

• 博士论文 •

文章编号: 1000-3428(2011)03-0001-03

文献标识码: A

中图分类号: N945

机载天线辐射特性并行计算与绘制技术

于荣欢, 瞿师, 宋汉辰, 吴玲达

(国防科学技术大学信息系统工程重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 计算量过大是机载天线辐射特性分析的瓶颈问题, 为此, 提出一种基于等三角剖分的并行 UTD 计算与绘制算法, 算法采用基于空间八叉树分割的模型框架半自动提取方法进行模型简化。给出一种全方位等三角剖分负载平衡方案, 并采用 sort-last 并行图形绘制框架和 Binary-swap 图像合成算法进行并行绘制, 将该算法在计算机集群上进行实现。实验结果表明, 该算法能够有效节约计算时间, 提高绘制效率, 较好地满足了大型复杂飞行器机载天线的方向图特性分析需求。

关键词: 并行计算; 一致性几何绕射理论; 并行绘制; 空间八叉树

Parallel Computing and Rendering Technology for Airborne Antenna Radiation Character

YU Rong-huan, QU Shi, SONG Han-cheng, WU Ling-da

(Key Lab of Information Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

【Abstract】 Too much computation is the bottleneck in analysis of airborne antenna radiation. A parallel computing and rendering method is proposed to solve this problem. It proposes a semi-automatic algorithm to distill model's skeleton based on space octree dividing and a equal triangles dividing method to solve the load balancing problem. It adopts sort-last parallel rendering framework and Binary-swap image composition method to solve parallel rendering problem. The algorithm is implemented in PC cluster system. Experimental results show this algorithm can drastically reduce the computing time and improve the rendering effect. It is benefit to apply this method in analysis of airborne antenna radiation.

【Key words】 parallel computing; Uniform geometrical Theory of Diffraction(UTD); parallel rendering; space octree

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.03.001

1 概述

在复杂战场电磁环境中, 机载天线所处位置高, 覆盖范围广, 其辐射特性的研究成为战场电磁环境分析的重要一环。机载天线的辐射特性分析主要是对其天线方向图的分析。

对于天线方向图的计算, 传统的几何绕射理论(GTD)^[1]是在几何光学的基础上系统地引入绕射射线的概念而形成的, 它按几何光学把物体分为亮区与阴影区, 但在阴影边界两侧的过渡区中失效, 从这个意义上说, 它的绕射系数是非一致的。文献[2]导出了适用于过渡区的关于边缘绕射和光滑凸曲面绕射的一致性绕射系数, 将几何绕射理论发展成为了一致性几何绕射理论(UTD)。

在 UTD 方法中, 复杂的射线寻迹问题一般不能用解析方法严格求解, 只能用数值计算方法求解。对于机载天线来说, 即使采用简化的飞机模型, 且仅考虑二次射线的寻迹, 其高频辐射的计算量也是巨大的。通常为了表现天线方向图的更多细节, 需要增加采样点的密度, 系统绘制的负担必然进一步增加。因此, 为了提高计算效率和实现绘制的实时性, 必须采用并行计算与并行绘制相结合的技术。

2 并行 UTD 算法

2.1 UTD 算法

已知天线源点位置后, UTD 算法在源点周围进行全方位场点采样, 对于每一个采样点在飞机各个组合部件上寻求可能的绕射点和反射点(包含多次绕射、反射点), 进而求解存在的直射场、反射场和绕射场, 最后把各种场量合并为总的场量, 所以, 可以考虑采用并行计算的方式把采样场分成若干个区域利用多处理器求解, 然后进行汇总, 得到整个全方位天线方向图。场量求解时, 定义飞机天线直角坐标系作为矢量及并矢运算的参考坐标系, 无论何种分量的射线场最终都归结到直角坐标系中进行叠加求和^[3]。即:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \gamma_i \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \\ E'_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, N 为从源点到场点的所有射线场的数目; γ_i 为遮挡判断因子(如该射线存在则 $\gamma_i=1$, 否则为 0); E' 为各种射线场的场值。

2.2 三维模型简化

在机载天线的 UTD 计算中, 飞机三维模型的简化是算法的基础与前提条件, 复杂的三维模型对于 UTD 的计算量来说是灾难性的, 因此在 UTD 计算前必须首先对模型进行简化。

传统的机载天线 UTD 计算中都是采用人机交互的方式对模型进行简化, 利用一些简单的圆柱、圆锥和多面体的组合来表示飞机^[3]。这种方法得到的飞机模型一般与实际模型相差较大, 难以保证计算的精度。为提高计算的精度, 同时也为了减少人机交互的工作量, 本文提出一种基于空间八叉树分割的模型框架半自动提取算法。算法流程如图 1 所示。

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2009AA01Z335)

作者简介: 于荣欢(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: 虚拟现实;

瞿师, 博士研究生; 宋汉辰, 副教授; 吴玲达, 教授

收稿日期: 2010-06-20 **E-mail:** yrh1983@163.com

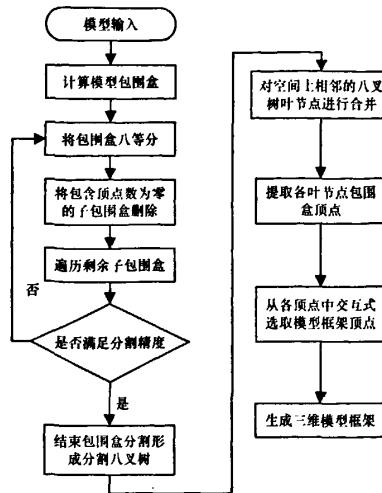


图1 基于空间八叉树分割的模型框架半自动提取算法

基于上述算法，随着迭代次数的增加，模型包围盒中的空白区域逐渐被剔除掉，三维模型框架结构逐渐显露出来。如图2所示，图2(a)为飞机原始三维模型，图2(b)中小框为包围盒八叉树分割后的叶子节点，图2(c)中线条为最终的模型框架图；在整个过程中，只需要很少的人机交互即可获得的模型框架，既保持了原模型的基本形状，又降低了模型的复杂度，能够很好地满足机载天线UTD计算的要求。

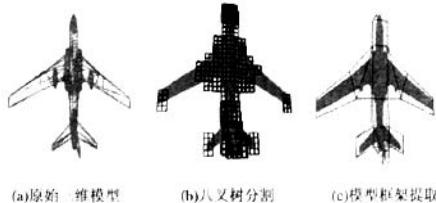


图2 飞机模型的框架提取

2.3 基于等三角剖分的负载平衡算法

在并行计算中，负载平衡(Load Balancing)是影响并行计算性能的关键因素，传统的并行UTD算法^[4]，一般按方位角分配计算区域，每个处理器计算的方位角范围可按如下公式计算：

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{begin}} &= 1 + \text{processorID} \cdot \Delta\varphi \\ \varphi_{\text{end}} &= \varphi_{\text{begin}} + \Delta\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

由于飞机模型的复杂度在方位上变化剧烈，因此这种剖分方式很难保证各处理器的负载平衡；同时在同一方位上按角度进行均匀采样，会导致在高纬区域采样密集，低纬区域采样稀疏，产生计算冗余问题；因此，为了解决这些问题，同时为了有利于天线方向图的多分辨率显示，本文对计算区域采取等三角分层剖分的方式，如图3所示。

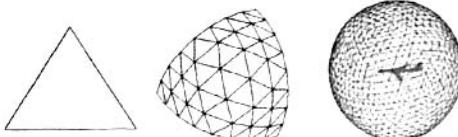


图3 飞机全方位等三角分层剖分

等三角分层剖分利用等边三角形对飞机全方位进行剖分，每一层等边三角形均由上一层三角形四等分而来，由于

等三角剖分中每个三角形的面积均是相等的，可以保证其在任何方位上采样点都是均匀的；同时由于在等三角剖分过程中，采用的是四叉树分割的方式，因此可以采用如图4所示策略对处理器进行任务分配。

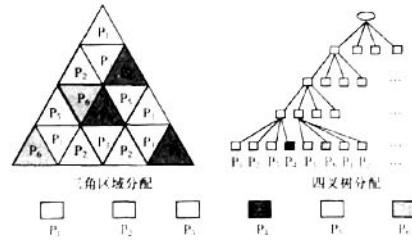


图4 多处理器任务分配

图4是6个处理器任务分配的情况，其中，同一个种颜色的区域分配给相同的处理器，从前面所述内容可以看到，剖分区域的任务分配其实就是将剖分四叉树的叶子节点按照先序遍历的方式依次循环地分配给各处理器，这样就可以保证无论飞机模型的复杂度分布如何变化，都可以使各处理器尽量达到负载平衡；当然区域剖分越细，负载平衡越好，但同时也增加了任务分配的计算量和网络的通信量，因此，在等三角分层剖分的那个层次进行任务分配必须根据处理器的处理能力和处理器的个数等因素综合决定。

考虑到成本因素，本文以计算机集群(cluster)为并行计算平台，集群包括一个控制节点和多个计算绘制子节点，各节点间利用高速(千兆)局域网进行连接；其中控制节点负责区域的划分、任务的分配和最终图像的合成，计算绘制节点负责分配区域的天线方向图计算、网格的绘制和子图像的合成。

3 并行绘制

在机载天线辐射特性的仿真过程中，有时需要增加采样密度以了解天线方向图中更细节的内容，当等三角剖分达到第9层时，其三角面片数将达到2 097 152个，如果采用单一PC机进行绘制，很难保证绘制的实时性。为了提高系统的绘制能力，同时也为了更好地利用集群系统的并行性能，本文采用并行绘制机制对其天线方向图进行绘制。

3.1 sort-last 并行图形绘制框架

文献[5]根据并行图形绘制任务划分的阶段与典型图形流水线的关系，按照场景数据归属判断(Sorting)的时机，将并行图形绘制系统划分为sort-first、sort-middle 和 sort-last 3种，其中，sort-first 并行图形绘制系统是在几何处理器(G)之前按屏幕划分进行场景数据的归属判断，sort-middle 系统在几何处理器之后，光栅化处理器(R)之前进行，sort-last 系统在光栅化处理器之后进行。由于在并行计算过程中已经将计算区域按等三角形剖分进行了任务分配，因此本文采用sort-last 并行绘制机制。其并行绘制过程如图5所示。

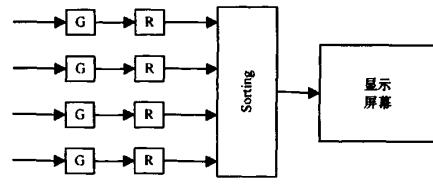


图5 sort-last 并行绘制机制

在sort-last并行图形绘制系统中，直接分配几何图元到绘制单元，本文中计算单元与绘制单元合并在同一PC机上，几何图元由计算单元直接计算得到；每个绘制单元负责整个

显示屏幕大小图像的绘制, 然后再根据它们的深度信息进行全屏幕深度合成得到最终显示图像。

3.2 Binary-swap 图像合成算法

sort-last 方式的特点是简明, 图元的不均匀分布不会引起负载不平衡, 仅图元的复杂程度差异会影响负载平衡, 但它最大的问题是图像合成步骤计算复杂, 大量的数据在图像合成节点拥堵, 造成了系统的瓶颈。为了解决这一问题, 本文采用 Binary-swap 图像合成算法, 如图 6 所示。

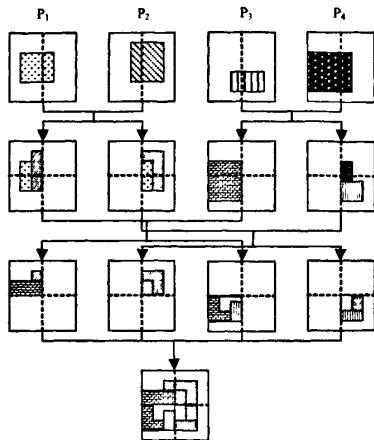


图 6 Binary-swap 图像合成算法

上图以 4 台集群 PC 为例说明 Binary-swap 方法, 假设绘制顺序自左向右分别为 P1,P2,P3,P4。首先节点 P1 和 P2 配对, P3 和 P4 配对。配对的节点将各自的图像分成左右两半, 每个节点将其中一半图像发送给对方, 自己接受到对方的半个图像后进行合成。然后是 P1 和 P3 水平剖分配对以及 P2 和 P4 水平剖分配对, 用类似的方法合成图像。最后将 4 台机子的图像传送到控制节点, 得到最终的结果。对于具有 N 个集群节点的系统, 原理相同, 运行 $[lbN]$ 次, 最后将生成的 2^{lbN} 块子图像进行合成。Binary-swap 方法使得各节点能够最大程度的加入到图像合成步骤里来, 提高了并行效率, 分散了通信流量, 能够有效地提高系统的整体性能。

3.3 算法步骤

本文算法具体实现步骤如下:

- (1) 控制节点进行飞机模型简化。
- (2) 控制节点进行飞机全方位等三角分层剖分和集群任务分配。
- (3) 控制节点将各任务区域、飞机简化模型和视点参数传至各计算绘制子节点当中。
- (4) 各子节点计算其分配区域采样点的场值。
- (5) 各子节点绘制其分配区域图元。
- (6) 集群利用 Binary-swap 方法合成图像。
- (7) 将最终图像传入控制节点中合成输出。
- (8) 控制节点将当前视点参数分别传送各子节点。
- (9) 转入步骤(5), 进入下一帧绘制。

4 实验验证

飞机模型如图 7(a)所示, 直角坐标系原点位于模型包围盒正中心, x 轴朝向机头, y 轴朝向左翼, z 轴朝向背部; 单级天线位于飞机机头顶部, 坐标为 $(1,0,-0.026)$, 如图 7(a)中

小框所示, 天线工作频率 3.0 GHz。全方位等三角分层剖分分割到第 9 层, 并在第 3 层进行处理器任务分配, 则其全方位立体方向如图 7(b)~图 7(d)所示, 其中, 图 7(b)为等三角剖分中第 4 层的全方位天图, 图 7(c)为第 5 层, 图 7(d)为第 9 层时某一区域的天线方向图网格。

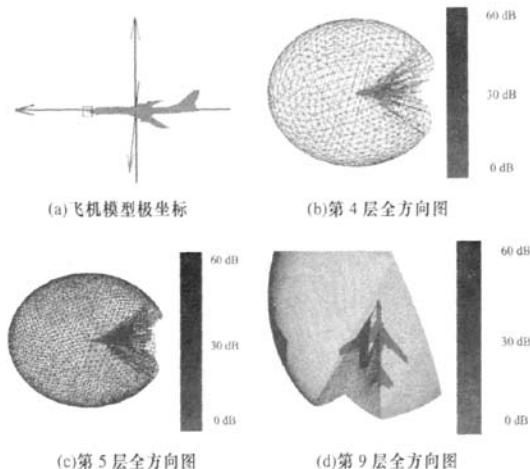


图 7 机载天线全方位方向图多分辨率显示

表 1 给出了本例中剖分到第 6 层时并行计算与串行计算用时的对比情况, 即从启动系统到绘制出天线方向图之间所用时间的对比, 从表中可以看到通过利用高性能的(cluster)集群, 全方位天线方向图的计算时间大大缩减, 4 个 PC 节点获得了 3.81 这样较好的加速比。

表 1 并行 UTD 与串行 UTD 算法用时比较

名称	节点数	计算时间/ μ s	区域剖分时间/ μ s	数据传输时间/ μ s	总时间/ μ s	加速比
并行 UTD	4	326	1	0.1	327.1	3.81
串行 UTD	1	1187	0	0	1247	

5 结束语

本文针对机载天线辐射特性的计算复杂性, 提出一个基于等三角剖分的机载天线并行 UTD 计算与绘制算法, 算法在 4 台 PC 机组成的计算机集群系统(cluster)中进行实现, 结果表明, 该算法不仅能够大大提高机载天线辐射特性的计算效率, 并且在高采样率下也能够很好地满足系统绘制的实时性要求。

参考文献

- [1] Keller J B. Geometrical Theory of Diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(2): 116-132.
- [2] Kouyoumjian R G, Pathak P H. A Uniform Geometrical Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(11): 1448-1461.
- [3] 陈晨, 张凯. 分布计算在机载天线辐射特性仿真分析中的应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 24(19): 5821-5823.
- [4] 张玉, 梁昌洪. 并行 UTD 算法及在机载天线分析中的应用[J]. 电子学报, 2003, 31(3): 332-334.
- [5] 韩伟杰, 李晓梅, 张文. 并行图形绘制技术综述[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 221-223.

编辑 陈文

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>