

网络并行 FDTD 方法分析电大目标电磁散射

闫玉波¹, 葛 宁², 郑美艳³, 葛德彪¹, 田春明¹

(1. 西安电子科技大学物理系, 陕西西安 710071; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 3. 中科院软件教育培训中心, 北京 100080)

摘 要: 本文应用基于消息传递(Message Passing)模式的网络并行计算系统来实现并行 FDTD 方法. 通过区域分割技术将 FDTD 计算区域分割成多个子域进行分别计算, 各个子区域在边界处与其相邻的子区域进行切向场值的数据交换以使整个迭代进行下去, 从而实现 FDTD 并行计算. 我们采用 PVM 并行平台来实现并行 FDTD 算法. 计算结果表明了本方法的正确性和有效性.

关键词: 网络并行计算; FDTD 方法; 区域分割技术; 电磁散射

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0821-04

Analysis of Large-Scale EM Scattering Problems Using the Parallel FDTD on a PC Cluster System

YAN Yu-bo¹, GE Ning², ZHENG Mei-yan³, GE De-biao¹, TIAN Chun-ming¹

(1. Dept. of Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Software Education & Training Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: We present a parallel algorithm for the FDTD method on a distributed network by using the message passing module. The computation space is divided into some sub-domains. Then the fields inside each sub-domain are computed on an individual processor with a small amount of data being communicated from neighboring sub-domains. The special boundaries in the FDTD domain, such as absorbing boundaries, connective boundaries and near-to-far fields transform boundaries are dealt with particularly. In this paper, a parallel programming console of Parallel Virtual Machine (PVM) is used, which denotes a message passing library and a daemon to carry out the parallel programs.

Key words: network parallel computing; finite-difference time-domain (FDTD) method; domain decomposition technique; electromagnetic scattering

1 引言

1966年 K S Yee^[1]首次提出电磁场数值计算的时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法. 对电磁场 E、H 分量在空间和时间上采取交替抽样的离散方式, 每一个 E(或 H)场分量周围有四个 H(或 E)场分量环绕, 应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场. 这样, 由电磁问题的初始值及边界条件就可以逐步推进地求得以后各时刻空间电磁场分布. FDTD 计算的局域性使之便于实现并行运算^[2].

由于 FDTD 离散元胞必须满足 $\Delta l \ll \lambda$, 因而, 处理电大目标电磁问题所需内存很大, 考虑并行 FDTD 算法是解决问题的有效途径之一. 由于目前大规模并行计算机和专用机群设备价格昂贵, 希望能够利用较为经济的高性能 PC 机互连协同工作, 利用网络并行计算技术解决大内存的要求. 本文讨

论应用基于消息传递(Message Passing)模式的网络并行系统, 通过区域分割来实现并行 FDTD 方法, 最后给出两个具体计算例子.

2 网络并行计算

并行计算是使用多于一个中央处理单元或计算机来协同工作的计算模式^[3]. 并行计算结构可以是很多个处理器组成的一个大型并行计算机, 也可以是由普通以太网连接的两台以上的 PC 机组成的机群(COW), 或是由 INTERNET 上一些计算单元组成的虚拟超级计算机. 由于目前大规模并行计算机和专用机群设备昂贵, 希望能够利用机群系统, 即由通用的高速网络将一组高性能工作站或高档 PC 机按某种结构连接起来, 在并行程序设计以及可视化人机交互集成开发环境的支持下, 统一调度, 协调处理, 实现高效并行处理的系统.

对于网络并行计算系统, 一个可移植的、基于消息传递的

收稿日期: 2002-01-09; 修回日期: 2002-11-15

基金项目: 国防科技预研项目(No. 4130305-01)

并行编程平台是必不可少的。消息传递编程是一种显式编程,大多数系统使用发送和接收函数来交换数据。目前,已经存在许多通用且成熟的消息传递软件包,其中 MPI(Message Passing Interface)和 PVM(Parallel Virtual Machine)是应用比较广泛的两种软件包。本文采用 PVM。PVM 是美国国家基金会资助的公开软件系统,是目前流行的消息传递编程环境,已为硬件厂商广泛接收。PVM 属于自由软件,具有通用性强,功能强大,异构性能较好等优点^[4]。

并行计算中有两条可供选择的路线:一是在现有串行算法基础上进行并行化;二是直接从数学物理问题出发,面向并行系统研究并行计算方法。这里,我们在现有 FDTD 算法基础上通过区域分割技术进行并行化处理。

3 区域分割并行 FDTD 方法

FDTD 方法所需内存与元胞数成正比。FDTD 元胞总数为 N 时所需内存可估算如下:设每一元胞电磁场各分量以 Fortran 语言中单精度变量计算,每个变量占内存 4 字节(Bytes),标志材料参数占内存为 1 字节,则有^[5]

$$\text{所需内存} = N \text{ 元胞} \times (6 \frac{\text{变量}}{\text{元胞}} \times 4 \frac{\text{Bytes}}{\text{变量}} + 1 \frac{\text{介质编号}}{\text{元胞}} \times 1 \frac{\text{Byte}}{\text{介质编号}}) = N \text{ 元胞} \times 25 \text{ Bytes/元胞} \quad (1)$$

根据以上估算公式,如果计算目标为 $500 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$,若元胞 $= 0.25 \text{ cm}$,所需内存约为 3386Mb。此外随着元胞增加,程序每一时间步的计算时间增加,并且所需计算时间步的总数也增大。这些因素使得我们需要将通常的串行方式改为网络并行方式来实现 FDTD 计算。

下面我们以二维 TM 情况为例说明并行 FDTD 算法的实现。二维情况下,TMz 元胞场分量的排布如图 1。注意电场和磁场在空间分布上相差半个网格。这时,可以得到 Maxwell 方程的离散公式为

$$E_z^n(i, j) = CA(m) \cdot E_z^{n-1}(i, j) + CB(m)$$

$$\left[\frac{H_y^{n-1/2}(i + \frac{1}{2}, j) - H_y^{n-1/2}(i - \frac{1}{2}, j)}{x} - \frac{H_x^{n-1/2}(i, j + \frac{1}{2}) - H_x^{n-1/2}(i, j - \frac{1}{2})}{y} \right] \quad (2)$$

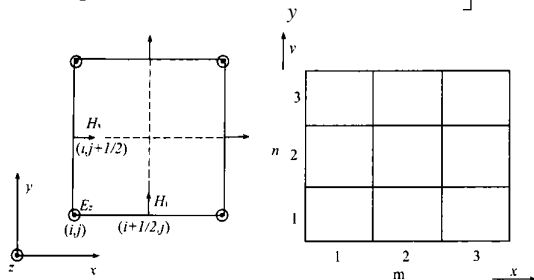


图1 二维 TMz 极化 Yee 元胞

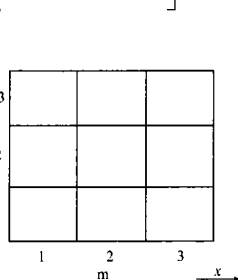


图2 FDTD 区域分割及编号方式

其中系数 $CA(m)$ 、 $CB(m)$ 与介质电磁参数以及离散参数有关。注意电场和磁场总是差半个时间步。由上式可以看出:空间任意一点的迭代公式只与它本身上一个时刻的场值和周围

四个磁场上半个时间步的值有关,而与计算区域内其他场量没有直接关系。磁场两个分量 H_x 和 H_y 有类似的规律。这种区域性使得我们可以将 FDTD 区域分割成若干个子区域分别进行计算,各个子区域只需在边界处与相邻的其它子区域进行切向场值的数据交换就可以使整个迭代进行下去,从而实现 FDTD 并行计算。

假设给定的二维计算区域沿 x 方向分成 M 块,在 y 方向分成 N 块,如图 2 所示,图中为 $M = N = 3$ 的情况。我们采用和矩阵类似的编号方式来标记各个子域:用 (m, n) 方式表示某一子域,其中 m, n 分别为 x, y 方向上的编号。这种编号方式使得编程中很容易确定各个子域的位置,以及它们的相互位置。在图 2 中,四个顶角子域 $(m, n) = (1, 1), (1, 3), (3, 1), (3, 3)$ 都有两个边界为吸收边界,另外两个边界需要跟其相邻子域进行数据交换;对于非顶角边子域 $(1, 2), (2, 1), (2, 3)$ 和 $(3, 2)$,只有一个边界为吸收边界,而有三个边界需要跟相邻的子域进行数据交换;对于内部的子区域 $(2, 2)$,则四个边界都需要跟相邻子区域进行数据交换。

将 FDTD 计算区域分成多个子区域后,各个子区域内部的场量都按照通常 FDTD 进行迭代。但在迭代过程中,边界上的电场(磁场)分量需要相邻子域上前半个时刻相应的磁场(电场)分量值。由于 Yee 元胞中电场和磁场各个分量的位置总是差半个网格,因此在划分区域时,使相邻子域之间有半个网格的重叠区域。每个子域边界上的场同时属于相邻子域内部的场,其迭代在相邻子域内进行,并在迭代后传递给本子域以进行本子域内部场的迭代。图 3 给出了子域 (m, n) 与四个相邻子域边界的划分情况,其中灰色表示区域重叠部分。考虑 y 方向上的第 n 个分区,它的下边界为 $j = j_0 - 0.5$ 面(边界场量为 H_x ,它同时属于 $n-1$ 区的内部的场,其迭代在 $n-1$ 区进行),而 $n-1$ 区的上边界为 $j = j_0$ (边界场量为 E_z ,它同时属于 n 区的内部的场,其迭代在 n 区进行),即两个区域有半个网格的重叠(图中用灰色表示)。对于 n 区的上边界有同样

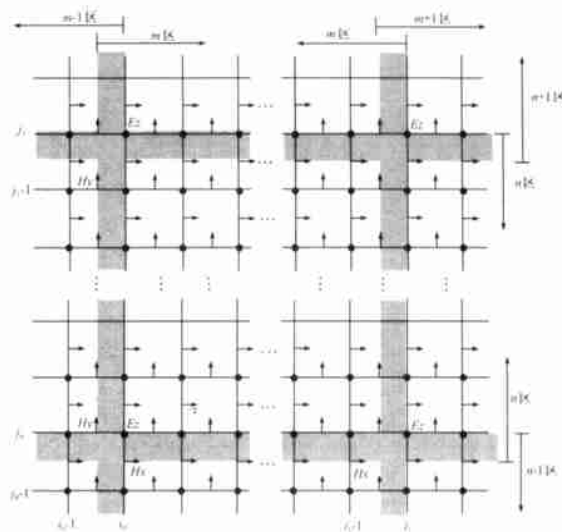


图3 子域 (m, n) 边界划分及场量分布示意图

的处理,即 n 区的上边界为 $j = j_1$,而 $n+1$ 区的下边界为 $j = j_1 - 0.5$.总的 n 区域为 $[j_0 - 0.5, j_1]$.假设各个子域都进入第 TimeStep 时间步的迭代.这样,在 n 区电场的第 TimeStep 时间步迭代前,需要将 $n-1$ 区在 $j = j_0 - 0.5$ 面上的切向磁场在第 TimeStep - 0.5 时间步的值发送到 n 区.同样,在 n 区磁场分量的第 TimeStep + 0.5 时间步迭代以前,需要将 $n+1$ 区在 $j = j_1$ 面上的 TimeStep 时间步的电场传送给 n 区.

在 x 方向我们采取同样分割方法.从图 3 中可以看出,对子域 (m, n) ,位于它的上边界和右边界切向场分量是电场 E_z ,而下边界是磁场分量 H_x ,左边界是磁场分量 H_y .

对于位于 FDTD 总计算区域边界位置的子域,它有一个或者两个边界为吸收边界,此处需要应用吸收边界条件来处理,这些边界上没有数据交换问题.

从上面的分析可见,某子域在进行电场(磁场)的迭代之前,需要传送上半个时间步相邻子域的磁场(电场).因此,各个子域场量的迭代必须同步,否则迭代不能进行下去.在程序实现中数据通信应该使用同步数据传递函数进行.

通常由于各个节点之间的数据通信速度是网络并行计算中的一个瓶颈,因此并行算法的设计应当使数据通信量尽量小.在网络并行 FDTD 方法中,区域分割的不同方式(拓扑结构)产生不同的通信量.一个普遍的原则是:应当尽可能的选择将所有子域分成正方形(二维)或者正立方体(三维)结构.这种结构可以使得总的数据通信量最小.当然实际计算中还需要考虑机群系统中节点个数(子域数目)、负载均衡等方面的要求.

将 FDTD 区域划分成子域后,带来的一个相应问题是,连接边界、输出边界、吸收边界都被划分到某些子域中.由于这些边界需要特别处理,因此增加了编程的复杂性.编程实现的办法是将各个边界的位置传输给所有子域,然后,根据各个子域的网格范围来判断本子域是否包含某边界.

为了实现瞬态 FDTD 的近-远场外推,在迭代的每一步都需要计算本时刻输出边界上的等效电磁流对远区场的贡献.FDTD 区域划分成子域后,输出边界分布在不同子域.由于输出边界上各点对远区的贡献是线性叠加的关系,因而,可在有输出边界的子域分别计算这部分边界上等效电磁流对远区场的贡献,到 FDTD 迭代完成后收集各个子域外推结果并叠加,从而得到总的远区场.

4 PVM 实现同步数据通信

如上一节所述,在进行电场的计算之前,需要首先在所有两个相邻子域的边界之间传输切向磁场;而在进行磁场的计算之前,需要先在所有两个相邻子域的边界之间传输切向电场.仔细分析图 3 发现:在这种区域分割方案下,当在两个相邻子域的边界传递磁场时,磁场数据总是从下面一个子域传递给上面一个子域(H_x),或者从左面一个子域传递给右面的子域(H_y);当在两个相邻子域的边界传递电场(E_z)时恰恰相反,电场数据总是上面一个子域传递给下面一个子域,或者从右面一个子域传递给左面的子域.每一个子域都在发送数据的同时也需要接收数据.例如,在计算电场之前,对任意子域

(m, n) 需要接收的数据包括由子域 $(m-1, n)$ 发送来的边界切向磁场 H_y 和由子域 $(m, n-1)$ 发送来的边界切向磁场 H_x ;同时,子域 (m, n) 需要发送 H_y 给子域 $(m+1, n)$,以及 H_x 给子域 $(m, n+1)$.所有子域都要在计算电场之前完成这些操作.

在 PVM 中,发送数据函数是非阻塞的,接收函数分为阻塞接收、非阻塞接收和限时接收三种.这里我们采用阻塞接收函数进行数据接收,以便达到同步的目的.我们采用主从模式实现网络并行 FDTD 编程.整个程序由两部分组成:主控程序和从程序.主控程序完成的功能包括:初始化;FDTD 子区域划分;启动并初始化 PVM,启动从程序;将初始数据传输给各个从程序;收集、处理、输出计算结果.从程序功能包括:接收主控程序发送来的数据,计算各参数,完成初始化;进行 FDTD 计算;将计算结果发送到主控程序.

5 算例

例 1 二维金属机翼. FDTD 剖分后的机翼模型如图 4 所示,其长度为 240mm,厚度为 24mm,离散间隔 $\Delta = 0.1\text{mm}$. FDTD 计算时机翼的目标区域约为 2400×240^2 ,FDTD 总计算区域为 2450×265^2 .取 $t = \sqrt{2}c$.入射波采用高斯脉冲



图 4 FDTD 剖分后的机翼模型

$$E_i(t) = \exp\left[-\frac{4(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (3)$$

设高斯脉冲波(TE极化)从机翼的迎头方向入射,脉冲宽度 $= 60\text{ fs}$, $t_0 = 0.8\text{ fs}$.应用并行 FDTD 计算进行需要进行区域分割.由于机翼是一个狭长体,因此在子域数目不是很多的情况下,沿着狭长方向(水平方向)进行区域分割是合适的,这样做使计算中子域之间的数据通信量最小.如果分割沿着机翼的厚度方向进行或者同时沿着长度和厚度两个方向进行,都会使通信数据量增大,从而使并行算法的效率降低.图 5 给出前 1000 时间步并行和串行 FDTD 计算结果的比较,其中并行计算结果是将计算区域沿水平方向均匀分成 2 个或 3 个子域.三者结果完全一致.

例 2 金属平板(三维).如图 6 所示,平板为方形,边长为 29cm,厚度为 1cm. FDTD 元胞 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1\text{cm}$, $t = \sqrt{2}c$,入射波为高斯脉冲(3)

式, $\tau = 60\text{ fs}$,入射波沿 z 方向,其电

场 E 分量沿 x 方向.图 7 给出平板后向远区散射电场随时间的变化,包括划分为 $2 \times 2 \times 1$ 个子域、 $3 \times 3 \times 1$ 个子域后用并行 FDTD 以及用串行 FDTD 的计算结果.同样,根据子域形状尽量接近正方体的原则,本例中区域分割是沿着 x 和 y 方向

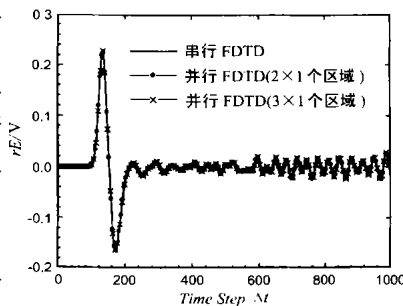


图 5 金属机翼后向散射时域波形:TE极化

进行的. 如果沿着 z 方向进行, 会使子域间的通信数据量增大.

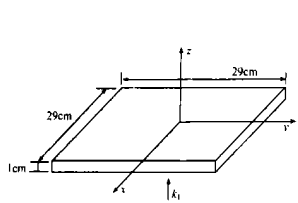


图6 金属平板模型

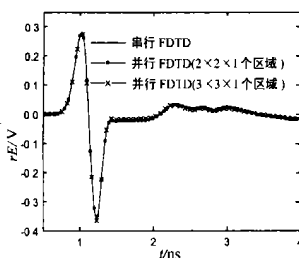


图7 金属平板的远区后向散射时域波

6 结论

本文采用 PVM 并行平台来实现并行 FDTD 算法, 包括二维和三维情况. 实际上, 由于并行算法中数据通信是无损的, 如果所用计算机网络系统中所有节点的软件和硬件环境一致, 那么计算结果应当和串行 FDTD 方法一致. 显然, 网络并行技术与 FDTD 的结合可以用于电大目标电磁散射、辐射等问题的分析计算.

参考文献:

- [1] Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, AP-14(3): 302 ~ 307.
- [2] Guiffaut C, Mahdjoubi K. A parallel FDTD algorithm using the MPI li-

brary [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, AP-43(2): 94 - 103.

- [3] 孙家旭, 张林波, 迟学斌, 汪道柳. 网络并行计算与分布式编程环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1996 年 3 月.
- [4] Geist A, et al. PVM: Parallel Virtual Machine—A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing [M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1994.
- [5] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

作者简介:



闫玉波 男, 1973 年 2 月生于山东日照, 2001 年 3 月于西安电子科技大学获得博士学位, 主要研究方向为计算电磁学、瞬态电磁散射和辐射.



葛宁 男, 1971 年 6 月生于陕西西安市, 1997 年于清华大学获博士学位, 1997 年到 1998 年在加拿大 University of Toronto 作博士后, 1998 年至 2000 年在美国 ADC Telecommunications Inc. (Dallas, TX) 担任 Senior Project Engineer, 从事 ATM 交换专用集成电路的设计, 现为清华大学电子工程系副教授, 目前主要研究方向是多业务传输平台、通信专用集成电路与系统仿真.