

文章编号: 0490-6756(2005)05-1051-03

并行 FDTD 算法初步研究

蒲洋, 闫丽萍, 刘长军
(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

1966 年 Yee 首次提出时域有限差分(FDTD)法, 在时域中对麦克斯韦方程组进行求解^[1,2]. 目前, FDTD 法已在天线分析、雷达截面计算、电磁兼容分析等众多领域得到了广泛应用. FDTD 法的稳定性要求空间步长应小于波长的十分之一, 而计算时间和计算所需的内存总是与网格总数成正比. 由于受到计算机存储空间和计算时间的限制, 许多复杂电磁问题无法用 FDTD 法进行模拟. 为了适应日益复杂的实际应用问题, 构造并行计算机采用并行算法来满足计算需求成为必然趋势. FDTD 法本身就适合于开展并行计算, 通过进行 FDTD 并行算法设计, 对计算任务进行空间上和时间上的合理分割, 在不同计算节点上加载不同的计算任务, 可以大大提高计算速度, 降低复杂问题对内存的需求.

目前, 国内外已有研究者对 FDTD 并行计算进行研究, 提出了多种实现思路^[3~5]. 我们讨论了基于消息传递接口 MPI(Message Passing Interface)的并行 FDTD 算法的实现, 并在 Beowulf 型微机集群上模拟了一个典型的二维电磁问题, 验证了并行 FDTD 算法的可行性和正确性. 同时讨论了并行算法的执行时间、并行加速比、并行效率与进程数之间的关系, 为并行 FDTD 应用于复杂问题的计算奠定了基础.

1 计算模型

采用并行 FDTD 模拟计算了 $f=3\text{GHz}$ 时 TE_{10} 模电磁波在 BJ-32 矩形波导中的传播. 总场计算了 5 个波长的空间, 散射场计算了四分之一波长的空间如图 1 所示. 图中波导窄边为 x 方向, 宽边为 y 方向, 电磁波沿 z 方向传播. 空间网格 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.38\text{mm}$, 时间步长 $\Delta t = 1.67 \times 10^{-12}\text{s}$. 总计算时间为 20000 个时间步, 即 100 个周期.

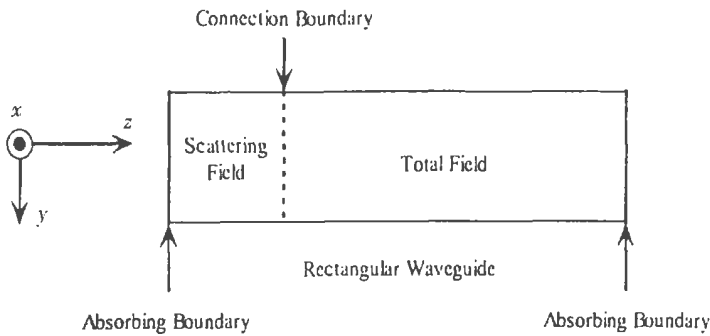


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

2 相邻进程间的消息传递过程

消息传递接口 MPI 是目前国际上最流行、可移植性和可扩展性最好的并行程序设计平台之一. MPI 有两种最基本的并行程序设计模式, 即对等模式和主从模式. 我们在电磁波传播方向上划分出若干相等空间区域实现并行计算, 由于各个空间区域地位相同, 功能和代码基本一致, 故编程采用了对等模式. 为了计算 TE_{10} 模的 E_x , H_y , H_z 分量, 需要开辟 3 个数组来存放数据, 这里将开辟的 3 个数组分别按列进行

分割,将总空间划分为几个子空间. TE₁₀ 模的一个场分量的数据分割形式如图 2 所示.

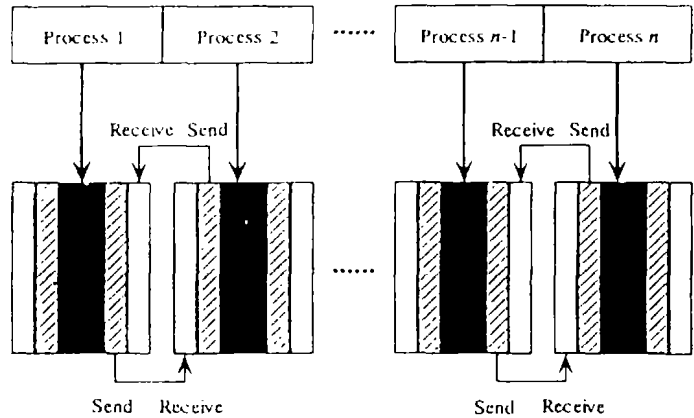


图 2 TE₁₀模 1 个场分量的数据分割形式

Fig. 2 The data division methods of a field component

1 列的数据空间,这样原来每个数据块的大小从 $n_y \times n_z$ 扩大到 $n_y \times (n_z + 2)$.

每个进程都要向相邻的进程发送数据,同时从相邻的进程接收数据. 通过调用 MPI 提供的捆绑发送和接收操作 MPI-SENDRECV 函数,实现数据交换. 捆绑发送和接收操作把发送消息到目的地和从另一个进程接收消息合并到一个调用中,虽然在语义上等效于一个发送操作和一个接收操作的组合,但它可以有效地避免在单独进行发送和接收操作时由于次序的错误而造成的死锁. 因此,我们采用了 MPI-SENDRECV 函数来实现捆绑发送接收操作.

对于最左侧和最右侧的边界块,不能将各自的发送和接收操作合并到一个 MPI-SENDRECV 调用中. 通过引入虚拟进程(MPI-PROC-NULL)的概念,可以将最左侧和最右侧边界块的发送和接收操作合并到一个 MPI-SENDRECV 调用中,这就方便了并行编程.

3 结果与讨论

图 3 给出了计算区域中心点电场 E_x 分量的幅度随时间步的变化. 由图 3 可以看出 E_x 在约 3000 个时间步(15 个周期)时与解析解相比误差在 3%以内, 因此本并行 FDTD 程序是稳定收敛的. 图 4 给出了

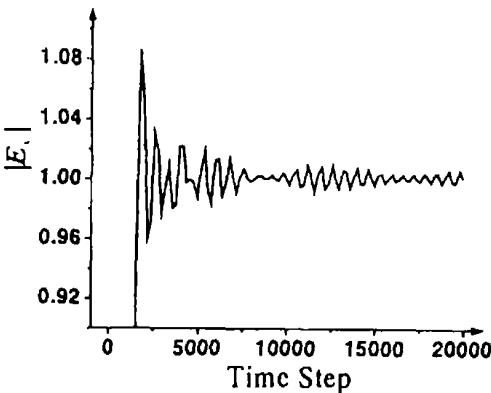


图 3 中心点电场 E_x 幅度随时间的变化

Fig. 3 The variation of amplitude of E_x at the center with time

达到稳态后一个区域(连接边界两侧各四分之一波长范围)内电场 E_x 与相应解析解比较的相对误差. 可以看出, E_x 的最大相对误差在连接边界附近为 1.6%,这表明并行 FDTD 的计算结果是可靠的.

并行加速比和并行效率可以衡量并行程序的工作性能,定义为^[4]:并行加速比 $S = T_1 / T_n$;并行效率 $E = S / n$. 其中 T_1 指任务由一个进程来完成需要的时间, T_n 指任务由 n 个进程来完成需要的时间. 并行加速比直接表明了采用 n 个进程执行的时间增益. 使用 Beowulf 型并行计算系统中的 6 台计算机运行此本程序,得到参与运算的进程数与程序执行时间,并行加速比以及并行效率的关系如附表所示.

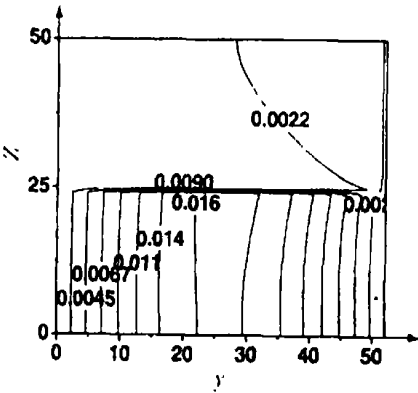


图 4 电场 E_x 的计算误差

Fig. 4 The calculation error of E_x component

附表 执行时间、加速比和效率的实验结果

Add.Tab· The results of the computational time,scalability and efficiency for different process number

Process number	1	2	3	4	5	6
Computational time(s)	136	82.7	61.4	47.7	40.5	35.4
Scalability	1.0	1.64	2.22	2.85	3.36	3.84
Efficiency(%)	100	82	74	71	67	64

结果表明:(1)并行程序执行时间随进程数增加而大大减少,6 个进程参与运算的执行速度是只有 1 个进程参与运算的 3.8 倍;(2)在 6 个进程下,并行加速比随进程数的增加而增大;(3)而并行效率随进程数的增加而降低,这是因为随着进程数的增加,计算空间被划分成了更多的子空间,计算子空间的边界场分量需要知道相邻子空间上的边界场分量,直接导致了通信时间的增加,因此并行效率逐渐降低.

4 结论

我们讨论了基于消息传递并行编程环境 MPI 实现并行 FDTD 算法的过程. 在 Visual Fortran 平台和 MPI 环境下实现了二维 FDTD 的并行程序,并采用该程序模拟了波导中电磁波的传播. 数值结果表明,采用并行 FDTD 算法可以大大减少计算时间,并行加速比随进程数的增加而增加,但并行效率却随进程数的增加而降低.

从算例可知,FDTD 算法的并行化处理是可行的,这为解决复杂结构的电磁仿真问题提供了有效途径. 目前,FDTD 并行程序的效率还较低,如何充分利用 MPI 提供的强大功能,进一步提高并行效率将有待于进一步研究.

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, 14(3):302—307.

[2] 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.

[3] Paul F D,David Beazley. MPI Ruby ;Scripting in a Parallel Environment [J].Computing in Science & Engineering, 2002,4 (4):78—82.

[4] Guiffaut C, Mahdjoul K. A Parallel FDTD Algorithm Using the MPI Library [J].IEEE Antennas and Propagation Magazine,2001,43(2):94—103.

[5] 薛正辉,杨仕明,高本庆,等.FDTD 算法的网络并行运算实现[J].电子学报,2003,12:1839—1843.

[6] 莫则尧,袁国兴.消息传递并行编程环境 MPI[M]. 北京:科学出版社,2001.

[7] 都志辉.高性能计算之并行编程技术——MPI 并行程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

The Primary Study of Parallel FDTD Algorithm

PU Yang, YAN Li-ping, LIU Chang-jun

(College of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The implementation of the parallel FDTD(Finite Difference Time Domain) algorithm based on MPI (Message Passing Interface) is presented. A parallel FDTD program is performed on a Beowulf computer system to simulate the propagation of electromagnetic wave in waveguide. Moreover, the variation of computational time, the scalability and the efficiency of the parallel FDTD program with respect to the number of processes are discussed. Simulation results show that the computation time is greatly reduced by applying parallel FDTD on a 6-node Beowulf system, and the scalability increases while the efficiency decreases if the number of processes is increased.

Key words: parallel algorithm; electromagnetic simulation; computational electromagnetics