

三维 FDTD 众核算法的设计与实现

余峙堃 刘鑫 张彦彬 吴宏
(江南计算技术研究所 无锡 214083)

摘要 在电磁学中,时域有限差分算法(FDTD)能够精确地模拟空间中电磁场的变化,在电介质器件设计领域得到了广泛的应用。众核(many-core)处理器片上计算资源丰富,对于计算密集型课题有较好的适应性。通过对麦克斯韦方程 FDTD 仿真算法的分析,并根据众核处理器的特性,实现了 FDTD 算法的众核并行。实验结果表明,FDTD 算法在众核处理器平台上具有较好的计算效率,能够很好地发挥众核结构的优势。

关键词 时域有限差分算法,众核,并行,优化
中图法分类号 TP301 **文献标识码** A

Designing and Implementation of 3D FDTD Parallel Algorithm on Many-core Architecture

YU Zhi-qing LIU Xin ZHANG Yan-bin WU Hong
(Jiangnan Institute of Computer Technology, Wuxi 214083, China)

Abstract In the electromagnetism, FDTD which has been widely used in the field of dielectric device's designing can simulate the changes of electromagnetic field in space accurately. With abundant computing resources, many-core processor can get good adaptability for compute-intensive task. Based on the analysis of Maxwell's equations and the FDTD simulation algorithm, we achieved the parallel algorithm about FDTD. According to the experiment's results, FDTD algorithm has high computational efficiency on the platform of many-core processor, and can make full use of the structure characteristic of many-core processor.

Keywords Finite difference time domain(FDTD), Many-core, Parallel, Optimization

1 概述

时域有限差分算法(FDTD)是以时间域和空间域来解决麦克斯韦方程的电磁分布的数值方法,具有数学的简单性和应用的方便性等特点。它能够求解任何介质材料组成的任意几何图形的模型,因此在电介质器件设计领域得到了广泛的应用^[1]。利用 FDTD 仿真算法求解大规模空间仿真问题时,通常需要合适的高性能计算平台。但是在高性能计算飞速发展的今天,基于多核架构的传统高性能计算机系统逐渐面临成本高、功耗大等问题的困扰,因此在低成本、低功耗的通用众核(many-core)处理器或专用图形处理器(GPU)等计算平台上实现所需的高性能计算成为当今高性能计算的一个重要发展方向^[2]。本文实现了 FDTD 算法在某众核架构处理器上的并行优化,并取得了理想的加速效果。

2 FDTD 算法分析及实现

2.1 FDTD 算法原理

FDTD 算法以麦克斯韦(Maxwell)方程组为基础,能很好地适应二维或三维空间模型^[3-4]。麦克斯韦方程组微分形式如下:

$$\Delta * \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\Delta * \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2)$$

式(1)和式(2)的微分方程中的矢量 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 可分解成空间 x, y, z 三个方向上的分量,任意一个方向的分量均可表示成空间和时间的一阶微分。利用中心差分法可得到如下公式(y 方向和 z 方向的分量公式类似):

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} - \sigma H_x \right) \quad (4)$$

通过进一步分析,在每一步迭代计算中,可以得到如下有关场的迭代公式:

$$\begin{aligned} E_x^{n+1/2}(k) = & E_x^n(k) - \Delta t / (\epsilon \Delta z) [H_y^{n+1/2}(k+1/2) - H_y^{n+1/2}(k-1/2)] + \Delta t / (\epsilon \Delta y) [H_z^{n+1/2}(k+1/2) - H_z^{n+1/2}(k-1/2)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}(k+1/2) = & H_x^{n-1/2}(k+1/2) + \Delta t / (\epsilon \Delta z) [E_y^n(k+1) - E_y^n(k)] + \Delta t / (\epsilon \Delta y) [E_z^n(k+1) - E_z^n(k)] \end{aligned} \quad (6)$$

由上式可以看出,电场值 E_x (磁场值 H_x)的迭代只与它

到稿日期:2011-07-20 返修日期:2011-10-12

余峙堃(1986—),男,主要研究方向为高性能并行计算, E-mail: yujiewell@126.com; 刘鑫(1979—),女,博士,高级工程师,主要研究方向为并行计算应用研发、数值算法及优化。

本身一个时刻的场值及相邻坐标点的磁场值 H_y 及 H_z (电场值 E_y 及 E_z) 有关,而与其它区域的场量没有直接关系。

2.2 FDTD 算法在众核处理器上的实现

本文采用的处理器是一种异构众核处理器,即在处理器芯片包含一个主处理器(主核)和多个协处理器(从核)^[5]。在该处理器中,每个从核上有专属的局部存储空间,即局部数据存储空间(LDM)和局部指令存储空间(LIM)。它们在计算时可以用来存储计算数据和计算指令。在众核处理器上,由于芯片面积有限,从核数众多,因此芯片上的存储资源非常有限,所以计算过程中需要通过直接存储访问部件(DMA)不断地在主核的主存空间与从核 LDM 间实现数据交换。当从核需要读入或回写数据时,先由从核发起读入回写数据请求,然后由 DMA 部件进行读入和回写操作。

在算法流程上,当初始化完成后,开始迭代计算电场 E 向量值和磁场 H 向量值。简单流程图如图 1 所示。

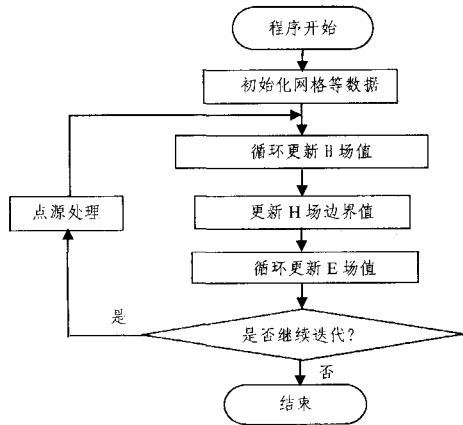


图 1 基本算法流程图

迭代计算过程主要由更新磁场 H 向量值、处理磁场 H 边界值、循环更新电场 E 向量值以及点源处理 4 个部分组成。其中,程序中循环更新磁场 H 的向量和循环更新电场 E 向量的计算量占整个课题计算量的绝大部分。因此本文中的众核并行化主要针对这两个部分来进行。

由于场值的迭代与非相邻区域的场量没有直接关系,同一时刻的任意坐标点电场值 E_x (磁场值 H_x) 的变化与其他坐标点的电场值 E_x (磁场值 H_x) 也没有直接关联,因此可以利用多个从核同时进行多个坐标点的场值计算。

计算时需先将计算所需数据从主核内存中通过 DMA 读入到从核 LDM 中,但是从核局部存储容量有限,因此众核平台上的计算过程分割成为若干个如下过程:首先将无关联性的数据分成若干个独立而连续的数据块,这些数据块分批次读入进 DMA,在从核计算完成后分批次回写数据,通过多次读入计算来完成对整个空间区域的计算。

3 FDTD 众核算法的优化

3.1 从核计算与数据通信互相隐藏

在众核处理器平台上实现 FDTD 并行计算时,从核开销可分为两部分,即通信开销和计算开销。为了获得更加理想的并行效率,我们设法将这两部分开销进行处理,使这两部分

相互隐藏,从而减少从核的总开销。从核的 LDM 分为两部分:一部分 LDM 空间用于存贮当前计算所需数据,同时另一部分 LDM 空间用来存储上一次的回写数据以及下一次计算所需要的数据。在从核计算过程中,这两部分 LDM 互为缓冲区。

在读入数据过程中,除了第一次需要等待 DMA 读入完成后再进行计算之外,其余过程如下:当本次计算所需数据读入完成后开始进行计算,与此同时向 DMA 部件发起读入下一次计算所需数据请求。这样就可以实现本次计算过程开销和从下次数据读入开销之间的相互隐藏。DMA 数据回写的过程是数据读入过程的逆过程,因此也可以利用相似的方法进行数据回写与数据计算间的隐藏。计算与通信隐藏流程如图 2 所示。

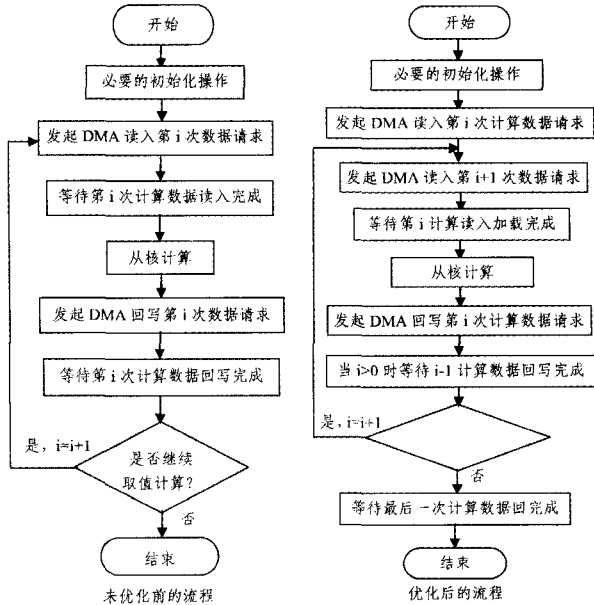


图 2 计算与通信隐藏流程

3.2 访存性能优化

从核每次访问主存的开销主要由启动开销和传输开销两部分组成,其中启动开销大小与单次数据传输数据量的大小无直接关系。通信开销的优化途径主要有两种:一是增大数据通信长度,提高带宽效率;二是减少数据通信次数。如果能够将原本需要多次读入回写的数据进行集中读入回写那么,不仅可以减少数据启动开销,同时也提高了数据传输效率。

为提高访存性能,本程序主要做了如下优化。

(1)数组合并。在传统 FDTD 课题中,一般是将电场 E (磁场 H) 的 3 个方向分量分别设为 3 个三维数组 E_x, E_y, E_z (H_x, H_y, H_z),当从核需要电场 E (磁场 H) 的数据时,需要分多次读入。在本程序优化后的算法中,可以将这 3 个数组合并在一起组成一个新的四维数组 E_{xyz} (H_{xyz})。在 DMA 读入回写时,只需要对 E_{xyz} (H_{xyz}) 进行一次读入即可。通过这样的方法增大了每次 DMA 传输的数据量,同时减少 DMA 次数,达到了减少 DMA 传输开销的目的。

(2)增加数据利用率。在每一步的计算过程中,同一变量在不同的计算轮次中被重复用到,但是由于原始程序的算法关系,这些数据并不能被重复利用,从而导致数据需要重复写

入从核。在优化后的算法中,把 j 维循环和 k 维循环进行调换,从而使数据利用率明显提高,整个程序的数据加载量大约减少了 30%。

4 性能测试及结果分析

本文采用三维 FDTD 计算模式,均匀网格,点源位于网格中心。为了更直观地研究该众核处理器平台对 FDTD 仿真算法的适应性,还在 Intel 处理器上进行了对比测试。对比处理器型号为 Intel Xeon 5670,主频 2.93Gz,单节点内存大小 4G,采用 -O3 编译选项。相应的测试的拍数结果如表 1 所列。

表 1 众核与 Intel 性能比较

网格规模	众核处理器拍数	Intel X5670 单核拍数	折合同频率后的加速比
1×10^4	973076	3023171	3.11
8×10^4	2018480	19850584	9.83
5×10^6	99351619	1269032826	13.78

从试验结果来看,该众核处理器对于 FDTD 算法有着良好的加速比,在较大的网格规模下,FDTD 算法的核心代码在 Intel Xeon 5670 单核上运行的拍数是众核处理器上的 14 倍左右。同时课题网格规模越大,加速效果越好,主要原因是数据量较大时,访存效率明显提升,同时通信开销和计算开销能

够更好地相互隐藏。此外启动从核程序的初始化开销是固定的,当程序的数据规模变大时,总的计算和通信拍数会随之增加,这也会导致程序加速比的提高。

结束语 本文以三维 FDTD 仿真算法为例,实现了该课题在众核处理器平台上的并行化,获得了较为理想的加速比,并展示了该众核处理器对 FDTD 仿真算法类计算密集型课题的良好适应性。本文中所采用的两种优化方法是针对众核平台程序的通用方法,可以广泛地应用到其他众核程序上。本课题下一步的研究方向是,继续合理优化算法,减少数据通信传输次数,以及提高写入数据的重复利用率。

参考文献

[1] 高本庆. 时域有限差分法 FDTD method[M]. 北京:国防工业出版社,1995

[2] 唐川,姜乐,张勤,等. 高性能计算发展动态与趋势观察[M]. 成都:中国科学院国家图书馆成都分馆,2008

[3] 赖生建,王秉中,黄廷祝. 共享内存系统中高效并行 FDTD 计算方案[J]. 电子科技大学学报,2010,39(5):680-683

[4] 徐藻,王毅,李琳,等. 基于 MPI 的 FDTD 并行算法及其优化策略[J]. 计算机仿真,2009,26(3):121-124,190

[5] 谢向辉,胡苏太,李宏亮. 多核处理器及其对系统结构设计的影响[J]. 计算机科学与探索,2008: 641-650

(上接第 284 页)

由表 1 可以看出,本文方法对直接由红外热像仪等设备拍摄的红外图片及加噪声后的图片都有较好的处理效果,比其它方法有更高的性噪比。由图 1 可以看出,本文方法在保留边缘方面有较好的效果。同时考虑到项目分析过程中,对红外热像绝缘子的图像预处理过程都是针对设备直接拍摄的图片进行的,各种方法对图像边缘不会造成严重的模糊,性噪比高低成了判断去噪方法的主要指标。结合边缘保持效果及性噪比指标,本文方法均有较好的效果。对红外热像绝缘子图像进行去噪,能为后续绝缘子分割、特征提取等步骤打下基础。

结束语 本文根据像素的同龄组个数,自适应选择不同的去噪方式,能有效地去除脉冲噪声和高斯噪声。利用同龄组内像素的平均值代替整个窗口像素平均值能有效减少边缘模糊。利用像素相邻组进行边缘判断能更好地保留边缘等细节信息。本文方法不仅能对含有高斯噪声和脉冲噪声的红外图像有效,还能应用于其它图片去噪中。

参考文献

[1] 何洪英,姚建刚,王玲. 一种基于 BAYES 估计的小波自适应绝缘子红外图像去噪算法[J]. 电工技术学报,2006,21(1):37-41

[2] 李佐胜,姚建刚,杨迎建,等. 基于 MAP 估计的复小波域局部自适应绝缘子红外热像去噪方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(10):2070-2075

[3] 李文杰,姚建刚,毛李帆,等. 基于中值滤波法及小波自适应扩散

法的绝缘子红外热像去噪[J]. 电网技术,2010,34(8):160-164

[4] 李佐胜,姚建刚,杨迎建,等. 平稳小波域局部自适应绝缘子红外热像去噪方法[J]. 高电压技术,2009,35(4):833-837

[5] 葛馨远,孙中伟,许刚. 基于小波域隐 Markov 树模型及重要性修正的绝缘子红外图像去噪研究[J]. 电网技术,2007,31(2 增刊):3-7

[6] 刘鲁源,韩尧松,李士心,等. 模糊小波阈值去噪方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4 增刊):813-814

[7] 何洪英,姚建刚,罗滇生. 红外图像的自适应混合去噪[J]. 计算机工程与应用,2006,42(6):7-9

[8] Kennedy C,Deng Y,Manjunath B S,et al. Peer group image enhancement[J]. IEEE Trans. on Image Processing,2001,10:326-334

[9] Munasinghe R, Davari A. Elementary Methods for Improving Edge Detector Performance[C]//Proceedings of the 41st Southeastern Symposium on System Theory. March 2009

[10] Munasinghe R, Davari A. Peer groups, neighbor groups, and edge detection[C]//42nd Southeastern Symposium on System Theory(SSST). March 2010:47-50

[11] Deng Y,Kenney C,Moore M S,et al. Manjunath,Peer group filtering and perceptual color image quantization[C]//Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems. 1999,4:21-24

[12] Fodor I K,Kamath C. Denoising through wavelet shrinkage: An empirical study[J]. J of Electronic Imaging,2003,12(1):151-160