

# 混合并行技术在FDTD计算中的应用研究

刘 瑜, 梁 正, 杨梓强

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**为提高网络环境下细粒度并行FDTD计算的性能,引入局域网两层并行能力的概念,发展了一种高性能的混合并行FDTD算法。在该算法中,通过利用MPI与OpenMP多线程技术,在传统域分解FDTD算法基础上,实现了数据与任务的两层并行化。作为算法实现的应用,对一种常见的车载隐藏式印刷天线进行了模拟研究。计算在不同数量的PC机上执行,并与传统的网络并行FDTD算法进行了比较。数值结果表明,当域分解粒度较小时,该混合并行方法能够有效地提高局域网并行FDTD的算法性能。

**关键词** FDTD算法; 混合并行技术; 多线程; 并行性能; 回波损耗

**中图分类号** TP391.9; TN828.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.16

## Study and Application on Hybrid Parallel FDTD Algorithm

LIU Yu, LIANG Zheng, and YANG Zi-qiang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A high performance hybrid parallel PDTD algorithm is developed by introducing the concept of two layers of parallel capacity based on local area network(LAN). In the hybrid algorithm, MPI is used in conjunction with OpenMP multithreading to achieve two level parallelism of the data and tasks at the basis of the domain decomposition FDTD method. By using this hybrid algorithm, a common hidden printed antenna for automobile is simulated. Computation results show when the grain size of the domain decomposition is on the small side, this novel hybrid parallelization scheme is an effective technique for improving the efficiency of the parallel FDTD based on LAN.

**Key words** FDTD algorithm; hybrid parallel technique; multithreading; parallel performance; return loss

作为一种直接时域求解技术,时域有限差分法(FDTD)由于其原理简洁且容易实现,在工程电磁问题中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但对于电大尺寸目标以及复杂精细结构的模拟,由于需要划分数量庞大的网格,导致计算耗时过长与内存容量不足的问题。在单机性能难以满足日益增长的计算需求情况下,并行FDTD计算成为解决这一困境的主要途径。

由普通微机通过高速以太网互联构成的局域网系统,具有扩展性好、性价比高等优点,随着以MPI为代表的一批基于消息传递的并行开发环境的成熟,使得利用局域网实现并行FDTD计算成为可能。但局域网本身并不是为高性能计算所设计,与专用机群网络相比,具有通信延迟长、软硬件开销大的特点。国内外的研究与实践均表明<sup>[3-4]</sup>,由于局域网所固有的上述通信缺陷,使得网络并行FDTD计算通常仅适合于大粒度的域分解算法,当计算域进一步细分,由于通信-计算开销比的上升,将导致并行效

率的大幅度下降,以至于计算时间不是随着微机台数增多而减小,反而有所上升,造成算法的可扩展性能变差。这样会使并行FDTD计算难以充分利用与整合局域网内的计算资源,大大限制了FDTD算法的适用范围,因此,提高并行效率已成为网络并行FDTD研究的一个关键点。

本文在传统域分解并行FDTD计算模式上,分析了FDTD算法的任务并行特性,引入局域网两层并行能力的概念。在此基础上,利用MPI与OpenMP混合技术,以数据-任务两层并行的方式实现FDTD计算与通信的重叠,减小局域网并行的通信开销。应用这种技术,本文对一种车用隐藏式印刷天线进行了并行FDTD模拟研究。数值结果表明,该方法可以有效减小FDTD计算域划分粒度,提高并行计算效率。

## 1 计算模型与分析

对于一种印刷于后车窗玻璃上的折线天线,如

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(60571020)

作者简介: 刘 瑜(1975-),男,博士生,主要从事并行计算与电磁模拟方面的研究。

图1所示,天线的实际结构为1 mm宽,极薄并紧贴于玻璃下方的带状金属线。模拟的汽车车体理想化为以矩形的金属板和挡风玻璃组合而成,车体长为4 140 mm,宽为1 540 mm,高为1 400 mm,建立的FDTD离散模型俯视图如图2所示。由参考文献[6]可知,当车窗玻璃介电系数为 $\epsilon_r = 5.5$ ,电导率为 $\sigma = 1 \times 10^{-12} \text{ S/m}$ ,模拟波源阻抗设为 $50 \Omega$ 时,天线在FM频段具有较好的性能。下面将FDTD模拟环境作部分改变,研究玻璃介电系数取不同值时对天线性能产生的影响。由于回波损耗参数 $S_{11}$ 值是评估天线电磁特性的重要指标,表征了天线的阻抗匹配状况,在天线的工作频段内,其 $S_{11}$ 值应该小于 $-10 \text{ dB}$ ,因此,本文通过模拟计算 $S_{11}$ 值来探讨天线的电磁性能变化。

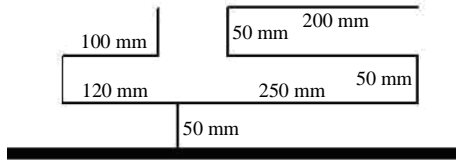


图1 车载折线天线的结构尺寸

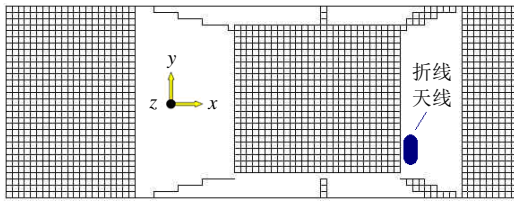


图2 车体FDTD离散模型俯视图

由于电磁场量计算的局域性质,可以将FDTD区域分割成若干个子域分别计算,在迭代中只需在其边界处与相邻子域执行切向场分量的通信操作。如一个二维域分解并行FDTD计算,其子域间的电/磁场值传递如图3所示。图3仅表明对各子域网格进行统一划分的情况,更一般的是根据FDTD不同子域的几何特征而实施独立的共形网格划分<sup>[7]</sup>,相邻子域的边界网格具有一定的重叠区,每个子域边界上的场值信息可通过一定的插值算法从相邻子域中获得。从图2可看到,由于折线天线印刷于后车窗斜面玻璃上,而通常的FDTD离散方法是将求解区域以三维直角坐标方式切割成若干立方体原胞,因此不与直角坐标平面平行的车窗玻璃、天线等结构在模拟中会出现阶梯近似。考虑到后车窗斜面玻璃及其上的印刷天线是车体的主要辐射源,阶梯近似将产生较大的误差,在实际模拟时,将后车窗所在的子域倾斜一定角度,使玻璃平面与坐标平面平行,以方便天线建模,达到提高模拟精度的目的。

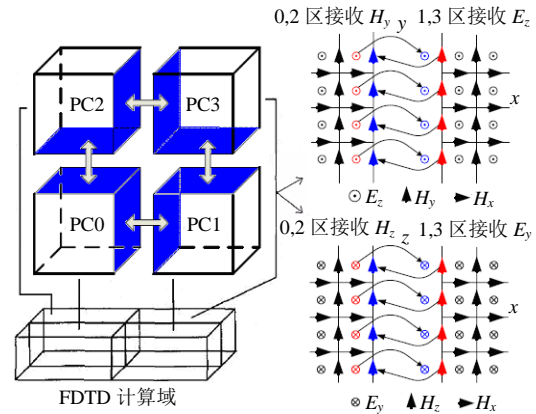


图3 二维域分解并行FDTD计算示意图

模拟选取了 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50 \text{ mm}$ ,并且利用UPML(各向异性介质完全匹配层)截断计算区域,总离散网格为 $129 \times 77 \times 86$ ,沿 $xy$ 平面二维域分解,其中与后车窗有关的倾斜子域采用边界重叠插值算法,车体上其他子域则采用图3所示的简单域分解方法。由于本例中各子域的网格剖分参数相同,仅仅是部分子域沿坐标面倾斜一定角度,因此通过在重叠网格上使用三线形插值,就可以获得良好的计算精度,如图4所示。 $F$ 为一个子域边界上待插值的未知值(电场或磁场),其坐标为 $(dx, dy, dz)$ , $G$ 为另一个子域中电场或磁场的已知值,该子域的网格尺寸为 $(x_0, y_0, z_0)$ 。由此可得到三线形插值公式为:

$$F = \frac{(x_0 - dx)(y_0 - dy)(z_0 - dz)}{x_0 y_0 z_0} G_{111} + \frac{dx(y_0 - dy)(z_0 - dz)}{x_0 y_0 z_0} G_{211} + \frac{dx dy(z_0 - dz)}{x_0 y_0 z_0} G_{221} + \frac{dy(x_0 - dx)(z_0 - dz)}{x_0 y_0 z_0} G_{121} + \frac{dz(x_0 - dx)(y_0 - dy)}{x_0 y_0 z_0} G_{112} + \frac{dx(y_0 - dy) dz}{x_0 y_0 z_0} G_{212} + \frac{dx dy dz}{x_0 y_0 z_0} G_{222} + \frac{(x_0 - dx) dy dz}{x_0 y_0 z_0} G_{122} \quad (1)$$

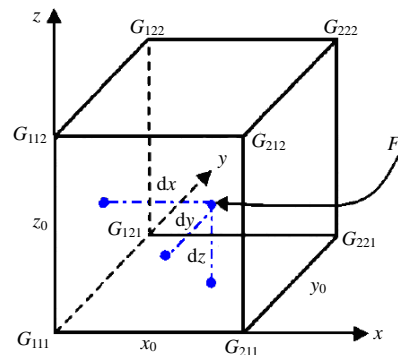


图4 三线形插值算法示意图

对于更复杂的情况,如相邻子域为曲面共形网

格,三线性插值可能导致FDTD迭代发散,可以细化重叠区网格,提高插值精度,但会带来计算量与存储量的增加。另一种较好的办法是根据广义吸收边界的原理,对插值公式进行修正<sup>[8]</sup>,以此降低插值误差累积。

## 2 混合同行技术的实现基础

由于域分解后FDTD各子域的场值数据分别独立计算,具有典型的数据并行特点,因此能够很自然地利用MPI消息传递模型来实现。MPI提供了一些对并行计算具有重要优化作用的通信函数,如非阻塞发送/接收函数MPI\_Isend()/MPI\_Irecv()等,在专用机群上可以有效地实现通信与计算的重叠,减小网络开销对并行性能的影响。但普通局域网系统不具有独立的通信处理器,当网卡执行子域间数据传递时,需要分时占用主CPU时间,在底层硬件上没有提供对重叠的支持;同时,传统的MPI并行程序都是使用单线程实现,不能将通信和计算分开,无法在软件上支持通信和计算的同时操作,由此导致MPI各种通信模式在局域网条件下性能差别不大,难以利用一些在专用机群上有效的MPI优化方法来改善局域网并行性能,文献[9]所作的测试结果也证实了上述分析。

近年来,在局域网微机中普遍使用了具有超线程技术的Pentium4处理器或多核处理器,从硬件上提供了对线程多任务并行的支持,因此,局域网实际上拥有PC机之间与PC机内部两层并行的能力。PC机内部并行是一种共享存储多线程并行模式,通过利用该模式可以有效地实现计算与通信的重叠。

并行FDTD子域的计算是由内部网格与边界交换网格两部分组成,由于子域间通信只与边界网格计算有直接关系,因此,可将FDTD计算分为两个较为独立的任务模块:(1)子域间交换的边界网格计算与通信;(2)子域内部网格计算。这两者能以多线程的方式并行执行,其中边界计算根据域分解情况的不同而有所差异,简单域分解的边界计算与子域内部相同;具有重叠网格的子域则先采用插值技术得到最外层的网格点值,然后再计算出需要传递的重叠层网格值。

共享存储多线程并行模式最广泛使用的编程标准是OpenMP,其主要原理是通过添加并行化指令到已有的程序中,由编译器自动完成线程并行化<sup>[11]</sup>。由于不需要改变MPI并行程序结构,因此很容易将其转化为由MPI与OpenMP混合模式编写的程序。在

该混合模式中,首先利用OpenMP生成多个线程,然后将FDTD计算中相互独立的任务分配到各线程并行执行。Hybrid Parallel FDTD Algorithm算法实现框架如下:

```
Do the initialization work, apply initial conditions;
for  $t = 1$  to  $t_{\max}$  do
{
    Using OpenMP multithreading, #pragma omp
parallel sections
    {
        #pragma omp parallel section
        { Computing the exchanged fields at
sub-domains boundaries;
        Using MPI message passing, exchange fields
with neighbors; }
        #pragma omp parallel section
        { Update  $E$ -field components using  $H$ -field
components inside sub-domains;
        Update  $H$ -field components using  $E$ -field
components inside sub-domains; }
    }
    Update fields at boundaries, apply boundary
conditions;
}
```

由上述分析可知,混合同行算法是在传统MPI数据并行的基础上,引入任务并行。利用OpenMP并行化指令#pragma omp parallel sections,将子域内部计算与子域边界通信划分为两个相对独立的任务,然后由不同的线程并行完成,从而以数据-任务两层并行的方式实现局域网计算与通信的重叠。

## 3 数值测试与性能分析

### 3.1 FDTD并行计算环境

并行FDTD算法的实施环境是由9台PC机,通过千兆以太网互联构成的一个小型局域网系统,每台微机的CPU为主频2.96 GHz的Pentium4(HT),内存为1 024 MB,运行Windows XP操作系统,并配置安装支持OpenMP标准的Visual C++2005编译软件和支持MPI消息传递的MPICH.NT1.2.5并行库。

### 3.2 模拟结果

采用 $3 \times 2 \times 1 (x \times y \times z)$ 域分解结构,在6台PC机上并行模拟了车窗玻璃介电系数对天线 $S_{11}$ 参数的影响,结果如图5所示。当玻璃介电系数 $\epsilon_r = 5.5$ 时,其-10 dB频宽覆盖了大部分FM的工作频段(88~

108 MHz), 与文献[6]的结果吻合良好, 证明了混合并行FDTD算法的可行性与精确性。

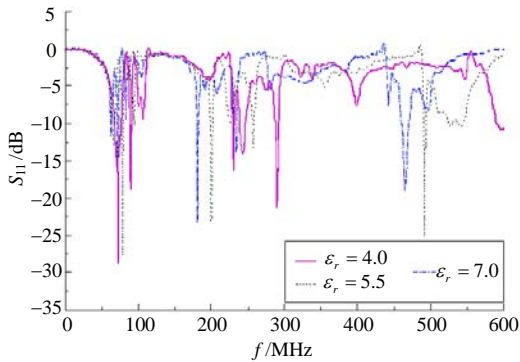


图5 不同玻璃介电系数时的S<sub>11</sub>模拟值

从图5可以看出, 车窗玻璃介电系数的不同, 会使S<sub>11</sub>值产生明显的改变, 并且介电系数越大, 天线的工作频率越低, 但在较低的FM频段区别不大。对于DAB(数字音频广播)频段(174~240 MHz), 在几种情况下, -10 dB频宽均不能有效覆盖其工作频段; 但随着玻璃介电系数增大, 天线在DAB频段的电磁性能会得到一定程度的改善。因此, 根据模拟结果, 这种车载印刷式折线天线在FM频段的电磁性能可以得到保证, 而在DAB频段则需进一步完善。

### 3.3 并行性能分析

本文对局域网并行FDTD计算在两种情况下的加速性能进行了比较: (1) 传统MPI并行算法; (2) MPI与OpenMP混合并行算法。

为便于并行算法实现与比较, 计算域的网格剖分参数不变, 当子域划分数量为偶数时, 采用x×2×1二维域分解; 子域数量为奇数时, 采用x×1×1一维域分解, 子域间MPI数据发送均采用标准非阻塞通信模式, 并行性能测试结果如图6所示。

由图6可以看出, 在本文的模拟环境与计算规模下, 传统MPI并行方法在6台PC机时达到并行加速极限, 此后随着PC机数量增加, 计算时间反而上升。这是由于一个固定规模的问题, 随着并行节点的增多, 单个子域的计算量将减少, 因此当单机计算量下降到一定程度, 其相对通信开销会明显超过计算开销, 从而造成并行加速曲线的上升。而对于混合并行算法, 其加速曲线在PC机数量达到9台时, 仍然保持比较平稳的下降。这是由于通信与计算的重叠大幅度缓解了局域网开销对并行加速比的影响, 使得加速曲线与通信开销没有直接的关系, 只取决于通信与计算的重叠程度。由于现代局域网在硬件上普遍具有两层并行的能力, 通过利用数据-任务多线程并行模式, 能够有效实现计算与通信重叠, 因

此, 该混合并行算法可以很好地用于解决中细粒度的局域网并行FDTD计算问题。

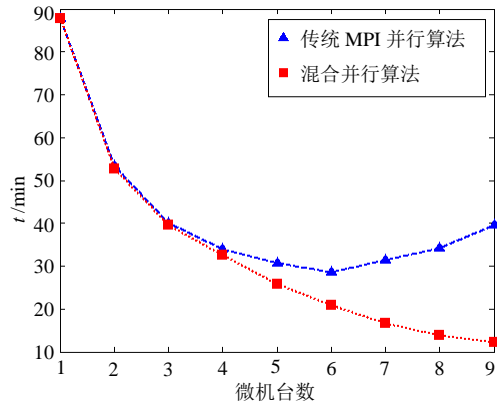


图6 两种算法下并行FDTD的加速比测试

此外, 由于不同的域分解方式将导致子域间数据传递量的差异, 从而造成通信延迟时间的不同, 传统MPI并行FDTD的计算性能与域分解拓扑结构有密切的关系<sup>[4]</sup>。对此, 在8台微机情况下, 本文采用不同的子域拓扑结构: (1) 8×1×1, (2) 1×8×1, (3) 2×2×2, (4) 4×2×1, (5) 4×1×2, (6) 2×4×1, 比较了混合并行算法与传统MPI并行算法两者之间的并行性能差异, 测试结果如图7所示。

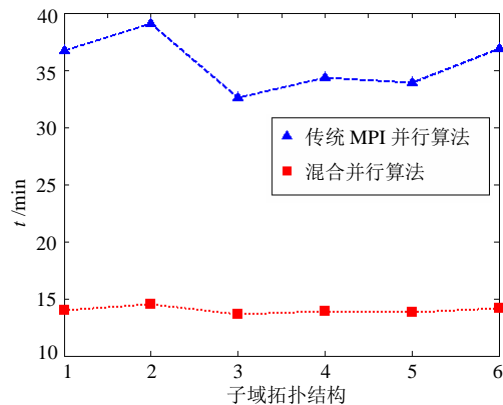


图7 子域拓扑结构对并行性能的影响测试

从图7可见, 传统MPI并行性能曲线具有比较明显的波动, 说明不同域分解结构将产生比较显著的并行性能差异, 因此在传统并行FDTD计算域分解中, 不能仅仅考虑所求问题的物理特征, 为保证并行性能, 还往往需要对不同的子域拓扑结构进行权衡与优化。而混合并行算法的性能曲线则比较平稳, 表明计算与通信的重叠使得子域拓扑结构与并行性能之间不再具有密切的关系, 因此计算域分解可根据所求解问题的具体特征来决定, 而不用担心子域拓扑对算法性能的影响, 为实际的并行计算带来很大的便利, 能够有效地简化FDTD算法的并行实现。

## 4 结 论

当子域划分粒度较小时,并行性能将严重下降,这是使用局域网实施并行FDTD计算的一个瓶颈点。本文通过引入局域网两层并行的概念,利用MPI与OpenMP混合技术计算了一种车用隐藏式印刷天线的 $S_{11}$ 参数,以此为实例考察了局域网混合并行FDTD的性能。研究表明,利用局域网的两层并行能力,以数据-任务多线程并行的模式能够在PC机上有效地实现计算与通信的重叠,减小通信开销对并行性能的影响,从而高效率地在局域网上实现子域划分粒度较小的并行FDTD计算。本文的结论对于PC网络中并行FDTD的研究工作具有现实的参考意义。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN X, LIANG D, HUANG K. Microwave imaging 3D buried objects using parallel genetic algorithm combined with FDTD technique[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2006, 20(13): 1761-1774.
- [2] CELUCH M, GWAREK W K. Properties of the FDTD method relevant to the analysis of microwave power problems[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2007, 41(4): 62-80.
- [3] 郑奎松, 葛德彪, 葛 宁. 三维电磁散射的网络并行FDTD计算和加速比分析[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 767-771.
- [4] ZHANG Y, DING W, LIANG C H. Study on the optimum virtual topology for MPI based parallel conformal FDTD algorithm on PC clusters[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2005, 19(13): 1817-1831.
- [5] RAMZI A J, EEIC K W. Numerical modeling of on-glass conformal automobile antennas[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1998, 46(6): 845-852.
- [6] WANG Bing-zhong, XIAO Shao-qiu, ZHANF Yong, et al. Researches on reconfigurable antenna in CEMLAB at UESTC[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 4(3): 225-231.
- [7] XU Feng, WEI Hong. Domain decomposition FDTD algorithm for the analysis of a new type of E-Plane sectorial horn with aperture field distribution optimization[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2004, 52(2): 426-434.
- [8] 梁 丹, 冯 菊, 陈 星. 高效率FDTD网络并行计算研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(3): 549-554.  
LIANG Dan, FENG Ju, CHEN Xing. A study of efficient parallel FDTD methods on Cluster Systems[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2006, 43(3): 549-554.
- [9] QUINN M J. Parallel programming in C with MPI and OpenMP[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 323-360.

编辑 黄 莘

· 我校科研成果专利介绍 ·

## 移动通信用双面高温超导薄膜技术

移动通信用双面高温超导薄膜技术拥有两项发明专利。它与传统使用的Au、Ag、Cu等比较,微波表面电阻低两个数量级,所研制的微波无源器件插损可降低一个数量级,大幅度地提高了信息接收灵敏度,在移动通信地面接收基站中的关键器件——滤波器上有重要用途(损耗可降至0.2 dB),减小或消除手机通话的盲区,提高通话质量,缩小基站体积,减少基站数量。亦可用于红外阵列器件、磁通流晶体管、约瑟夫逊器件等高灵敏度、高精度的电子信息系统中。

主要性能指标:

双面YBCO/LAO/YBCO样品,  $\Phi 3$  inch以内薄膜的微波表面电阻 $R_s=0.1\sim 0.5$  m $\Omega$  (77 K, 10 GHz), 零电阻温度 $T_{c0}=89\sim 91$  K, 临界电流密度 $J_c=2\sim 3$  mA/cm<sup>2</sup>。