

并行共形 FDTD 算法及其在 PBG 结构仿真中的应用

张 玉, 宋 健, 梁昌洪

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文研究了 MPI 信息传递接口支持下的 3 维并行共形网格 FDTD 算法, 并利用典型 PC 集群的硬件环境进行了具体的实例测试. 采用该方法对一种一维圆形光子带隙微带滤波结构的 S 参数进行了计算, 数值结果表明了本文方法的正确性与有效性.

关键词: 共形网格 FDTD; 并行 FDTD; 光子带隙; PC 集群

中图分类号: TN011 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 12A-2142-03

Study on the Parallel Modified Locally Conformal FDTD Algorithm on Cluster of PCs for PBG Structures

ZHANG Yu, SONG Jian, LIANG Chang-hong

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: MPI based parallel 3D FDTD is studied with the support of Cluster of PCs. With parallelized locally conformal FDTD technique, a type of photonic band gap (PBG) structure in microstrip transmission line is analyzed. The comparison of the Parallel Conformal FDTD simulations with Moment Method results shows an excellent agreement.

Key words: conformal FDTD; parallel FDTD; PBG; cluster of PCs

1 引言

时域有限差分(FDTD)方法^[1]作为一种电磁场数值计算方法,已经引起理论电磁界和工程电磁界的广泛关注.应用 FDTD 方法能方便地模拟各种具有复杂结构的微波电路和天线结构,然而,对于谐振结构, FDTD 方法通常需要很多时间步才能收敛,所需计算时间很长;对于电大物体与具有复杂(细小)结构目标的分析,为了保证足够的计算精度,需要划分的网格数量很大,此时计算量很大,所需的内存单个 PC 机往往难以满足要求.解决这些问题的有效方法之一是采用并行 FDTD 方法.然而,国外的研究者的并行工作通常实现在大型计算机和 workstation 平台^[2],这些工作平台价格极其昂贵.

随着并行计算技术的发展,计算机群集技术受到广泛的重视和深入的研究.集群系统应运而生.集群系统就是由一组通过网络互连的独立计算机构成的、全部计算资源可一体化的并行或分布式系统.计算机群集技术就是将若干台 PC 机(或工作站、服务器等)通过互连网络连接在一起,使其像一台计算机一样工作,从而获得接近于或超过超级并行计算机的计算和处理能力的技术.计算机群集技术(Clustering technology)简称集群技术或群机技术,其系统对应地称为群机系统或集群系统.由 PC 机、工作站、服务器或 SMP 组成的群机系统则分别称作 PC 集群(COP: Cluster of PCs)、工作站集群(COW:

Cluster of workstations)、服务器集群(COS: Cluster of servers)和 SMP 集群(CLUMP: CLUster of sMP).其中工作站集群(COW)最初也称为工作站网络(NOW: Networks of workstations).组成群机系统的独立计算机也称为节点.

本文将研究 MPI^[3]支持下的并行 FDTD 算法,具体测试其在典型 PC 集群(COP)系统中的性能,并应用该方法结合共形网格 FDTD 技术计算了一种通过在介质片上腐蚀圆孔实现的 PBG 微带传输线结构的 S 参数^[5],提高了分析精度,加快了分析过程.

2 PBG 结构的共形 FDTD 分析

对于含有光滑曲面结构的 PBG 结构,如图 1 所示,在应用 FDTD 中,如果采用阶梯近似来逼近光滑曲面,它会导致重要误差,还可能引起虚拟表面波,所以需要采用共形网格技术.

把共形网格分为两大类^[6],一类为“良态”的共形网格,如图 2(a),对此类网格,围线积分路径沿着变形网格的边缘进行,且对某些场量采用最近邻居场借代近似.另外一类为“病态”的共形网

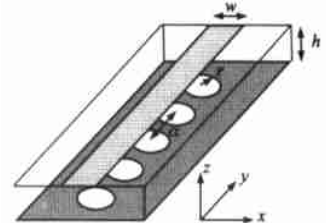


图 1 1 维圆形 PBG 滤波结构

格,如图 2(b)所示,如果此类网格采用上面的方案,则比较容易发散,所以我们把法拉第定理应用于整个 FDTD 网格而不仅仅是变形部分,这意味着围线积分沿着整个网格进行。

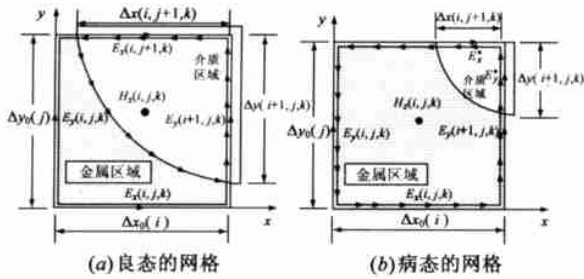


图 2 局部网格示意

对于图 2(a)所示的良态的共形网格,根据法拉第定理:

$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \iint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$. 将围线积分应用于介质区域,可得到共形 FDTD 的算法(以 H_z 为例):

$$H_z^{n+1/2}(i, j, k) = H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\text{area}(i, j, k) \mu_z(i, j, k)} \cdot [l_1 E_x^n(i, j+1, k) - l_2 E_x^n(i, j, k) - l_3 E_y^n(i+1, j, k) + l_4 E_y^n(i, j, k)] \quad (1)$$

式中, l_1, l_2, l_3, l_4 是指围线积分路径上相应的四个边长,也即 Yee 网格四条边处于媒质部分的长度。

对于图 2(b)所示的病态共形网格,我们将法拉第定理应用在整个 FDTD 网格,而不是仅在变形部分,即围线路径是整个网格边缘.此时 H_z 的迭代方程变为:

$$H_z^{n+1/2}(i, j, k) = H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_z(i, j, k)} \times \left[\frac{\Delta x(i, j+1, k) E_x^n(i, j+1, k) - \Delta x(i, j, k) E_x^n(i, j, k)}{\Delta x_0(i) \times \Delta y_0(k)} - \frac{\Delta y(i+1, j, k) E_y^n(i+1, j, k) - \Delta y(i, j, k) E_y^n(i, j, k)}{\Delta x_0(i) \times \Delta y_0(k)} \right] \quad (2)$$

需要共形的其他磁场分量可类似求解。

3 并行 FDTD 算法

为清晰起见,用图 3 所示 1 维并行 FDTD 为例^[4],使用 6 个网格和 2 个节点来讲述这个问题.当节点 2 计算 $E_{x,4}$ 时,需要知道 $H_{z,3,5}$ 的值,它存储于节点 1. 类似的,当节点 1 计算 $H_{z,3,5}$ 时,它需要知道存储于节点 2 的 $E_{x,4}$ 值. 这表明每一个时间步中,必须传递 2 个信息. 每一个沿着各自的方向。

对 3 维情形,6 个电磁场量中的两个包含于这些传递信息中. 图 4(a) 给出了计算区域的拓扑结构划分示意,图 4(b)

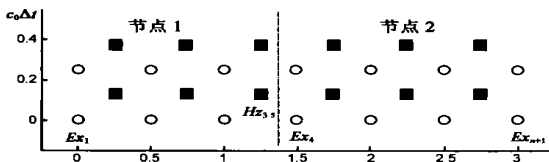


图 3 1 维 FDTD 的并行原理图

给出了节点 $n+1$ 和节点 n 在 Z 方向的交界面 $Y-Z$ 面. 节点之间数据通信的原理可以按照下面的流程来解释: 在编号为 n 的节点,对每一个时间步来说,磁场在 $t + \Delta t/2$ 更新. 新的磁场值分别发送给节点 $n+1$ 并从节点 $n-1$ 接收,所有电场值在 $t + \Delta t$ 更新,新的电场值发送给节点 $n-1$ 并从节点 $n+1$ 接收. 这个过程表明每一次迭代必须有两次通信. 因此,并行算法可以描述如下:

(1) 初始化:

(a) MPI 初始化; (b) 从输入文件读入模型参数并创建共形网格需要的单元网格面积,围线长度等信息; (c) 创建 3 维笛卡尔拓扑结构; (d) 为数据传递定义数据类型; (e) 开始计时; (f) 各个进程划分内存; (g) 设置电磁场量初值为零;

(2) 在每一时间步:

(a) 在包含激励面的节点上(可能是多个)产生激励; (b) 计算每个进程上的磁场分量; (c) 节点之间磁场分量互相通信; (d) 计算每个进程上的电场分量; (e) 节点之间电场分量互相通信; (f) 计算 S 参数或者所考察的其他量; (g) 将所需要的节点上的计算数据收集起来;

(3) 将 S 参数或者其他所需的值传递到某一个固定节点中,写入文件;

(4) 存储计算结果;

(5) 释放内存;

(6) 停止计时;

(7) 终止程序。

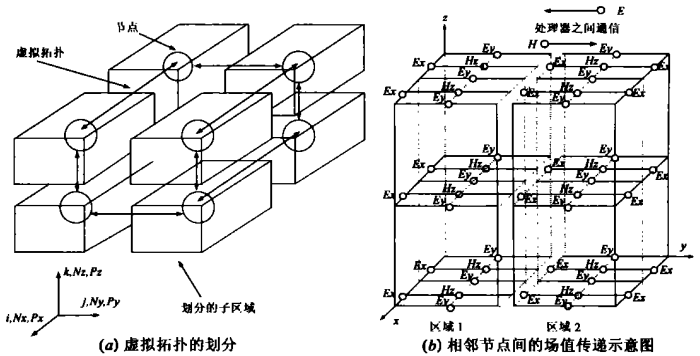


图 4 节点划分与相邻区域数据传递

4 MPI 工作网络

在计算资源成本有限的情况下,我们采用 PC 网络集群系统来研究并行的 FDTD 算法. MPI 工作网络是由 9 台 PIII 450 通过 10/100M 自适应网卡连接起来的局域网. 支持分布计算的库为 MPI 1. 2. 1, 我们开发了 PC 集群系统下的具体并行 FDTD 实现。

5 性能测试与应用

在本文的算例中,虚拟拓扑都是尽可能的沿着 3 维方向产生,以提高通信效率,采用的数据发送方式为 SEND。

(1) 加速比测试. 此例测试在计算区域保持为 $60 \times 60 \times 60$ 不变的情况下,计算时间与 PC 个数的关系. 计算立方体在平面波照射下,沿着 $ab'c'd$ 的电流分布^[4], 计算结果见图 5。

从图 6 可见,运行于 PC Clusters 中的 3 维并行 FDTD, PC

数不是很多的情况下,可以获得比较好的加速比特性,体现于计算时间的迅速减少.随着个数增多,网络延迟导致通信时间增长,以至于时间不是随着 PC 个数增多而减少,而是有所增加,导致扩展性能下降.

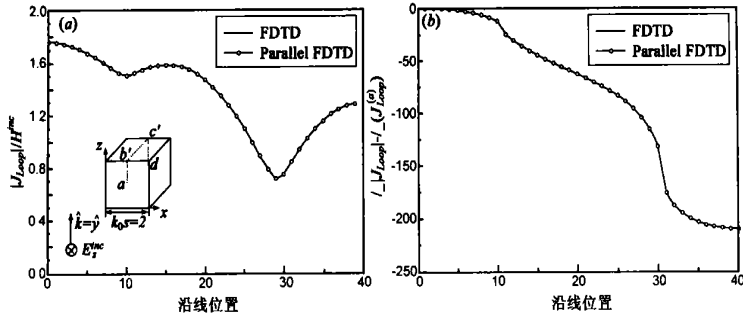


图 5 (a)环线电流的幅度, (b)环线电流的相位

由图 7 可见, PC 网络中难以获得非常理想的扩展性,表现在计算区域随 PC 个数线性增加时,计算时间也增加,并且 PC 个数越多,增加幅度越大.但另一方面, PC 个数增多时,计算区域可以不断扩大,从而可以实现大型电磁问题计算.

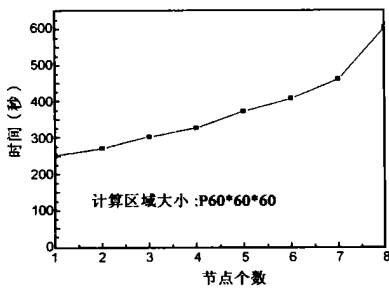


图 7 PC 网络中 PFDTD 的扩展性测试

参考前述并行测试结果,我们将计算总体区域 $61 \times 351 \times 35$ 沿着 x, y, z 三个方向划分为: $1 \times 3 \times 1$ 个子区域.图 8 给出的计算结果表明本文方法与矩量法结果^[5]吻合的更好.

6 结论

本文利用 PC 网络集群系统研究了 MPI 并行环境支持下的 3 维并行 FDTD 算法实现及其性能.结合共形网格技术,计算了一种一维圆形光子带隙微带滤波结构的 S 参数,数值结果表明了本文方法的有效性.本文方法同样可以用来计算单机无法完成的大型 FDTD 计算.因此对于 PBG 这一新课题中的复杂结构电磁模拟还将起到更大的作用,进一步的研究结果将后续报道.

参考文献:

[1] A Taflov, Computational Electrodynamics: the Finite-difference Time-domain Method[M]. MA: ARTECH HOUSE INC, MA, 2000.
 [2] Ulf Andersson, Time Domain Methods for Maxwell Equation. Doctoral Dissertation[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2001.
 [3] 都志辉.高性能计算并行编程技术[M].北京:清华大学出版社, 2001.
 [4] A Taflove, Korada Umashankar. Radar cross section of general three-dimensional scatterers[J]. IEEE Trans on EMC. 1983, 25(4): 433 -

(2)扩展性测量.此例研究随群集系统的处理器个数改变而不断扩大计算区域的并行 FDTD 性能.总体计算区域为 $p \cdot 60 \times 60 \times 60$, p 为计算机节点个数,每个节点上计算的区域为 $60 \times 60 \times 60$.

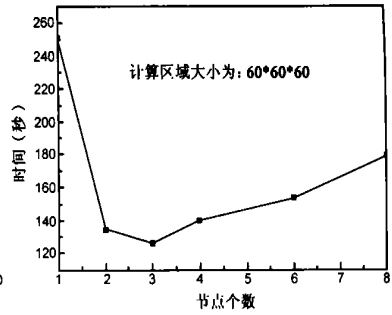


图 6 PC 网络中的 PFDTD 的加速比测试

(3)为加速分析过程,缩短模拟所需时间,本文应用并行共形网格 FDTD 方法对图 1 所示的一种一维圆形光子带隙微带滤波结构的 S 参数进行了计算.

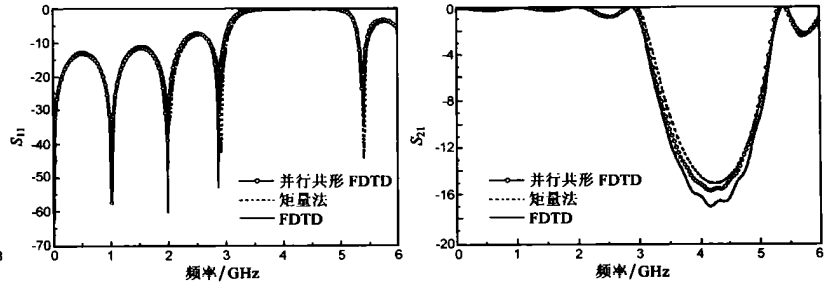


图 8 圆孔周期 $a = 14$. 1mm, 半径 $r = 3.525$ mm 时微带滤波结构的 S 参数

[5] Anaya J A, Marcotegui T Lopetegi, M A G Laso, M Sorolla. Analysis of new periodic structures in microstrip by FDTD[A]. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering[C]. Barcelona, 11-14 September 2000.
 [6] Zhang Yu, Li Long, Liang Changhong. A modified locally conformal FDTD method for broadwall radiating slot in a finite wall thickness waveguide[J]. Microwave Opt. Technol. Lett. 2002, 35(3) : 198 - 201.

作者简介:



张 玉 男, 1978 年 4 月出生于安徽淮北, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生. 主要从事电磁场数值计算、PBG 电磁特性仿真、电磁兼容、并行计算等方面研究工作.

宋 健 男, 1977 年 12 月出生于广西北流, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业硕士生, 主要从事 PBG 电磁特性仿真、并行计算等方面研究工作.

梁昌洪 见本期第 1997 页.