and azimuth horizon attributes in 3D seismic interpretation[J]. SPE Formation Evaluation, 1993, 8(4): 253 – 257.

[3] MARFURT K J, KIRLIN R L, FARMER S L, et al. 3D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm[J]. Geophysics, 1998, 63(4): 1150 – 1165.

[4] FINN C J, BACKUS M M. Estimation of three-dimensional dip and curvature from reflection seismic data[C]//SEG 1986: Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, 1986. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1986: 355 – 358.

[5] BARNES A E. Theory of 2-D complex seismic trace analysis [J]. Geophysics, 1996, 61(1): 264 – 272.

[6] MARFURT K J. Robust estimates of 3-D reflector dip and azimuth [J]. Geophysics, 2006, 71(4): 29 – 40.

[7] ALAM, TAYLOR J D. Dip, azimuth and fault from continuous phase spectrum[C]// SEG 2006: Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, 2006. New Orleans: Society of Exploration Geophysicists, 2006: 998 – 1002.

[8] 段友祥, 曹婧, 孙歧峰. 自适应倾角导向技术在断层识别中的应用[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 101 – 107.

[9] 杨瑞召, 孙志朋, 高朵, 等. 倾角控制下的三维相干体异常识别技术研究[J]. 能源技术与管理, 2015, 40(6): 162 – 164.

[10] 邓博文, 刘春松, 吴凡贤, 等. 基于 GPU 的地震剖面图形快速绘制算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(4): 294 – 298.

[11] XU J, LIU W, WANG J, et al. An efficient implementation of 3D high-resolution imaging for large-scale seismic data with GPU/CPU heterogeneous parallel computing [J]. Computers & Geosciences, 2018, 111(2): 272 – 282.

[12] 许明炬, 高金耀, 胡昊, 等. 基于 CUDA 技术与 GCV 准则的小波变换压制地震面波的研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 760 – 768.

[13] PROAKIS J G, MANOLAKIS D K. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 2001: 120 – 125.

[14] COOK S. CUDA Pogramming: ADveloper–Guide to Parallel Computing with GPUs[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2012: 12.

[15] CHENG J, GROSSMAN M, MCKERCHER T. Professional CUDA c Programming[M]. Birmingham, UK: Wrox Press, 2014: 135 – 136.