

并行 FDTD 结合服务器分析电大电磁问题

雷继兆, 梁昌洪, 张 玉

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 为了在刀片服务器平台发挥并行 FDTD 的最佳性能, 以舰船模型上两根超短波天线的远场辐射分析为例, 采用各种节点配置和 MPI 虚拟拓扑结构进行计算, 分析了不同 MPI 虚拟拓扑对并行性能的影响, 提出了刀片服务器平台中 MPI 编程环境的并行 FDTD 的最佳虚拟拓扑选择原则. 以 F117 飞机模型为例, 利用该方法准确快速地计算了其工作于 2 GHz 的雷达散射截面, 该问题需很大内存, 基于 PC 集群的并行 FDTD 无法处理.

关键词: 时域有限差分法; 并行计算; 电大平台; 电磁散射; MPI

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)05-0846-05

Solving electrically large EM problems using parallel FDTD and HP blade server

LEI Ji-zhao, LIANG Chang-hong, ZHANG Yu

(Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to make full use of the performance of the parallel FDTD method based on the blade serve, the radiation patterns in the far field of two ultra short wave antennas mounted on a ship model are calculated. The results are obtained by different cores and various virtual topologies. Then after analyzing the influence of topology schemes on parallel performance of Parallel FDTD on the blade serve, the paper presents the best MPI virtual topology for Parallel FDTD based on the blade serve. Finally the RCS of F117 is calculated at 2 GHz. A mount of memory is needed for the problem but the FDTD based on the PC cluster can not be used to solve that.

Key Words: finite difference method; parallel algorithms; electrically large platforms; scattering; message passing interface(MPI)

时域有限差分算法(FDTD)^[1]在电磁场辐射和散射、微波和毫米波电路以及电磁兼容等十分广泛的领域已经获得了非常成功的应用. 另一方面, 由于 FDTD 离散元胞必须满足 $\delta \leq \lambda/10$, 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^[2]. 然而, 在 FDTD 并行计算方面, 受限于经济成本, 以往的研究通常在 PC 集群上进行^[3-5]. 尽管普通的 PC 集群系统与单个 PC 相比也能快速的求解相对较大的问题, 但是无论使用千兆 Ethernet, Foundry, Myrinet 或者 Infiniband, 普通 PC 机群的效率都会在处理其数量超过几十个的时候快速下降^[6], 这成为 PC 集群在分析电大尺寸目标时的瓶颈. 最近, 在高性能计算中, 由于刀片服务器价格的下降和我国经济的发展, 集群计算中的节点机正在大幅度由 PC 集群向刀片服务器过渡. 刀片服务器由于采用特殊的体系结构, 在计算节点数很多时也能保持很高效的并行数据通信, 可以极大地发挥并行计算的优势, 和并行 FDTD 算法结合能精确有效地分析电大尺寸的电磁问题.

基于 MPI 的并行 FDTD 在运行于并行网络时, 其并行效率和加速比受虚拟拓扑影响很大. 已有文献针对 PC 集群下并行 FDTD 的最佳虚拟拓扑进行了研究^[5]. 在服务器并行方面, 虚拟拓扑结构复杂, 其与并行效率的关系未见相关报道. 笔者以舰载超短波天线辐射方向图计算为例, 对其进行了讨论, 得到了刀片服务

收稿日期: 2008-08-15

基金项目: 国家部委预研基金资助(9140A07040106DZ0141)

作者简介: 雷继兆(1983-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: xdljz2000@163.com.

器平台中并行 FDTD 最佳虚拟拓扑结构的选择原则,使程序获得了较好的并行效率.以工作于 2 GHz 的 F117 飞机散射问题为例,证明了并行 FDTD 和刀片服务器结合在电大尺寸电磁问题分析中的有效性.

1 虚拟拓扑和场值通信

FDTD 方法的并行计算^[7],是将整个 FDTD 计算区域划分为若干个子区域,每个进程计算其中的一个或者多个子区域,各个进程之间通过传递交界面上的电磁场量以确保 FDTD 方法的场值求解能够进行下去.子区域的划分形式就是 MPI 的虚拟拓扑结构.下面以三维为例说明虚拟拓扑和场值通信.

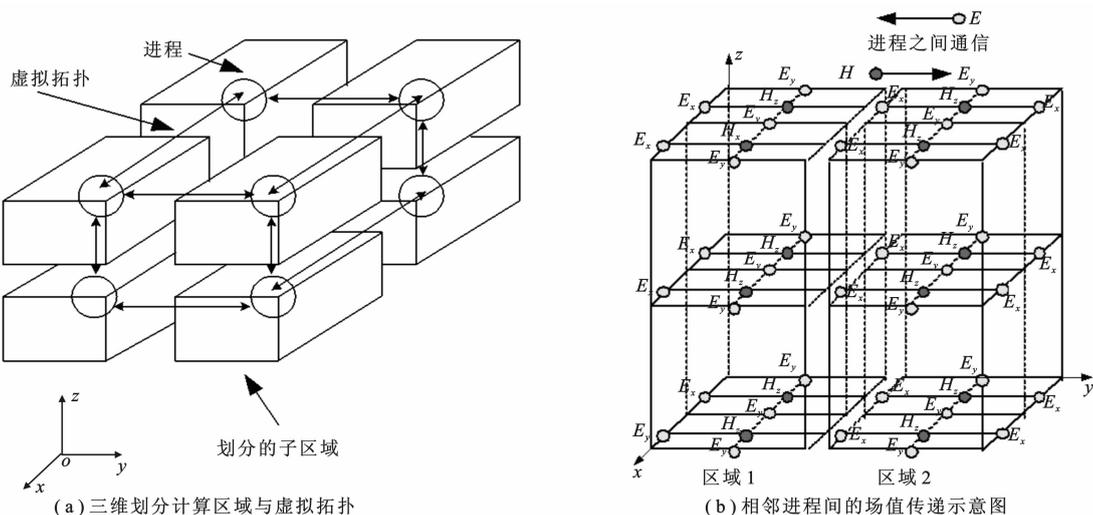


图 1 区域划分与场值通信

如图 1(a)所示,进程虚拟拓扑沿着 3 个方向建立,沿三维方向分割计算区域时,会在不同的方向上出现子域交界面,子域之间所需的场值通信可以分解为若干二维情形来理解.图 1(b)给出了一个 y 方向上的交界面(平行于 xoz 平面)的通信情况,可见区域 2 的电场 E_x 与 E_z 应传递给区域 1 以计算磁场交界面上的磁场 H_x 与 H_z ,而区域 1 的磁场 H_x 和 H_z 应传递给区域 2 以计算电场交界面上的电场 E_x 与 E_z .

2 硬件平台

HP ProLiant BL460c 型刀片服务器(图 2),共有 24 个计算节点,每个节点标配两个四核 Intel Xeon 5310 处理器(1.60 GHz).核是 MPI 并行计算的基本单元,数据通信通过 InfiniBand 完成.采用 InfiniBand 1.1 体系标准交换机,背板交换速率 30 GB/s,双向传输速率 800 MB/s,传输延迟小于 $7 \mu\text{s}$,端口间传输速率 20 GB/s.该系统支持 Network File System(NFS)和 MPI 并行环境.



图 2 HP ProLiant BL460c 型刀片服务器

3 并行性能测试及算例分析

3.1 并行性能分析

计算一个舰船运载平台中的天线辐射特性.舰船模型如图 3 所示,长 153 m,宽 15 m,高 16.5 m.安装两根 $\lambda/4$ 单极天线,工作频率 30 MHz.并行 FDTD 剖分网格的尺寸选 $d_x = d_y = d_z = 0.25 \text{ m}$,使用 5 层 UPML,网格总量选取为 $640 \times 128 \times 256$.进行 2000 步迭代得到远场辐射方向图.其 xoz 面方向图如图 4 所示,与快速多极子结果^[8]吻合.表 1 给出了在不同数目的核上运行时的时间.可以看到 8 个核需要计算近 4 h,而在 128 个

核上运行,只需要2 min多.

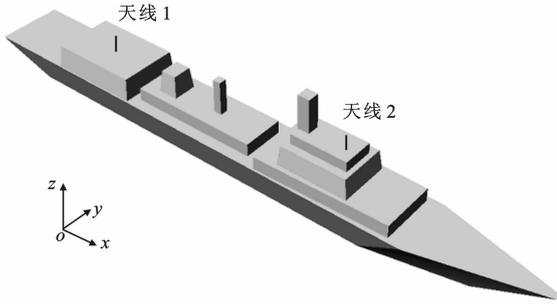


图 3 某安装超短波天线的舰船模型

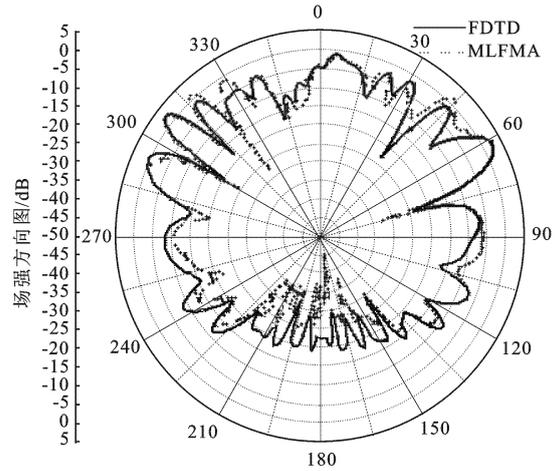


图 4 舰载天线 xoz 面方向图

表 1 计算时间比较表

核数	拓扑结构 ($x \times y \times z$)	子区域交界面网格总量	计算时间/s
8	$2 \times 2 \times 2$	278 528	1 341.81
16	$16 \times 1 \times 1$	491 520	1 097.00
16	$4 \times 4 \times 1$	589 824	760.45
16	$4 \times 1 \times 4$	344 064	711.98
16	$2 \times 2 \times 4$	442 368	723.17
16	$4 \times 2 \times 2$	344 064	682.65
32	$32 \times 1 \times 1$	1 015 808	4 036.42
32	$4 \times 2 \times 4$	507 904	361.40
64	$8 \times 1 \times 8$	802 816	220.62
64	$4 \times 4 \times 4$	835 584	219.24
64	$8 \times 4 \times 2$	802 816	208.85
64	$8 \times 2 \times 4$	638 976	200.93
128	$8 \times 2 \times 8$	966 656	150.12
128	$8 \times 4 \times 4$	966 656	153.73
128	$16 \times 4 \times 2$	1 064 960	128.29
128	$16 \times 2 \times 4$	901 120	124.08

从表 1 可以看出,随着参与计算的核数目不断增加,计算时间迅速减少.但是对于相同核的情况,计算时间差别很大.以 16 和 64 核为例,以用时最短的为基准,将不同虚拟拓扑下耗时差距计算如下:

Case1 16 个核,以 $4 \times 2 \times 2$ 拓扑结构为基准,此时用时 682.65,单位为 s.

对比: $16 \times 1 \times 1$ $1\,097.00 - 682.65 = 414.35$,

$4 \times 4 \times 1$ $760.45 - 682.65 = 77.80$,

$4 \times 1 \times 4$ $711.98 - 682.65 = 29.33$,

$2 \times 2 \times 4$ $723.17 - 682.65 = 40.52$.

Case1 64 个核,以 $8 \times 2 \times 4$ 拓扑结构为基准,此时用时 200.93,单位为 s.

对比: $8 \times 1 \times 8$ $220.62 - 200.93 = 19.69$,

$4 \times 4 \times 4$ $219.24 - 200.93 = 18.31$,

$8 \times 4 \times 2$ $208.85 - 200.93 = 7.92$.

显然,在相同核数情况下,二维和三维虚拟拓扑要比一维用时短,这是由 MPI 通信机制带来的计算效益^[2].然而三维虚拟拓扑不一定比二维用时短,比如 $4 \times 1 \times 4$ 比 $2 \times 2 \times 4$ 的虚拟拓扑要用时更少,主要原因是

计算问题较大时,某些三维虚拟拓扑的交界面网格总量超出二维虚拟拓扑很多,造成时间步内需要传递的网格量变大,从而取代通信机制效益成为影响并行效率的主要因素.此外,最少的计算时间都是在三维虚拟拓扑下获得,如 $4 \times 2 \times 2$, $4 \times 2 \times 4$, $8 \times 2 \times 4$ 和 $16 \times 2 \times 4$,而且此时交界面网格总量是最少的.

由此,虚拟拓扑的划分应该满足下面原则:交界面网格总量 $(n_x - 1)bc + (n_y - 1)ac + (n_z - 1)ab$ 最小,其中, a, b, c 为 x, y, z 方向网格量, n_x, n_y, n_z 为虚拟拓扑值,满足 $n_x \times n_y \times n_z$ 等于核数,且 n_x, n_y, n_z 均大于 1.

将该原则应用于该算例,发现用时最少的虚拟拓扑均满足该原则.最佳虚拟拓扑下的加速比和并行效率曲线如图 5,图 6 所示.

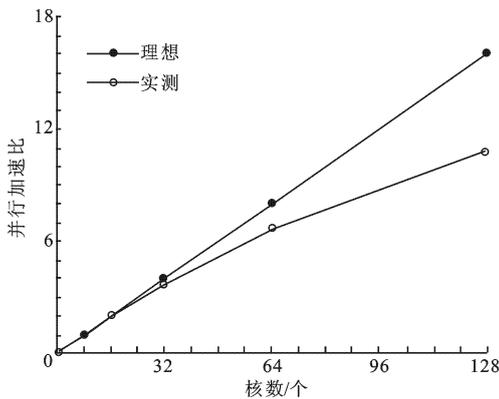


图 5 并行加速比

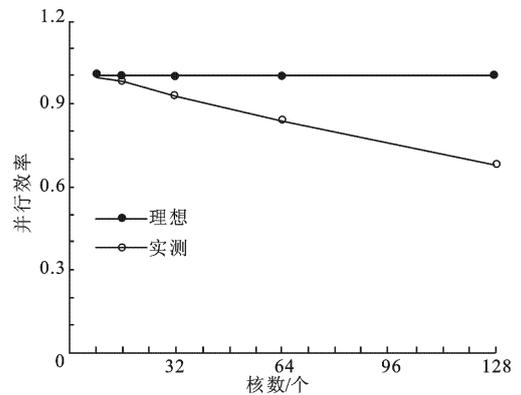


图 6 并行效率

3.2 F117 算例

F117 模型如图 7 所示,长 16.78 m,宽 11.04 m,高 2.00 m,假设 E_z 沿着 $-x$ 方向入射,工作频率为 2 GHz,并行 FDTD 剖分网格的尺寸选为 $d_x = d_y = d_z = 0.015$ m,使用 5 层 UPML,网格总量取为 $1183 \times 795 \times 192$.采用 140 个核 $7 \times 5 \times 4$ 的虚拟拓扑结构,进行 2 000 次迭代计算,耗时 750 s,得到双站 RCS 曲线如图 8 所示.由于采用双精度变量,该问题需要内存很大.受限于硬件条件,基于普通 PC 集群的并行 FDTD 难以处理该问题.

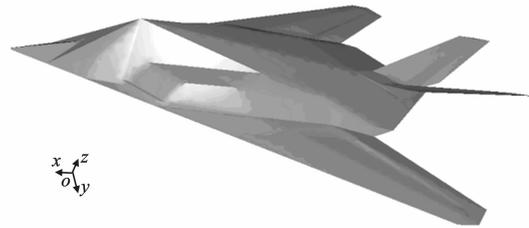


图 7 F117 飞机模型

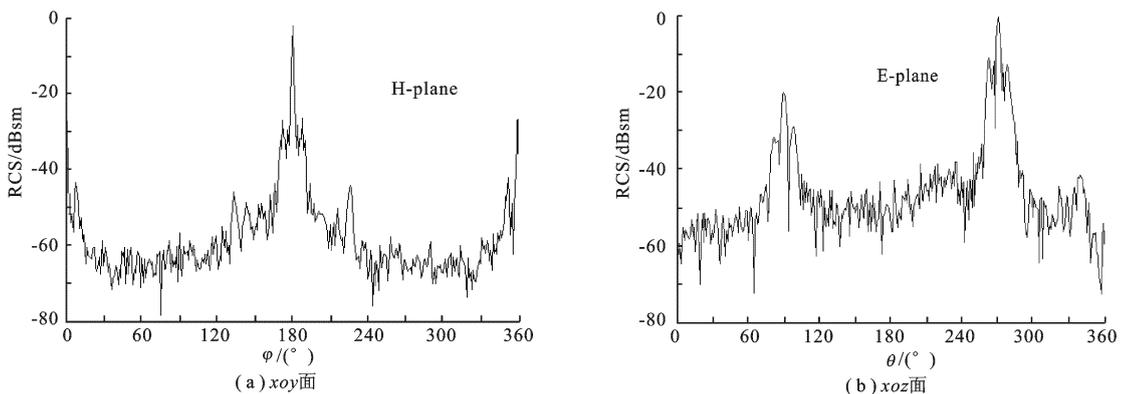


图 8 F117 双站 RCS 曲线

4 结束语

将并行 FDTD 算法和刀片服务器结合来分析电大尺寸电磁问题.以舰载天线辐射特性分析为例,考察

了刀片服务器中并行 FDTD 的性能,得到刀片服务器平台 MPI 并行 FDTD 算法最佳虚拟拓扑的选择原则,使并行 FDTD 能获得最好的并行效率.以 F117 飞机散射特性分析为例,表明了该方法分析电大电磁问题的有效性.刀片服务器与并行 FDTD 算法的结合,为电大尺寸电磁问题的处理提供了新的手段.

参考文献:

- [1] Taflove A. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method [M]. 2nd Ed. MA: Artech House, Inc, 2000.
- [2] 张玉. 电磁场并行计算[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [3] 闫玉波, 葛宁, 郑美艳, 等. 网络并行 FDTD 方法分析电大目标电磁散射[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 821-824.
Yan Yubo, Ge Ning, Zheng Meiyuan, et al. Analysis of Large-Scale EM Scattering Problems Using the Parallel FDTD on a PC Cluster System[J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(6): 821-824.
- [4] 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, 31(12): 1839-1843.
Xue Zhenghui, Yang Shiming, Gao Benqing, et al. A Parallel Implementation Strategy for the FDTD Algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(12): 1839-1843.
- [5] 张玉, 李斌, 梁昌洪. PC 集群系统中 MPI 并行 FDTD 性能研究[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1694-1697.
Zhang Yu, Li Bin, Liang Changhong. Study on Performance of MPI Based Parallel FDTD on PC Clusters[J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 33(9): 1694-1697.
- [6] 余文华, 杨小玲, 刘永俊, 等. 并行 FDTD 和 IBM Blue Gene/L 巨型计算机结合求解电大尺寸的电磁问题[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 562-566.
Yu Wenhua, Yang Xiaoling, Liu Yongjun, et al. Solving Electrically Large EM Problems Using Parallel FDTD and IBM BlueGene/L Supercomputer[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 562-566.
- [7] Gui aut C, Mahdjoubi K. A Parallel FDTD Algorithm Using the MPI Library[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43 (2): 94-103.
- [8] 赵勋旺, 张玉, 梁昌洪. 电大平台中多天线辐射特性的快速计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(4): 596-599.
Zhao Xunwang, Zhang Yu, Liang Changhong. Fast Computation and Analysis of Multiple Antennas Mounted on Electrically Large Platforms[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(4): 596-599.

(编辑: 齐淑娟)

简 讯

2009年7月18日,我校空天研究院成立大会在北京隆重举行.我校空天研究院的宗旨是整合我校在航天/航空技术领域的研究力量,加强科研工作的组织管理,进一步提升我校承担航天和航空领域科研任务的能力,特别是承担国防重大科研任务和国家重大专项的能力.继承和发扬“西军电”的优良传统和作风,以研究院成立为契机,立足优势,加强合作,瞄准国家未来空天科技的发展和战略需求,充分利用和整合学校的空天资源优势,通过承担和培育重大科技项目,努力把研究院建成国内空天电子信息领域研究开发、人才培养、科研成果转化的重要基地,为我国航空航天事业做出更大的贡献.

摘自《西电新闻》2009.7.24