

电特大目标散射的多层快速多极子高性能计算

潘小敏, 盛新庆

(北京理工大学信息与电子学院电磁仿真中心, 北京 100081)

摘要: 针对电特大目标散射的并行多层快速多极子计算中出现的构造几何信息树所需资源过多、保存远场模式所需内存过大及计算雷达散射截面时间长等问题, 根据主流并行计算机架构以及电特大目标的特点, 提出了解决方案, 实现了电特大目标散射的高效精确计算。通过对未知数超过 5 亿、电尺寸达到几千个波长的电特大目标的数值实验, 表明本文方案的精确性和高效性。

关键词: 多层快速多极子; 并行; 高性能; 散射; 雷达散射截面

中图分类号: O 441

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.02

High performance computing on scattering from extremely large targets by MLFMA

PAN Xiao-min, SHENG Xin-qing

(Center for Electromagnetic Simulation, School of Information and Electronics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Difficulties associated with extremely large targets, including construction of the geometry tree in the algorithm, reduction of the number of far-field patterns and fast computation of radar cross section, are pointed out. Based on the architecture of popular parallel platforms, distributed memory parallel systems, and properties of targets with extremely large sizes, relative solutions are proposed. The efficiency of the proposed parallel multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) scheme is validated by successful computations of scattering from targets with over five hundred million unknowns and several thousand wavelengths in size.

Keywords: multilevel fast multipole algorithm (MLFMA); parallel; high performance; scattering; radar cross section (RCS)

0 引言

高频近似方法是预测电特大目标电磁特性的有效手段之一^[1], 但高频近似方法往往只适用于目标散射特性的粗略估计, 要获得电特大目标散射的精确可靠分析则往往需要全波数值方法。全波数值方法中, 多层快速多极子技术是一种精确高效的方法。结合计算机并行技术, 人们先后提出并实现各类并行多层快速多极子算法 (multilevel fast multipole algorithm, MLFMA), 将电磁计算能力由几十个电波长^[2-3]提升到几百个电波长^[4-14]。文献[4-7]中的方案都按盒子分配任务, 所以当计算节点增多时, 并行效率不高。文献[8]首次提出了混合并行方式后, 众多学者纷纷在此基础上优化它^[9-14]。例如, 文献[9, 11]提出了转移矩阵的新处理方式, 文献[12-13]提出了分层型任务分配方式,

文献[14]则采用 FFT 的方式加速运算。然而, 针对电特大目标的高强度数值实验表明, 这些高性能算法依然面临一些问题和困难: 譬如如何高效构造几何信息数、如何减少远场模式及如何快速计算雷达散射截面等。本文目标是多极子的电磁计算能力再次提升, 实现尺寸过千个波长及未知数过亿的电特大电磁散射的精确高效计算。为此在紧扣这些新困难和问题, 结合主流并行计算机架构——分布式内存并行系统的特点^[15], 提出相应解决方案, 实现了计算对未知数超过 5 亿、电尺寸达到几千个波长的电特大目标散射的精确高效计算。

1 多层快速多极子算法

对可用 N 个未知数模拟的目标, 选择 RWG 基函数 ($f_j(r_j)$ ($j=0, 1, \dots, N$)), 使用伽略金匹配, 离散描述目标

收稿日期: 2010-07-09; 修回日期: 2011-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金(10832002, 60901005); 北京理工大学基础研究基金(20090542001); 北京理工大学优秀青年教师持续资助项目(2010YS0502)资助课题

作者简介: 潘小敏(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为电磁计算快速算法、高性能计算与并行技术、电磁兼容。

E-mail: xmpan@bit.edu.cn

电磁特性的联合积分方程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{x} \quad (1)$$

式中, \mathbf{Z} 为 $N \times N$ 阶方阵, 是积分方程的离散系数矩阵; \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 均为 N 维向量, 分别代表未知等效电流和入射场。多极子技术将等效电流间的作用分为近和远相互作用两部分, 即

$$\mathbf{y} = (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{x})|_{\text{Near}} + (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{x})|_{\text{Far}} \quad (2)$$

其中近相互作用直接计算, 远相互作用则根据加法原理, 分为聚集、转移和发散来完成^[2-3]。而多层快速多极子中则还要加入插值和反插值操作^[2-3]。

MLFMA 一般用盒子将未知数分组, 并用多层结构的树将所有非空盒子组织起来。计算远相互作用时, 用远场模式来代替各盒子内的等效电流。并行实现中, 为了获得较高的效率, 一般引入一个过渡层, 对远场模式和转移矩阵采用不同的并行方式:

(1) 对于远场模式: 在过渡层之上(盒子尺寸大的层), 按远场的方向并行处理, 其他层则对盒子并行处理;

(2) 对于转移矩阵: 在按远场模式并行处理的层, 直接存储它们, 其他层则实时计算。

此种方案对于一般尺寸目标非常有效^[3,6-8]。然而随着目标尺寸增大、未知数急剧增长, 上述并行算法会面临一些新问题和困难: 譬如算法中几何信息树的构造、远场模式数目的控制和雷达散射截面的快速计算等。

2 多层快速多极子的高性能新并行方案

为了深入具体研究, 展示本文方案的数值性能, 本文在北京理工大学电磁仿真中心的“刘徽”高性能计算平台上进行高强度的数值实验, 列出算法所需内存和时间。“刘徽”是以 Myrinet 千兆光纤网连接的 32 节点 IBM 服务器集群, 每个节点为 4 GB 内存、3.0 GHz Intel 至强服务器 CPU, 软件平台为 64 位 LINUX 操作系统、MPICH 并行库。数值实验采用的算例是 23 520 000 个未知数模拟的直径为 200 个波长(λ)的金属球。计算使用了 16 个节点; 采用 GMRES 的并行版本作为迭代器; 约定第 0 层为最大盒子所在的层。这个算例对一般并行 MLFMA 来说是个挑战。

2.1 雷达散射截面的高性能计算

大多数应用关心两类雷达散射截面: 一是单站雷达散射截面; 二是双站雷达散射截面。从定义知道, 计算单站雷达散射截面时, 一个入射波方向对应着一个方向的雷达散射截面, 此时由等效电流计算雷达散射截面所需的时间相对于整个求解过程来说非常少, 所以无需特殊处理, 但双站雷达散射截面的计算则不同。一般的, 当目标电尺寸不大时, 计算雷达散射截面消耗的计算资源不多, 其处理也比较容易; 但当目标尺寸达到上千个波长时, 如果不仔细处理, 计算雷达散射截面将消耗很多计算时间。计算时间的快速增长源于两个因素: 一是随着目标尺寸的增加, 要准确刻画目标的双站雷达散射截面, 所需观察角的数目也剧烈增加; 二是由于未知数数目增加, 计算每个方向 RCS 时间增加较快。所以对于电特大目标双站雷达散射截面的计算时间极大影响着并行算法效率, 需要提出新方案克服这一困难。

研究表明采用多层快速多极子中的聚集过程来计算双

站雷达散射截面比直接计算要高效得多^[9]。与直接方法相比, 基于聚集过程的方法需要额外内存保存从第 2 层到第 0 层的插值矩阵系数。如表 1 所示, 对于电特大目标这部分矩阵系数消耗内存很大。要将计算能力提升至上千个波长, 必须妥善处理这部分内存。观察发现, GMRES 迭代器投影向量消耗的内存大于计算雷达散射截面额外所需内存; 而且它们分布存储于各处理器, 与计算雷达散射截面所需矩阵系数使用内存的方式完全匹配。于是循环使用 GMRES 投影向量的内存, 便可解决计算雷达散射截面的内存问题。表 1 比较了两种方法计算雷达散射截面时所需时间和内存。和直接方法相比, 因为保存额外矩阵系数的内存无需真正分配, 所以基于多层快速多极子的方法非常高效。

表 1 计算雷达散射截面消耗的计算资源

	内存/GB	CPU 时间/s
直接方法	—	1 586
基于多层快速多极子的方法	0.9	20

2.2 几何信息树的高效构造

多极子一般用盒子将未知数分组, 并用树结构——几何信息树将所有非空盒子组织起来。几何信息树的构造涉及几何信息的读取和多极子层数的选择。

对于一般尺寸的目标, 几何信息所占内存较小, 处理起来也比较直接。但随着目标尺寸的增加, 几何信息所需内存空间快速增长。例如对于未知数超过 2 亿的目标, 其几何信息所占内存空间达到了 9 GB。为了减少磁盘空间的消耗, 读写存储这些几何文件时应采用二进制文件格式进行操作。这样做有 3 个好处: 一是能大大加快几何信息的读写速度。采用 ASCII 文件格式时, 一次只能读取一个数据, 而使用二进制文件格式后, 可使用一个读/写操作将整个文件读/写完毕, 从而大大节省读写文件的时间。数值实验表明, 对于一个超过 2 GB 的文件, 二进制文件的读写可在几十秒内完成, 而 ASCII 文件则需数个小时。二是方便几何信息的并行读写。文献^[9]指出为了提高效率, 需要并行处理几何信息。将几何信息从硬盘读到内存是并行处理几何信息的第一步。如果采用 ASCII 文件格式保存几何文件, 可以让每个处理器都采用串行的方式读取完整的几何信息文件, 也可以采取主从结构, 让主节点读取完整几何信息, 然后分配到各从节点。显然, 前者效率非常低下。事实上, 后者也存在缺陷。因为电特大目标几何信息所占内存非常大, 这要求主节点配有很大内存空间。但目前主流的并行平台中各节点都是对等的, 各节点配置基本相同, 很难保证主节点比其他节点拥有更多内存空间。相反, 采用二进制文件格式后, 可灵活利用文件指针的特性, 让各个计算节点独立拥有文件指针, 指向自己所需数据, 从而实现几何信息的并行读写。这样既避免了读取完整几何信息所面临的内存瓶颈, 也充分利用了二进制文件读写效率高的特性, 使得几何信息的读取可在当前普通并行平台上高效完成。三是节省硬盘空间。数值实验表明, 使用二进制文件格式保存几何信息所需硬盘空间是 ASCII 文件格式的 1/3 左右。

读取几何信息后, 多极子算法采用树结构将几何信息组织起来。树结构的层数由目标大小决定, 它一般大于 2。

为了方便树结构的建立,往往给每个非空盒子一个莫顿码(Morton Key)^[2,9]。由莫顿码的定义知道,32 位的莫顿码只能表达 10 层树结构,对应的目标尺寸为 100 个电波长左右(具体大小由最小盒子的尺寸决定)。如果目标尺寸继续增大,那么使用 10 层树结构将极大降低算法效率。要高效地计算尺寸达到上千个波长目标的散射,应采用 64 位莫顿码。表 2 列出了采用 32 位莫顿码和 64 位莫顿码时算法效率的差别。

表 2 使用不同莫顿码时算法消耗的计算资源

	32 位	64 位
几何信息树的层数	10	11
内存总计/GB	63.5	41.1
时间总计/s	5 637.2	3 353.0

2.3 远场模式减少技术

多极子算法中远场模式展开的数目决定着远相互作用消耗的计算资源。一般的,随着目标尺寸的增加,远场模式的个数往往增长很快。所以,如何在保证计算精度要求的条件下减少远场模式对于尺寸超过上千个波长的目标来讲非常重要。

多层快速多极子中,远场模式的数目与盒子大小的平方成正比,所以盒子大小 D 决定了远场模式的数目^[2-3]。减少远场模式的关键在于找到 D 的最小值。一般的,多层快速多极子在建立树结构的同时可获取各层盒子的大小 D ,图 1 给出了计算区域为二维时的示意图。但此时基函数(几何剖分中三角形的边)往往没有填满盒子,这样确定的 D 并不是最优的,如图 2 所示。显然如果使用图 2(b)中虚线所示的小盒子,那么 D 的值将会变小,从而可减少远场模式,提高计算效率。

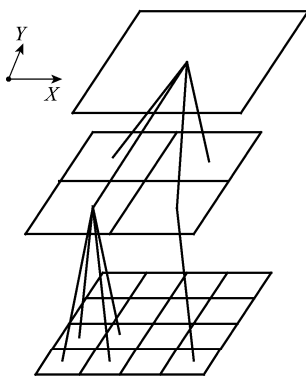


图 1 多极子中建立几何信息树的示意图(二维情况)

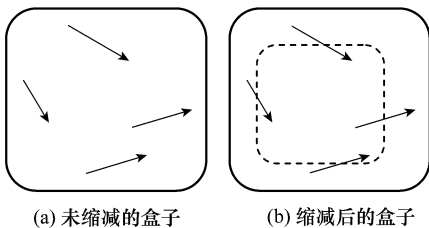


图 2 确定最小盒子尺寸的示意图

为了找出各层 D 的最小值,本文提出下面的方案:(1) 找到每一层中各盒子里所有边的中点坐标的最大值和最小值;(2) 由上面的坐标最大值和最小值计算出每层盒子中相距最远的一对边的距离,称为盒子的“边间距”;(3) 比较各层盒子的“边间距”,得到各层盒子中最大的边间距,这就是各层盒子尺寸的最小值。需指出,这个算法效率高且容易并行。数值试验表明各层盒子的最小尺寸 D 可在很短时间内完成,例如,对于直径达到 200 个波长的金属球只要 6 s。在不影响计算精度的条件下,优化后的 D 可减少远场模式、极大减少多层快速多极子的计算时间和内存需求,如表 3 所示。

表 3 减少远场模式前后计算远相互作用消耗的计算资源

	缩减前	缩减后
内存/GB	31.8	28.0
时间/s	62.5	48.8

3 高性能并行多层快速多极子的计算能力验证

根据上面的讨论,这里实现并优化了多层快速多极子的并行。为了验证和展示并行方案的计算能力,在中国科学院的“深腾 7000”高性能计算平台上,计算了两个特大目标的电磁散射:直径为 1 000 个波长的金属球和尺寸达到 2 144 个波长的舰船模型。计算中使用了“深腾 7000”高性能计算平台中的 128 个计算节点,每个节点配备了至强 3.0 GB CPU 和 32 GB 内存。并行算法中 GMRES 迭代器投影向量参数设为 20,迭代残差设为 0.005。

对于需要 512 778 700 个未知数模拟的直径为 1 000 个波长的金属球。这是目前公开报道用全波数值方法计算的未知数最多的目标。这个算例里多极子把计算区域分成 13 层(从 0~12 层),过渡层是第 5 层。图 3 给出了球的双站雷达散射截面(radar cross section, RCS)结果。雷达散射截面在观察角度较大时变化非常剧烈,很难计算准确。清晰起见,图中只给出这部分计算结果。图中显示计算结果与 MIE 理论值吻合得很好,并行 MLFMA 的精度非常高。

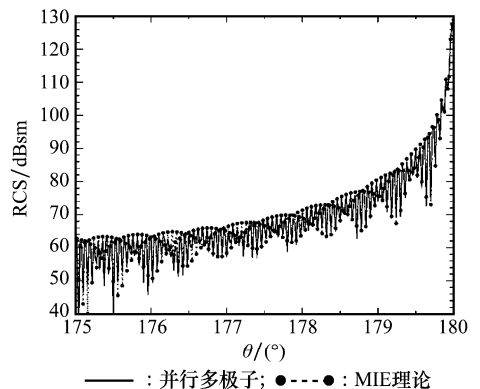


图 3 金属球的散射

为了进一步展示并行算法的计算能力,计算了尺寸达到 2 144 个波长的舰船模型的散射。舰船模型在图 4 中给出。图 5 给出了入射角为(90°,90°)时舰船的双站雷达散射截面。

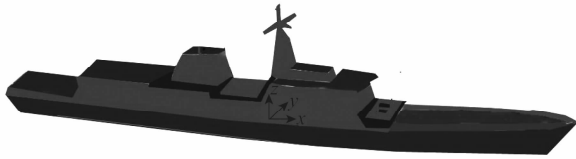


图 4 舰船模型

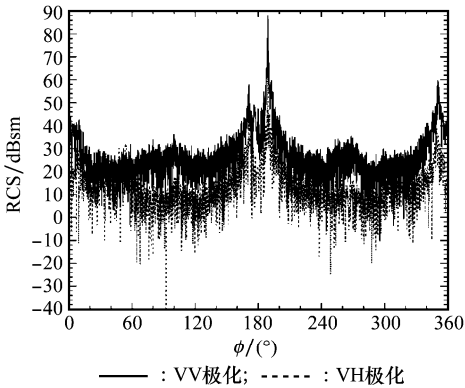


图 5 舰船模型的双站雷达散射截面

表 4 列出上述两个算例所使用的资源。表中数据充分展示了本文并行多层快速多极子的计算效率和计算能力。

表 4 并行多层快速多极子使用的计算资源

	金属球	舰船模型
几何尺寸(λ)	1 000	2 144
未知数个数/百万	512.8	327.1
多层快速多极子使用的层数	13	14
过渡层	5 th	6 th
内存总计/GB	2 500.2	1 928.5
时间总计/min	227	311

4 结 论

指出了目前并行 MLFMA 在计算电特大目标时面临的新问题和困难,包括算法中几何信息数的构造、远场模式过多带来的问题和雷达散射截面的快速计算等。针对分布式内存并行计算机架构以及电特大目标的特点,提出了相应的解决方案,成功实现电特大目标散射的精确高效计算。对两个算例:直径 1 000 个电波长、超过 5 亿 1 千万未知数模拟的金属球,以及尺寸超过 2 000 个电波长、未知数超过 3 亿 2 千万的舰船模型的数值实验充分证实了算法的效率和精度。

参考文献:

[1] 陈勇,董石柱,王超,等. 基于 HPP/PO 的舰船与海面耦合散射快速算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008,30(4):589-592. (Chen Y, Dong C Z, Wang C, et al. Fast algorithm based on

HPP/ PO for calculating coupling EM scattering from ship over sea surface[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008,30(4):589-592.)

[2] Song J M, Lu C C, Chew W C. MLFMA for electromagnetic scattering by large complex objects[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1997,45(10):1488-1493.

[3] Chew W C, Jin J M, Michielssen E, et al. *Fast and efficient algorithms in computational electromagnetics* [M]. Boston, MA: Artech House, 2001:62-103.

[4] Pascal H A. Parallel implementation of the fast multipole method for Maxwell's equations [J]. *International Journal Numerical for Methods in Engineering*, 2003(43):839-864.

[5] 卢光辉,孙世新,聂在平,等. 并行处理技术在电大尺寸复杂目标电磁散射中的应用[J]. 电子学报, 2003,32(6):882-885. (Lu G H, Sun S X, Nie Z P, et al. Application of the parallel processing technology to electromagnetic scattering from electrically large complex objects[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003,32(6):882-885.)

[6] Velampambil S, Chew W C, Song J M. 10 million unknowns: is it that big? [J]. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 2003,45(2):43-58.

[7] Li W D, Hong W, Zhou H X. An IE-ODDM-MLFMA scheme with DILU preconditioner for analysis of electromagnetic scattering from large complex objects[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 2008,56(5):1368-1380.

[8] Velampambil S, Chew W C. Analysis and performance of a distributed memory multilevel fast multipole algorithm[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 2005,53(8):2719-2727.

[9] 潘小敏,盛新庆. 一种多层快速多极子的高效并行方案[J]. 电子学报, 2007,35(3):88-93. (Pan X M, Sheng X Q. A highly efficient parallel approach of multi-level fast multipole algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(3):88-93.)

[10] Gurel L, Ergul O. Fast and accurate solutions of extremely large integral-equation problems discretised with tens of millions of unknowns[J]. *IEE Electronics Letters*, 2007,43(4):499-500.

[11] Pan X M, Sheng X Q. A sophisticated parallel MLFMA for scattering by extremely large targets [J]. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, 2008,50(3):129-138.

[12] Ergül Ö, Gürel L. Hierarchical parallelisation strategy for multi-level fast multipole algorithm in computational electromagnetic[J]. *Electronics Letters*, 2008,44(1):3-5.

[13] Ergül Ö, Gürel L. A hierarchical partitioning strategy for an efficient parallelization of the multilevel fast multipole algorithm[J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 2009,57(6):1740-1750.

[14] Araujo M G, Taboada J M, Obelleiro F, et al. Supercomputer aware approach for the solution of challenging electromagnetic problems[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, 101: 241-256.

[15] Qinn M J. *Parallel programming in C with MPI and openMP*[M]. New York: McGraw Hill, 2004.