

平面波谱-表面积分法的快速算法

张春波^{1,2}, 郭东明^{*1}, 盛贤君³, 柳敏静¹, 孙玉文¹, 雷明凯⁴

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074;
3. 大连理工大学 电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024;
4. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对平面波谱-表面积分法计算效率严重依赖于天线口径的问题, 提出谱域积分预设方案, 提取出谱域积分插值点, 建立天线口径平面波角谱密度函数数据库, 避免了大量重复计算, 并将平面波谱理论的近场计算由四重积分弱化为二重积分。然后, 根据平面波谱-表面积分法关于带罩天线远场电性能计算的思想, 提出了基于等效源区域分解的并行平面波谱-表面积分算法。开发并在集群系统中实测了基于 MPI 环境的并行程序, 作为应用计算了弹载天线-罩系统远场方向图, 结果表明该程序高效准确。

关键词: 平面波谱-表面积分法; 天线罩; 集群系统; MPI; 并行策略

中图分类号: TP393; TN820.81 **文献标志码:** A

0 引言

平面波谱-表面积分(PWS-SI, plane wave spectrum-surface integration)法是一种精确预测电小尺寸三维天线-罩系统电性能的方法。PWS-SI法具有与口径积分-表面积分(AI-SI, aperture integration-surface integration)法相同的计算精确度; 在模拟圆口径和分布天线时, 具有与射线跟踪(RT, ray tracing)法相近的计算效率; 同时具有精细处理罩壁影响的灵活性^[1,2], 已被成功应用^[3,4]。该法还衍生出一些类似的方法, 如柱面波谱-表面积分法^[5]、波谱射线-表面积分法^[6]。PWS-SI法是一种较为先进的带罩天线远场电性能数值仿真方法。然而, PWS-SI法计算效率严重依赖于天线口径, 仅对圆口径均匀分布天线具有较高计算效率, 对于其他的口径分布形式, 平面波角谱密度函数和谱域积分计算失去了简化条件, 天线近场的计算是在谱域和天线口径上的四重积分, 使计算效率大大降低, 甚至无法完成实用计算, 是其推广应用的一大障碍。为此, 本文提出建立天线口径平面波角谱密度函数数据库, 使多个

近场点的计算仅需执行一次在天线口径上的积分, 将近场计算由四重积分弱化为在谱域上的二重积分。

此外, 在实际工程中为求解带罩天线远场辐射特性, 往往需要将天线罩进行网格剖分, 计算大量近场点的电磁特性, 而每个近场点的电磁场有6个复数分量, 且每个分量都是谱域上的二重积分, 其计算量仍然相当巨大, 采用单台计算机往往难以满足实际工程要求。解决这一问题的最有效方法之一是采用并行算法。近年来, 运用集群系统进行高性能计算成为计算电磁学研究的热点问题之一^[7,8]。本文亦基于集群系统提出 MPI (message passing interface) 环境下的 PWS-SI 法并行策略。最终, 采用角谱密度函数数据库结合基于 MPI 的并行算法方案, 计算弹载天线-罩系统远场辐射特性。

1 平面波角谱密度函数数据库的建立

根据平面波谱理论, 天线近场点 $r(x, y, z)$ 的人射场矢量表达式^[9]:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{A}(\mathbf{k}_0) \exp(-j\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{k}_0 \\ \mathbf{H}_i(\mathbf{r}) = -\frac{1}{j\omega_0\mu_0} \nabla \times \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) \end{cases} \quad (1)$$

$\mathbf{k}_0$ 是自由空间矢量波数. 在笛卡尔坐标系中, $\mathbf{k}_0$ 的 3 个分量只有 2 个是独立的, 取 k_x, k_y 为 2 个独立分量, 所以式(1) 是在谱域 (k_x, k_y) 上的二重积分. $\mathbf{A}(\mathbf{k}_0)$ 为平面波角谱密度函数, 是天线口径面上的二重积分, 表达式如下:

$$\mathbf{A}(\mathbf{k}_0) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \mathbf{E}_t(\xi, \eta) \exp(j(k_x\xi + k_y\eta)) d\xi d\eta \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_t(\xi, \eta)$ 为天线口径电场矢量切向分量; S 为天线口径区域. 由此可见, 对于一般天线口径分布, 近场点电磁场通常是关于谱域 (k_x, k_y) 和天线口径 (ξ, η) 的四重积分. 对于近场点电磁场式(1) 的计算不论是采用 Simpson、Gauss 还是 Ludwig 积分法, 都需要计算积分区域(谱域 $\mathbf{k}_0$) 中采样点处的电磁场; 而从式(2) 中可以看出, $\mathbf{A}(\mathbf{k}_0)$ 虽与谱域采样点相关但与近场点 $\mathbf{r}(x, y, z)$ 位置无关, 这为式(2) 单独计算提供了可能. 本文以 Simpson 积分法为例, 首先预设式(1) 中谱域积分插值点 (k_{xi}, k_{yj}) , 将其存储在一个数据库中, 然后利用该数据库计算式(2), 将计算结果存储在另一个数据库中, 从而建立了天线口径平面波角谱密度函数数据库. 在电小尺寸天线-罩系统远场电性能仿真中需要计算数千乃至更多近场点的电磁场, 对于电大尺寸天线-罩系统的计算量则更大. 采用建立数据库方法可以使大量近场点的计算仅需执行一次在天线口径上的二重积分, 避免了大量重复计算, 近场计算由谱域和天线口径上的四重积分弱化为仅是谱域上的二重积分, 可以大幅度提高平面波谱理论的计算效率, 使针对任意天线口径分布的计算成为可能.

2 并行算法设计

PWS-SI 法关于带罩天线远场辐射特性的分析是根据 Huygens 原理将天线罩所在曲面作为等效源, 首先计算天线罩内表面电磁场, 然后计算罩壁外表面的切向电磁场, 最后沿天线罩外表面对外表面切向场做曲面积分, 从而获得远场辐射特性. PWS-SI 法非常适合于 SIMD(单指令多数据) 的并行处理. 天线罩上每个区域完全独立于其他区域, 因此最简单也是最直观的并行算法就是

根据天线罩区域来划分工作任务, 使每个 CPU 节点独立计算它所对应的区域的电磁特性, 最后进行汇总, 得到整个天线罩的远场辐射特性. 基于这种思想, 将并行算法应用到 PWS-SI 法中, 提出了基于等效源区域分解的并行 PWS-SI 算法(简称 PPWS-SI 算法), 其等效源划分和处理该区域的 CPU 划分如图 1 所示. 因为计算量和每个分解区域的面积成正比, 而这种沿天线罩对称轴方向进行的带状区域划分方式, 能够方便自如地控制每个分解区域面积的大小, 所以很容易地解决了各个计算节点 CPU 上的计算任务平衡问题.

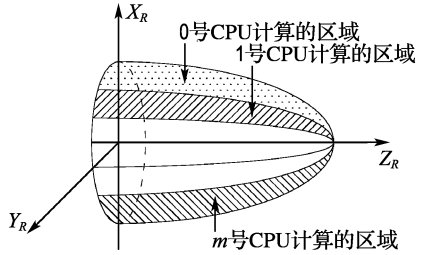


图 1 并行 PWS-SI 算法区域分解示意图
Fig. 1 The domain decomposition schematic for PPWS-SI

使用 PPWS-SI 算法分析带罩天线远场辐射特性, 概括起来有以下步骤:

(1) 初始化

(a) 变量声明及数据类型定义; (b) MPI 初始化; (c) 主进程从输入文件读入计算模型参数.

(2) 主进程进行前处理

(a) 对天线罩进行网格剖分, 在每个剖分单元上选取采样点, 储存采样点坐标; (b) 计算每个采样点处的法线、副法线单位矢量和切向单位矢量; (c) 对天线罩进行区域分解, 按分解区域对采样点进行分组.

(3) 任务分配

主进程将采样点计算任务按组分配给其他进程, 并向其他进程传递信息, 包括采样点坐标, 法线、副法线单位矢量, 切向单位矢量及该点对应的几何厚度, 介电常数, 介质损耗角正切值等.

(4) 中间计算

(a) 每个进程完成天线口径平面波角谱密度函数数据库的计算; (b) 计算相关采样点的近场和透过场.

(5) 后处理

(a) 主进程汇总其余进程计算的透过场信息; (b) 主进程计算远场方向图; (c) 主进程将远场信

息写入数据文件,存储远场计算结果.

(6)结束 MPI,释放 MPI 并行资源.

(7)程序终止.

3 实例检验

为了验证本文提出的快速算法的有效性,以弹载天线-罩系统为研究对象进行实例仿真.算例中,天线罩外形为正切卵形,长细比为 2 : 1,天线为圆口径水平极化天线,算例分别为差口径加权分布及和口径加权分布.这两个算例都不满足 PWS-SI 法的简化条件,近场计算为天线口径和谱域上的四重积分.

首先,对建立天线口径平面波角谱密度函数数据库方法进行验证.天线俯仰角和方位角均为 0 度时,差口径加权分布及和口径加权分布的带罩天线远场 H 面方向图分别如图 2 及图 3 所示.

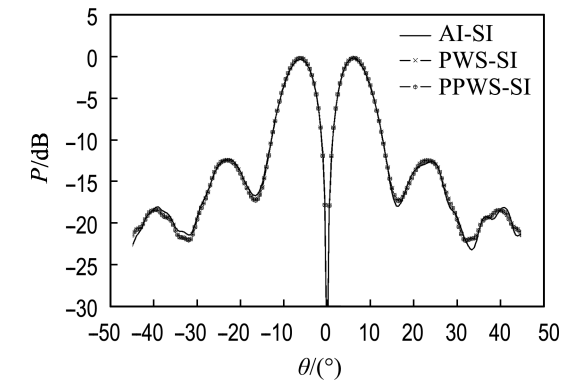


图 2 差口径加权分布带罩天线远场 H 面方向图
Fig. 2 The far-fields pattern of radome-enclosed difference aperture distribution antenna in H-plane

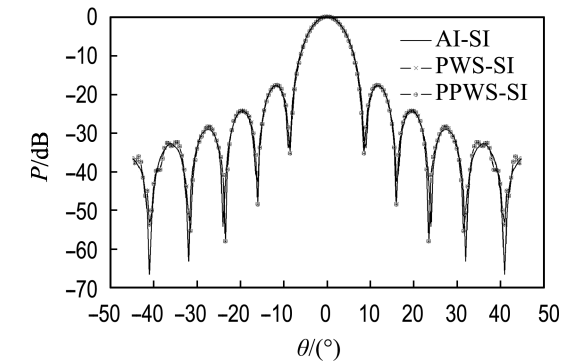


图 3 和口径加权分布带罩天线远场 H 面方向图
Fig. 3 The far-fields pattern of radome-enclosed sum aperture distribution antenna in H-plane

得到的曲线具有很好的一致性.这证明了基于天线口径平面波角谱密度函数数据库的 PWS-SI 法的正确性.

然后,对本文提出的 PPWS-SI 算法进行验证,并行程序采取 SPMD (single program multiple date)模式在 MPI 并行编程平台上实现, MPI 系统用于处理进程间的通信,采用的通信方式为标准模式阻塞通信 MPI_SEND 与 MPI_RECV^[10].采用 PPWS-SI 算法,计算天线俯仰角和方位角均为 0 度时差口径加权分布及和口径加权分布带罩天线远场 H 面方向图,结果分别见图 2、3.从图中可以看出,并行与串行 PWS-SI 算法的计算结果曲线完全一致,表明了本文设计的 PPWS-SI 算法的正确性.表 1、2 列出了 2 个算例中并行算法与串行算法需要消耗的计算时间.基于等效源区域分解的 PPWS-SI 算法仅是在计算任务非常少的初始化和前、后处理计算阶段无法完成并行计算,而在存在大量计算任务的中间计算过程实现了并行化计算.从表 1、2 中可以看出,随着计算进程的增加,计算时间迅速减少,说明并行计算技术可以非常有效地节约计算时间.可以预见,随着参与计算的 CPU 的增多,节省的计算时间比例将继续上升.

表 1 差口径加权分布天线的并行与串行算法用时比较

算法名称	进程数	计算时间/s	节约时间比例/%
PWS-SI	1	2 019	0
PPWS-SI	2	1 017	49.6
PPWS-SI	3	685	66.0
PPWS-SI	4	519	74.3

表 2 和口径加权分布天线的并行与串行算法用时比较

算法名称	进程数	计算时间/s	节约时间比例/%
PWS-SI	1	1 013	0
PPWS-SI	2	510	49.7
PPWS-SI	3	342	66.2
PPWS-SI	4	259	74.4

4 结 论

针对 PWS-SI 法无法分析一般口径天线-罩

从图 2、3 中可以看出, AI-SI 法和 PWS-SI 法

系统电性能问题,首先建立天线口径平面波角谱密度函数数据库,将平面波谱理论的近场计算由四重积分弱化为二重积分;然后,提出了基于MPI环境的并行PWS-SI算法.以差口径加权分布及和口径加权分布弹载天线-罩系统为仿真实例,对远场方向图进行了计算,计算结果证明了本文所提方法的高效性和准确性.这种角谱密度函数数据库结合基于MPI的并行算法的数值仿真方案,极大地缩短了PWS-SI的计算时间,提高了计算效率,为PWS-SI的推广应用奠定了基础.

参考文献:

- [1] WU D C F, RUDDUCK R C. Plane wave spectrum-surface integration technique for radome analysis [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1974, **22**(3):497-500
- [2] CRONE G A E, RUDGE A W, TYLOR G N. Design and performance of airborne radomes:a review [J]. *IEE Proceedings, Part F. Communications, Radar Signal Process*, 1981, **128**(7):451-464
- [3] GUO D M, LIU M J, KANG R K. A practical method for improving the pointing accuracy of the antenna-radome system [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, **257-258**:183-188
- [4] GUO D M, LIU M J, KANG R K, *et al.* Determination of the grinding area and allowance in the radome grinding [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, **259-260**:174-179
- [5] CHANG J H, CHAN K K. Analysis of a two-dimensional radome of arbitrarily curved surface [J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1990, **38**(10):1565-1568
- [6] 万国宾,汪文秉,侯新宇,等.面向远场计算的波谱射线方法[J]. *电子学报*, 2000, **28**(1):127-129
- [7] 张 玉,梁昌洪.大型波导缝隙阵辐射特性的快速分析[J]. *电子学报*, 2005, **33**(9):1623-1625
- [8] 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
- [9] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社, 1993
- [10] 莫则尧,袁国兴. 消息传递并行编程环境 MPI[M]. 北京:科学出版社, 2001

Fast algorithm for plane wave spectrum-surface integration method

ZHANG Chun-bo^{1,2}, GUO Dong-ming^{*1}, SHENG Xian-jun³,
LIU Min-jing¹, SUN Yu-wen¹, LEI Ming-kai⁴

- (1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Aerospace Research Institute of Special Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China;
3. Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
4. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the calculation efficiency of the plane wave spectrum-surface integration (PWS-SI) method severely relies on the antenna aperture, a pre-strategy for spectrum integration is introduced. It selects the spectrum integral-interpolation points to set up the database of the PWS density function for antenna aperture distribution. The strategy avoids mass repeat calculation and simplifies quadruple integral to double integral during the PWS theory antenna near-fields calculation. Then, based on the calculation process of antenna-radome far-fields calculation adopting the PWS-SI method, a parallel PWS-SI (PPWS-SI) algorithm based on decomposed equivalent source region is presented. An algorithm program, which is developed and tested in the message passing interface (MPI) environment on cluster system, is used to compute the antenna-radome system far-fields patterns. Its exactitude and higher efficiency are proved.

Key words: plane wave spectrum-surface integration (PWS-SI) method; radome; cluster system; MPI; parallel strategy