

GPU/IB 提升油气勘探地震成像算法效率

背景

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司（简称“东方地球物理公司”，BGP）是在原中国石油天然气集团公司石油地球物理勘探局进行公司制改造的基础上，吸纳新疆石油管理局、大庆石油勘探局、大港油田集团有限责任公司、青海石油管理局、华北石油管理局、吐哈石油勘探开发指挥部六家企业的物探资源于2002年12月6日重组成立的，是中国石油旗下、中国最大的专门从事地球物理勘探的专业技术服务公司。公司主要从事国内外陆地、海上地震勘探及综合物化探采集、处理、解释，以及与地球物理（化学）勘探有关的技术及装备研发、产品研制、技术引进与产品销售等业务。截至2015年，公司综合实力位居全球同行业第二，陆上采集业务稳居全球第一。

地震勘探是寻找潜在油藏区的有效方法，可分为三个步骤，分别为采集，处理以及解释。采集的目的是从野外工区通过人工地震的方法获得地震资料数据。处理则通过一系列数字信号处理算法和地震成像算法对地震资料进行处理以最终获得勘探工区地下地质结构成像。解释则是根据地质成像结果判断该勘探区域是否存在油藏区。东方地球物理公司拥有亚洲最大的地震资料处理中心，公司内部拥有的计算机集群的总浮点数运算速度也位居亚洲同行之首。

地震资料处理是地震勘探的核心环节，获取高质量的地质成像结果是地震资料处理阶段的核心目标，这是由于精确的成像结果能为油藏区判定决策提供可靠的技术支撑。Kirchhoff叠前时间偏移成像（KPSTM）算法是目前最常用的地震资料成像算法，也是当前地震资料处理流程中最重要的步骤之一。基于采集的地震数据，通过该算法可获取到勘探工区地下地质结构成像。20世纪70年代Kirchhoff叠前时间偏移的理论已经成熟，但由于该方法的计算量巨大，在早期的几十年时间内一直没有得到实际应用。到了20世纪90年代后期，随着并行计算机技术的发展，使得该方法的应用得到了迅速的普及。目前，Kirchhoff叠前时间偏移应用通常都部署在高性能并行计算机集群上。

挑战

近年来，随着勘探地质目标的逐步复杂化（例如深海勘探）以及高密度全方位采集技术的逐步普及，从野外采集的原始地震数据规模产生了爆炸性的增长，地震勘探正在迈入PB级的“大数据时代”。高速增长的地震数据规模导致地震数据的处理周期越来越长，其中叠前时间偏移是常规处理中最为费时的环节，占据处理周期40%左右的时间。而过长的处理周期难以满足地震资料处理的时限要求，因此提升叠前时间偏移的计算效率迫在眉睫。

叠前时间偏移是典型的计算密集型并行应用，且在其计算过程中，各节点间需频繁通信。传统的依赖于CPU集群+千兆以太网的方式难以使计算效率提升到实际生产中可以接受的程度。采用GPU/IB加速后，单个节点计算效率迅速提升，同时各节点间的通信时间也显著下降，有效的满足了实际生产中对效率的渴求。

方案

图1是采用了GPU/IB架构的异构高性能集群的体系结构。集群中每个计算节点配置了两个CPU，两块GPU加速卡，节点间使用Infiniband高速网络互连。我们对Kirchhoff叠前时间偏移的并行成像算法进行了优化，使之能够充分的利用起每个节点的GPU资源以及Infiniband的高速网络。KPSTM并行算法设计关键是处理好三个并行层次：1）节点间的进程级并行；2）CPU内的线程级并行；3）GPU内的数据级并行。并行计算任务的划分要保证并行层次间的数据局部性以及层次内的可扩展性。同时，不同处理器间的协同计算要尽量保持异步性并充分考虑负载均衡。

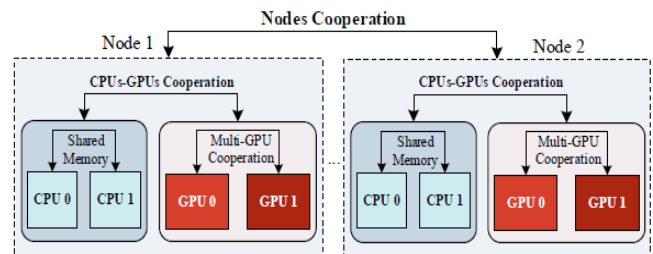


图1 CPU-GPU 异构高性能集群体系结构

KPSTM的目标是在大规模异构集群上实现高性能，高扩展。因此，算法的关键是做到负载均衡和通信局部性。在并行算法实现上，KPSTM采用了两级Master/Worker架构以调度任务，即将参与计算的节点分为若干组，如图2所示。整个作业只有一个主节点，主节点负责向各个组的主节点分配炮检距成像任务，组长协调组员共同完成该成像任务。

在组内采用动态的数据分发方法，即根据节点的计算能力，按需分配输入数据，消除节点间同步操作，最大限度发挥节点的计算性能，实现节点间的负载均衡。

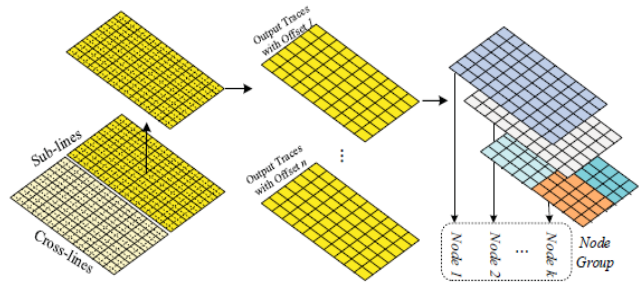


图2 节点间并行任务调度

在节点层次上，需要充分处理好CPU和GPU之间的协同计算。如图3所示，CPU与协处理器之间的任务调度与计算节点间类似，CPU与协处理器做同样的炮检距成像任务，地震数据在两类处理器之间动态分发，最后将结果叠加输出。

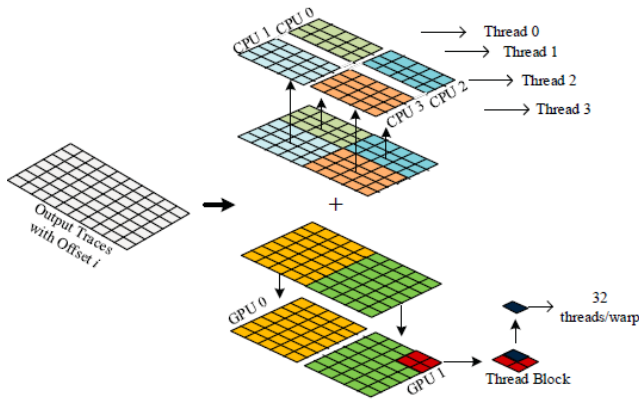


图3 CPU-GPU 协同计算

具体实现上，多个GPU协处理器间均分成像面元。在每个GPU处理器内部，对任务粒度进行进一步细分：每一个Thread Block分配一部分成像面元，每个面元内的输出地震道由一个warp的32个线程配合完成，每个线程计算一部分输出样点。GPU内部采用这种任务划分方法，一方面可以产生足够多的任务，另一方面可有利于全局内存（global memory）合并访问。通过将输出地震道载入纹理内存（texture memory）可进一步加速数据访问性能，这是最为关键的优化策略之一。在实现KPSTM在GPU协处理器的并行算法的过程中，其他的有效优化方法还包括：减少每个线程使用的寄存器数量以提高occupancy，用CUDA流隐藏内存到显存的数据传输延迟等。

影响

基于GPU/IB架构的异构集群，通过对KPSTM的算法进行多层次的系列优化后，Kirchhoff叠前时间偏移成像算法的性能得到了大幅的提升。

表1为给出了KPSTM的CPU-GPU协同计算加速效果。在该表中，以CPU的单个核的计算性能作为基准。从该表中可看成，当采用1个GPU协处理器时，加速比达到了36倍多，效率相当于提升了35倍多。而采用两块GPU加速卡时，加速比达到了71倍，计算效率相当于提升了70倍。

Architectures	Execution Time/ms	Speedup
1CPU-Core	1390123	1.00
2CPUs	93759	14.83
1GPU	37933	36.65
2GPUs	19567	71.04
2CPUs+2GPUs	17920	77.57

表1 CPU-GPU 协同计算加速效果

图4为基于GPU/IB的KPSTM在天河-1超级计算机上的性能表现。在图4中，加速比是以128个计算节点的执行时间为基准。节点数达到768之前为近线性增长，之后加速趋势变缓，影响其可扩展性的主要因素是集中存储I/O的吞吐限制。

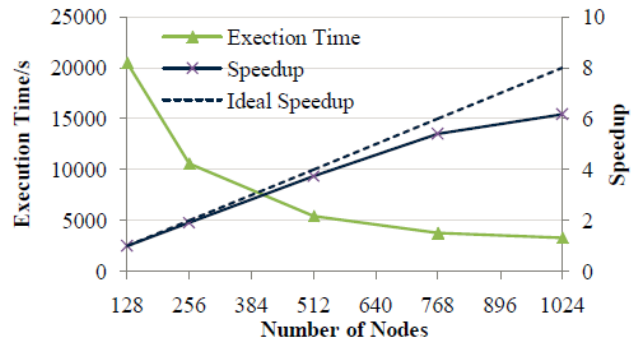


图4 KPSTM CPU-GPU 协同计算版本在天河-1 上的性能

基于GPU/IB实现的CPU-GPU协同计算版本的Kirchhoff叠前时间偏移算法已部署到实际生产环境中。由于其具备良好的可扩展性和强大的计算效率，目前已在中石油的分布在全球各地的油田和地震资料处理基地得到了广泛的使用并获得了用户的一致好评。