

基于有限元算法的戴罩天线辐射特性快速求解

吴 刚

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘 要 提出一种基于矢量有限元算法来分析天线罩与天线系统辐射特性的等效方法。在传统有限元方法中, 需对整个求解区域进行网格剖分。由于天线局部细小结构的电尺寸与整个求解区域有较大的差距。因此, 在网格划分时容易导致剖分奇异性的出现以至于无法顺利剖分或矩阵无法求解。为避免上述问题并提高计算效率, 文中将原求解区域进行区域分解, 天线在子区域中单独求解, 再将子区域边界得到的场值提取出来, 同其他求解区域进行耦合, 求解耦合矩阵, 从而得到整体区域的场值, 然后计算所需的增益等辐射参数。并快速准确地得到整个系统计算模型的辐射特性。

关键词 天线罩; 有限元; 剖分奇异性; 区域分解

中图分类号 TN820.8⁺1 **文献标识码** A **文章编号** 1007-7820(2013)08-064-04

Fast Analysis of Radiation Characteristics by FEM Algorithm in the Presence of Radome

WU Gang

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract This paper presents an equivalent method based on vector finite element method to analyze the radiation characteristics of the antenna in the presence of radome. By the conventional finite element method, the entire solution region should be meshed. As there is a big gap between the electrical size of the local fine structure of the antenna and the entire solution region, mesh singularity often occurs, in which case we can not successfully mesh or the matrix cannot be solved. To avoid such a case and improve the computational efficiency, firstly, the authors simulate antenna model separately and obtain the radiation pattern in Project 1. Subsequently, we extract the electric field values on the radiation boundary in Project 1 and saved them as equivalent radiation sources in Project 2. Then, we set the equivalent radiation sources and radome together and do the simulation. In this way, we obtain the radiation characteristics of the computational model of the entire system fast and accurately.

Keywords radome; vector finite element method; mesh singularity; equivalent radiation sources

天线罩是用于保护天线及其馈线系统的重要组成部分。其一般由电介质材料或桁架支撑的电介质壳体构成, 被广泛应用于雷达、通信等各民用和军用设备中。暴露在大气中的天线设备易受强风、酸雨、大雪、冰雹及烈日等腐蚀和破坏, 严重时会降低天线的重要指标, 并缩短其使用寿命。另外, 天线罩会对天线的电磁辐射产生影响, 从而影响天线的辐射特性。例如: 天线的主瓣在加罩前后方位发生偏移, 副瓣电平抬高, 产生寄生的交叉极化, 差波瓣零深电平抬高以及差斜率降低等多种不良影响。所以加罩后天线的辐射特性分析尤为重要。早期分析带罩天线电性能常用方法主要是基于几何光学的射线跟踪法、基于物理光学的平面波谱

表面积分法和口径积分^[1]。以上方法通常要对实际问题做出较多近似处理, 但对于实际中的各种复杂情况有时较难满足其所需的近似条件。因此, 多数情况下, 使用上述分析方法会带来较大的误差或错误, 无法得到真实可信的分析结论。随着计算机技术的发展, 全波分析方法逐渐成为主流。主要方法包括: 有限元法、矩量法、时域有限差分法等。其中有限元法由于其建模的灵活性适用于任意形状天线罩和不均匀介质罩壁。但在处理天线与天线罩联合仿真的多尺度电大尺寸问题时, 却会产生有限元矩阵方程未知数数量规模过大, 导致计算资源以及计算时间过长难以求解的现象。为解决这一问题文中将大范围的计算区域分解成多个子区域以及相应的分区边界, 将大型问题分解为小型问题, 复杂边值问题转化为简单边值问题。即先计算天线及其近场区域的场值, 然后通过耦合方法将该子区域计算所得的场值作为等效辐射源应用到其区域外包括天线罩的更大的区域中进行计算。从而避免

收稿日期: 2012-06-19

作者简介: 吴刚(1986—), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算电磁学中的有限元方法, 微波电子线路, 微带天线等。
E-mail: wugang19491001@163.com

了天线上局部细小结构与整个问题的求解区域相比电尺寸量级差异、剖分奇异性以及矩阵未知数量的过大的问题。

1 戴罩天线辐射问题基本分析

由于球形介质壳体的电磁特性可通过 Mie 级数严格求解,文中首先以一个球形天线罩为例,计算一个理想偶极子阵加天线罩后辐射方向图的变化^[2]。在此建立了一个简单的 9 元理想偶极子直线阵与球形天线罩的几何关系模型,如图 1 所示。

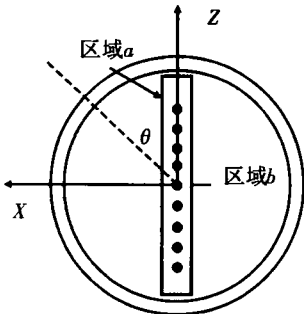


图 1 球形天线罩与 9 元偶极子天线阵列示意图

球形天线罩的内半径为 1.5λ ,外半径为 1.58λ ,相对介电常数为 $2-j$,阵列天线为 9 元等幅阵,沿 Z 轴放置,阵元间距为 $\lambda/4$ 。由此可看出天线阵列各单元集中处于整个天线罩区域内的一个较小的子区域中,且几何形状均为线型,径向尺寸相对整个求解区域较小。若直接对整个区域进行网格剖分,那么该单元所在的局部区域则会产生大量过于细小的网格,这会造成网格剖分无法进行以及有限元矩阵未知数数量过大而无法计算求解等问题。所以必须找到合适的方法来避免上述问题的发生。区域分解法 (DDM)^[3],将计算区域分解成多个小尺度区域和相应的分区边界条件,将复杂边值问题转化为简单边值问题,可有效解决以上问题。例如,在图 1 中可将天线阵列所在的子区域 a 从整个求解区域中隔离,单独进行求解,在计算出区域 a 与区域 b 的边界上的场值后对其进行存储,再求解区域 b,并将存储的边界场值耦合进来计算。这便能够将天线阵列模型与天线罩模型相隔离,避免了网格剖分的困难和产生过多的未知数。

2 模型的区域分解

区域分解法的关键是分区边界条件的设置,大致可分为两类:一类是基于 Schwarz 交替法的迭代解法,子区域间通过传输条件进行耦合但该方法的迭代收敛特性尚未确定。另一类是直接型 DDM,等效于先求出子系统的传递函数,再组装主系统的传递函数,后者求解多输入问题效率高^[4]。故文中采用第二类直接求解

的区域分解法,将子区域边界上的场用基函数展开,由边界场的连续性得到展开系数的耦合矩阵,并求解该矩阵获得所有子区域的场分布。

2.1 分区有限元求解

图 1 中所示问题的等效泛函如下

$$F(E) = \frac{1}{2} \iiint_v \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E \right] dV + \iint_s \left[\frac{\gamma}{2} (\hat{n} \times E) \cdot (\hat{n} \times E) + E \cdot U^{inc} \right] ds \quad (1)$$

其中有

$$U^{inc} = \frac{\omega \mu k_0}{2\pi} \oint_v J_0 G dv - \frac{1}{4\pi j \omega \mu \epsilon} \nabla (\nabla \cdot \oint_v G dv) \quad (2)$$

$$G = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \quad (3)$$

将模型分解成 10 个不重叠的子区域,如图 2 所示。图 2 中将原本图 1 的区域 a 划分为 9 个子区域。

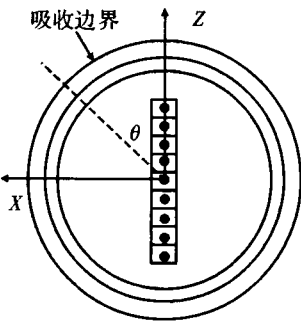


图 2 球形天线罩与 9 元偶极子天线阵列区域分解示意图

以子区域 i 为例,在区域 i 中的电场有满足

$$\frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial^3 E}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial z^3} \right) + k_0^2 \epsilon_r E_i = U_i^{inc} \quad (4)$$

在边界上令

$$\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial n^2} = U_i^{inc} \quad (5)$$

式中, n 为边界的法向方向。等价于以下的泛函

$$F(E) = \frac{1}{2} \iiint_{v_i} \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E_i) \cdot (\nabla \times E_i) - k_0^2 \epsilon_r E_i \cdot E_i \right] dV + \iint_{S_i} \left[\frac{\gamma}{2} (\hat{n} \times E_i) \cdot (\hat{n} \times E_i) + E_i \cdot U^{inc} \right] ds \quad (6)$$

将区域 i 划分为 M 个小单元,同时边界 S_i 被分成 M_i 条线段,假设共有 N 个棱边。对每一单元进行插值,并对所有单元求和,然后对每个棱边处的场求偏微分,进行组合后可得

$$K\{E_i\} + C\{E_2\} = \{0\} \quad (7)$$

式中, {E} 为所有棱边处场组成的列向量; {B} 为边界上所有棱边处场的法向导数组成的列向量; K 是 N×N 维对称、稀疏方阵, C 是 N×M_i 矩阵。

2.2 子区域边界方程

利用电场积分方程可将子区域中的任何一点电场表示为

$$E^s(r) = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_s \bar{G}(r, r') \cdot J(r') dS' \quad (8)$$

其中,为 G 自由空间的 Green 函数。将观察点移动到包围区域的边界 S 上时,利用边界条件可得

$$\frac{E_t(r')}{2} - \int [\hat{n} \times E_t(r')] \times G'(r, r') dS' = -j\omega\epsilon \int G(r, r') J_s(r') dS' + \frac{1}{j\omega\mu} \int G(r, r') J_s(r') dS' \quad (9)$$

式中,下标 t 表示场的切向分量,在每个单元上建立局部坐标系 (t_1, t_2, n) ,其中 t_1, t_2 表示单元的切向量。根据式(9)可得切向电场和电流之间的关系为

$$\begin{bmatrix} E \cdot \hat{t}_{1f} \\ E \cdot \hat{t}_{2f} \end{bmatrix} = 2 \int_s \frac{\partial G}{\partial R} T_1 \begin{bmatrix} E_{t1s} \\ E_{t2s} \end{bmatrix} dS' + \frac{2}{j\omega\epsilon} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int \frac{\partial^2 G}{\partial x_i \partial x_j} T_2 \begin{bmatrix} J_{t1s} \\ J_{t2s} \end{bmatrix} dS' - 2j\omega\epsilon \int G T_3 \begin{bmatrix} J_{t1s} \\ J_{t2s} \end{bmatrix} dS' \quad (10)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} (\hat{t}_{1f} \times \hat{r}_{fs})(\hat{n}_s \times \hat{t}_{1s}) & (\hat{t}_{2f} \times \hat{r}_{fs})(\hat{n}_s \times \hat{t}_{2s}) \\ (\hat{t}_{2f} \times \hat{r}_{fs})(\hat{n}_s \times \hat{t}_{1s}) & (\hat{t}_{2f} \times \hat{r}_{fs})(\hat{n}_s \times \hat{t}_{2s}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} (\hat{x}_i \cdot \hat{t}_{1s})(\hat{x}_j \cdot \hat{t}_{1f}) & (\hat{x}_i \cdot \hat{t}_{2s})(\hat{x}_j \cdot \hat{t}_{1f}) \\ (\hat{x}_i \cdot \hat{t}_{1s})(\hat{x}_j \cdot \hat{t}_{2f}) & (\hat{x}_i \cdot \hat{t}_{2s})(\hat{x}_j \cdot \hat{t}_{2f}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} (\hat{t}_{1f} \cdot \hat{t}_{1s})(\hat{t}_{1f} \cdot \hat{t}_{2s}) \\ (\hat{t}_{2f} \cdot \hat{t}_{1s})(\hat{t}_{2f} \cdot \hat{t}_{2s}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

将上式根据矩阵法写成矩阵形式

$$AE_1 = BE_2 \quad (14)$$

2.3 子区域耦合

将式(7)和式(14)进行组合,可得到以下方程

$$\begin{pmatrix} K & C \\ A & -B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = (0) \quad (15)$$

该线性方程组系数是一个部分稀疏部分满填充的矩阵,由此给存储和求解带来较大困难,为解决此问题,文中采用内观法^[5]将系数矩阵分成两部分,一块是由有限元形成的稀疏阵,另一块是由边界元形成的满阵。

2.4 DDM 耦合方程的求解

DDM 耦合方程的求解宜选择复线性方程组的直接解法。对于存在 IRBC 边界的模型,可使用 IRBC 的 FFT 加速算法,来提高计算效率。

3 数值结果与讨论

根据上述分析,文中首先建立了球形天线罩与 9 元电偶极子天线阵列仿真模型如图 3 所示。

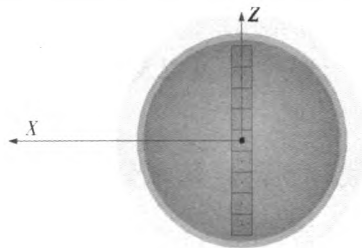


图3 球形天线罩与9元电偶极子天线阵列仿真模型

将 9 个电偶极子分别隔离在 9 个小区域中,分别进行有限元求解。由各区域得到的结果组成耦合方程。求解后,计算 $\Phi=0$ 面的归一化辐射方向图,同时给出了自由空间天线阵的辐射方向图作为比较,如图 4 所示。球形天线罩的内半径为 1.2λ ,外半径为 1.28λ ,相对介电常数为 $2-j$ 。阵列天线为 9 元等幅阵,沿 Z 轴放置,阵元间距为 $\lambda/4$ 。

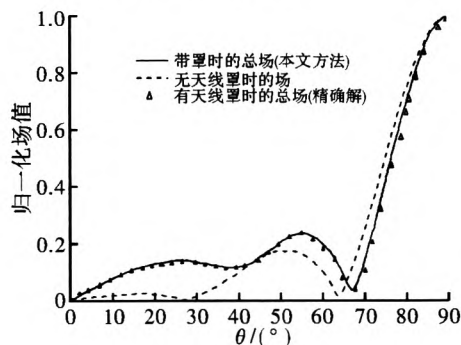


图4 球形天线罩内天线阵的辐射方向图

由图 4 可见,带天线罩后副瓣电平升高,主瓣波束宽度变窄。同时,可看到本方法所得结果与精确解基本一致,证明了该方法的有效性。

接着,设计了一个波导缝隙阵面天线,并将其放置在圆锥型天线罩中,如图 5 所示。天线工作的中心频率为 8.5 GHz ,圆锥型天线罩内部电尺寸达到 $18\ 678\ \lambda^3$ 。由图 5 可看出,文中在天线与天线罩之间设置了一个立方体盒子将天线隔离在该盒中单独计算,之后再与立方体外的区域耦合,求解耦合方程,并计算了天线的方向图,如图 6 和图 7 所示。

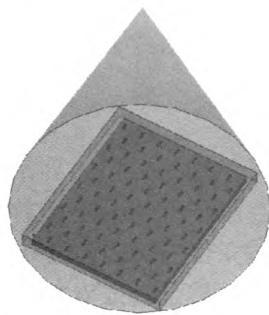


图5 波导缝隙阵面天线与圆锥型天线罩模型

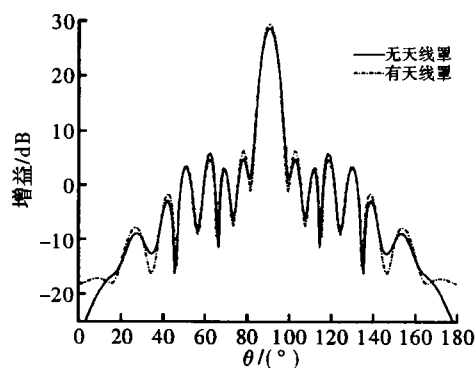


图6 波导缝隙阵面天线与圆锥型天线罩E面方向图

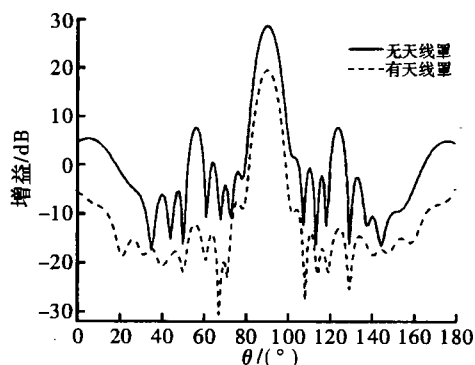


图7 波导缝隙阵面天线与圆锥型天线罩H面方向图

通过区域分解,计算了大小为 $3755\lambda^3$ 的立方体子区域,然后耦合计算了该区域外的剩余区域。整个过程不但加快了求解速度,且大幅节省了计算资源。

(上接第48页)

参考文献

- [1] 王景存,黄勇. 20×18 位符号定点乘法器的 FPGA 实现[J]. 现代电子技术,2009,32(8):5-7.
- [2] 邵磊,李昆,张树丹,等. 基于改进4-2压缩结构的32位浮点乘法器设计[J]. 微计算机信息,2007(03x):223-225.
- [3] GALLAGHER W L, SWARTZLANDER E E JR. High radix booth multipliers using reduced area adder trees [C]. Conference Record of the Twenty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers.
- [4] MILLAR B, MADRID PE, SWARTZLANDER E E JR. A fast hybrid multiplier combining booth and Wallan-e/DADDA algorithms [C]. Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1992.
- [5] DADDA L. Some schemes for parallel multipliers [C]. IEEE

从图6可看到天线与天线罩整体产生的E面辐射方向图,其增益与无天线罩时相比,主瓣增益略有上升,而副瓣电平增高较大,而从图7可知,当H面有天线罩时所有角度上的增益均有大幅的降低。

4 结束语

文中所介绍的应用有限元区域分解并求解天线与天线罩辐射特性的方法,与传统方法相比具有准确、高效的特点,该方法有利于求解多尺度复、杂介质结构的辐射问题。

参考文献

- [1] 王立超,张强. 机载毫米波天线罩的设计研究[J]. 微波学报,2010,(S1):92-94.
- [2] GUO Jingli, LI Jianying, LIU Qizhong. Analysis of arbitrarily shaped dielectric radomes using adaptive integral method based on volume integral equation [C]. IEEE, AP-S International Symposium, 2005.
- [3] STUPFEL B. A fast-domain decomposition method for the solution of electromagnetic scattering by large object [J]. IEEE Transaction on Antennas Propagat, 1996, 44(10):1375-1385.
- [4] 刘鹏. 三维粗糙面电磁双站散射的直接型区域分解计算[J]. 计算物理, 2010, 27(1):73-81.
- [5] JIN J M. The finite element method in electromagnetics [M]. New York: Wiley Press, 1993.

Computer Society on Computer arithmetic, 1990.

- [6] Ramya Muralidharan, Chip-Hong Chang, A Simple Radix-4 Booth Encoded Modulo $2n+1$ Multiplier [C]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2011:1163-1166.
- [7] 徐东明. 实现快速乘法的几种改进贝斯算法[J]. 西安邮电学院学报, 2006, 11(1):61-65.
- [8] WALLANCE C S. A suggestion for a fast multiplier [J]. IEEE Transactions on Electronic Computers, 1964(1):14-17.
- [9] Kogge P, Stone H. A Parallel Algorithm for the Efficient Solution of a General Class of Recurrence Equations [J]. IEEE Transactions on Computers, 1973, C-22:783-791.
- [10] 王仁平,何明华,陈传东,等. 64位超前进位对数加法器的设计与优化[J]. 半导体技术, 2010, 35(11):1116-1121.
- [11] DEVERELL J. Pipeline iterative arithmetic arrays [J]. IEEE Transactions on Computers, 1975, 100(3):317-322.

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，一直致力和专注于微波、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>