文章编号: 2095-4980(2016)06-0910-04

并行核外高阶矩量法分析机载天线受扰特性

左 胜,李艳艳,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:利用核外算法,将计算机硬盘动态的纳入矩量法求解过程打破内存的限制,同时采用并行计算技术加速矩量法的求解过程。通过某飞机的双站雷达散射截面(RCS)计算,验证了核外算法的正确性。最后,将并行核外高阶矩量法用于机载伞形印刷振子天线阵列辐射特性分析,结果表明,该方法可充分利用计算机的硬盘,扩大矩量法可求解问题的规模。

关键词: 高阶矩量法; 核外算法; 硬盘; 机载天线

中图分类号: TN820 文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0910

Analysis of the disturbed characteristics of airborne antenna using the parallel out-of-core higher-order MoM

ZUO Sheng, LI Yanyan, ZHANG Yu

(National Key Laboratory of Antennas and Microwaves Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: The out-of-core algorithm which dynamically adds hard disks to the solving process of moments(MoM) is utilized to break the memory limitation, and the parallel computing technique is adopted to accelerate the solving process of MoM. The computation of aircrafts' bistatic Radar Cross-Section(RCS) verifies the validity of out-of-core algorithm. The parallel out-of-core higher-order MoM is utilized to analyze the radiation characteristics of airborne umbrella printing oscillator antenna array. The results show that the method can extend the scale of the problems that can be solved by using MoM through taking full advantages of computers' hard disks.

Keywords: higher-order MoM; out-of-core algorithm; hard disks; airborne antenna

飞机平台对所安装的各种天线的电磁特性会造成显著影响,如天线增益降低、波束指向漂移、波束宽度变化、 副瓣电平增大等指标恶化^[1],进而影响天线的正常工作。飞机在空中飞行过程中天线所处的电磁环境与地面测试 环境不同,对于这种问题一般采用更为灵活方便的电磁数值计算方法进行分析。矩量法^[2]作为一种经典的数值计 算方法,具有较高理论精确度,但对于复杂、电大尺寸电磁问题,将产生庞大的复数稠密矩阵,由于内存大小的 限制,使得矩阵无法存储在内存中,大大限制了矩量法的应用。一种有效的方法是采用核外算法^[3-4],将矩阵存 储在硬盘上,硬盘的存储容量一般比内存大,且价格低廉,可大大扩展矩量法可求解问题的规模。采用并行核外 高阶矩量法对机载天线系统进行一体化精细仿真,可为大型飞机的天线选型、天线综合布局提供理论依据和参考 数据。

1 并行核外高阶矩量法理论

基函数的选取是矩量法求解电磁场问题中的关键一步,本文采用的基函数是定义在双线性曲面上的高阶基函数^[4]。双线性曲面是由4个空间矢量确定的非平面四边形,可以模拟扁平的和尖的物体表面,高阶基函数是定义 在其上的多项式的组合:

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-12-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA01A308);国家自然科学基金资助项目(61301069,61072019);教育部新世纪优秀 人才支持计划资助项目(NCET-13-0949);陕西省青年科技新星资助项目(2013KJXX-67);中央高校基本科研业务费重点资助项目 (JY10000902002)

式中: *p*,*s* 是局部坐标; *i*,*j* 是基函数的阶数; *a*_{*p*}和*a*_{*s*}是协变单位矢量。高阶基函数通过合理调整多项式的阶数来 表达电、磁流变化,可将矩量法对模型网格边长的要求放松到1个波长左右,高阶基函数产生的未知量约为低阶 基函数的十分之一,可大大降低矩量法的计算量和存储量。

核外算法既可用于矩阵填充,也可用于矩阵 方程求解。在填充矩阵时,每次填充矩阵的一部 分(图 1 中左图所示的一个矩阵分块),并将其写 入硬盘,重复这一过程直到整个矩阵填充完毕。 在矩阵方程求解时,每次读入内存一个矩阵分块 并对其进行 L(下三角矩阵)、U(上三角矩阵)分 解。在分解完成后,将该矩阵分块的 LU 分解结 果写回硬盘,接着再处理下一个矩阵分块,直到 整个矩阵分解完成。

图 1 中右图用来描述 LU分解到第 k 块列时, 前面已分解完成的第 i 块列对其的影响。图中, **T**为块列 i 的前(*i*-1) n_b行(n_b为 LU分解中分块大小),它不参与第 k 块列的更新。**T**₀为接下来的 n_b



Fig.1 The data partitioning in out-of-core algorithm and the effects of block column *i* on block column *k* in out-of-core LU decomposition 图 1 核外矩阵数据划分及核外 LU 分解中块列 *i* 对块列 *k* 的影响

行, T_1 为 T_0 下的 $(k-1-i)n_b$ 行, T_2 为最后的 $M-(k-1)n_b$ 行。块列 k 中与之对应的部分分别为 C, C_0, C_1 和 C_2 。具体 计算式如下:

$$\boldsymbol{C}_{0} \leftarrow \left(\operatorname{tril}\boldsymbol{T}_{0}\right)^{-1}\boldsymbol{C}_{0}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{1} \\ \boldsymbol{C}_{2} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{1} \\ \boldsymbol{C}_{2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_{1} \\ \boldsymbol{T}_{2} \end{bmatrix} \boldsymbol{C}_{0}$$

$$(2)$$

$$(3)$$

式(2)中 tril 符号表示取矩阵的下三角部分,且将其对角线元素全替换为 1。式(3)中的 C_0 是式(2)更新后的。值得 注意的是,在 LU 分解中根据不同的数据存取方式,常用的分块 LU 分解形式有 2 种: Right-looking 算法和 Left-looking 算法^[4-5],本文采用 I/O 总量较少的 Left-looking 算法。同时为了提高性能以及平衡负载,本文采用 基于可扩展线性代数包(Scalable Linear Algebra PACKage, ScaLAPACK)的块循环矩阵分布方式^[6-7]。核外算法对 硬盘容量的需求与核内算法对内存容量的需求是一样的,均为(16× N^2)/1 024³ GB, N 为未知量数目。

2 数值算例

2.1 计算平台简介

本文所用计算平台包含 42 个计算节点的高性能计算集群。每个节点配置 2 颗 Intel Xeon E5-2692v2 2.2 GHz 12 核的 CPU, 64 GB 内存, 2 块 900 GB 10K rpm SAS 硬盘。节点间使用 Mellanox FDR 56 Gb/s InfiniBand 进行 互联。

2.2 某飞机双站 RCS 计算

分别采用核内算法和核外算法分析某飞机的散射特性,飞机模型尺寸为 11.6 m×7.0 m×2.93 m,如图 2 所示。 平面波沿-x 轴入射,频率为 2.0 GHz,模型的未知量为 115 934,所需内存约为 200 GB。采用计算平台中的 8 个 计算节点进行计算。采用核外求解,矩阵填充时间为 157.2 s,矩阵方程求解时间为 1 542.1 s。采用核内求解, 矩阵填充时间为 116.4 s,矩阵方程求解时间为 1 399.9 s。对比可见,虽然在核外求解过程中内存需要从硬盘读 取以及向硬盘写入矩阵元素,但核外求解效率相比核内求解并没有降低太多,一般在 5%~10%左右^[8]。图 2 中给 出了飞机 *xoy* 面的双站 RCS,可以看到采用核外与核内 2 种方法计算结果完全吻合,所以核外算法并不会造成矩 量法计算精确度的损失。



Fig.2 The model of airplane and its bistatic RCS results 图 2 飞机模型及其双站 RCS 结果

2.3 机载天线受扰分析

此处采用并行核外高阶矩量法对机载伞形印刷振子天线阵列进行仿真,分析飞机平台对天线阵列辐射特性的影响。阵列的工作频率为 900 MHz,介质基板的相对介电常数为 2.65,阵列单元数为 30×10。

将天线阵列架设到飞机平台上,飞机平台长 36.41 m, 翼展 38 m,高 10.48 m,两翼平行于 xoy 面,阵列中 心距机背 4.94 m。这里主要分析阵列主波束指向尾翼时,飞机平台对阵列辐射特性的影响。图 3 给出了机载天线 阵列模型。



Fig.3 The model of airborne array 图 3 机载天线阵列模型

高阶矩量法产生的未知量为 673 271,用核内算法需要提供大约 7 TB 内存,计算平台可提供内存为 2.625 TB, 因此无法采用核内算法进行计算。此处采用核外算法进行计算,计算资源:42 个计算节点,1 008 个 CPU 核, 硬盘容量 36.9 TB(远大于存储需求),可见核外算法打破了内存对矩量法的限制,只需硬盘容量满足存储需求即 可。核外求解矩阵填充时间 1 087 s,矩阵方程求解时间 35 668 s。图 4 为天线阵列受扰前后的 3-D 增益方向图, 图 5 为天线阵列受扰前后的 2-D 增益方向图对比结果。由图 4 可见,阵列受扰后的增益最大值相对于受扰前降低 0.877 dB。由图 5 中的对比可以看出,阵列受扰后的增益方向图在水平面和俯仰面的变化都比较大,在水平面内 除主瓣和后瓣的增益值变化不大外,其他大部分角度的增益值都有所变大,尤其主瓣两旁的副瓣增益大幅度提高, 这主要是由于飞机机身和尾翼的反射效应;在俯仰面内的(-150°, -40°)角度范围内的副瓣增益值大幅度降低,这 主要是由于飞机尾翼和机身的遮挡效应。



Fig.4 3-D gain pattern of antenna array and airborne antenna array 图 4 天线阵列和机载天线阵列 3-D 增益方向图



Fig.5 2-D gain pattern of antenna array and airborne antenna array 图 5 天线阵列和机载天线阵列 2-D 增益方向图

3 结论

本文采用并行核外高阶矩量法计算某飞机的散射特性,并与核内算法进行了对比,可以看到,2种算法结果 完全一致,因此核外算法并不会造成矩量法精确度的损失。机载天线的受扰分析有着巨大的工程指导意义,由于 飞机一般为电大尺寸,对于核内算法,计算机无法提供足够的内存,采用并行核外高阶矩量法进行分析,突破了 内存的限制,使矩量法实现电大、复杂电磁系统的高效、精确仿真成为可能。

参考文献:

- LIN Z,ZHANG Y,JIANG S, et al. Simulation of airborne antenna array layout problems using parallel higher-order MoM[J]. International Journal of Antennas & Propagation, 2014(3):1-11.
- [2] HARRINGTON R. Field Computation by Moment Methods[M]. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [3] D'AZEVEDO E,DONGARRA J. The design and implementation of the parallel out-of-core ScaLAPACK LU,QR and Cholesky factorization routines[J]. Concurrency Practice & Experience, 2000,12(15):1481-1493.
- [4] ZHANG Y,SARKAR T K. Parallel Solution of Integral Equation-Based EM Problems in the Frequency Domain[M]. Hoboken, NJ:Wiley-IEEE Press, 2009.
- [5] ZHANG Y, Van d G R A, TAYLOR M C, et al. Parallel MoM using higher-order basis functions and PLAPACK in-core and out-of-core solvers for challenging EM simulations[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2009,51(5):42-60.
- [6] 张玉. 电磁场并行计算[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006. (ZHANG Yu. Parallel Computing in Electromagnetics[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2006.)
- [7] ZHANG Y,LIN Z,ZHAO X, et al. Performance of a massively parallel higher-order method of moments code using thousands of CPUs and its applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014,62(12):6317-6324.
- [8] ZHANG Y,ZUO S,ZHAO X. Performance comparison of parallel out-of-core MoM using SSD and SAS hard drives[C]// 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation(APCAP),2015. Piscataway,NJ:IEEE, 2015:628-629.

作者简介:



左 胜(1992-),男,广东省深圳市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为高阶矢量有限 元.email:zuosheng0503@163.com. 李艳艳(1989-), 女, 山西省吕梁市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为低阶、高阶矩量法 区域分解.

张 玉(1978-),男,安徽省淮北市人,博士, 教授,主要研究方向为高性能电磁精细计算理论 研究与软件研发等.