

MLFMA 分析复杂载体平台上天线问题

阙肖峰 聂在平 胡俊

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文分析了导体介质复合结构平台上天线的辐射问题。利用等效原理建立 EFIE-PMCHW 表面积分方程组, 定义线、面和连接基函数描述复杂结构上电流分布, 分析了导体介质分界面处基函数的处理; 利用多层次快速多极子方法(MLFMA)加速迭代求解过程中的矩阵矢量相乘运算, 并用于有耗媒质求解。MLFMA 的运用极大地提高了求解实际电大问题的能力。数值计算结果验证了方法的正确性和高效性。

关键词: 线天线; 多层快速多极子方法; 导体介质复合结构; 平台

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0730-04

Analysis of Antennas Mounted on Complex Platforms Using MLFMA

Que Xiao-feng Nie Zai-ping Hu Jun

(School of Electrical Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Wire antennas mounted on complex platform combined with conducting and dielectric objects are analyzed in this paper. EFIE-PMCHW boundary coupled integral equations are constructed by using equivalence principle. The surface, wire and junction basis functions are defined to simulate the current distribution on the complex structure and the selection of the basis functions on the boundary of the conducting/dielectric interface is analyzed. Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMA) is employed to accelerate the matrix-vector multiplication and solve the loss problem. Application of MLFMA increases the ability to solve the large-scale problem. Numerical examples validate this method and demonstrate the accuracy and high efficiency of this method.

Key words: Wire antennas; Multi-Level Fast Multipole Algorithm (MLFMA); Combined conducting and dielectric object; Platform

1 引言

复杂平台上的天线问题在军事、通信领域内具有重要的研究价值。利用数值仿真方法可以分析各类机载、车载和舰载天线的辐射、阻抗特性以及进行天线布局、电磁兼容分析等。国内外相关文献对导体平台上天线问题做了广泛的研究^[1,2], 并结合高频近似方法或快速方法提高处理电大目标的能力; 对更为复杂的平台问题, 例如对含介质基片、天线罩等具有导体介质复合结构问题分析时, 由于介质内部电磁散射机理较为复杂, 给数值分析和计算带来困难。可以通过体积分方程结合面积分方程分析, 并采用快速算法求解^[3]。当介质材料为无耗各向同性或有耗均匀时, 本文提出采用耦合面积分方程结合多层次快速多极子方法(MLFMA)分析复杂、电大平台上的线天线辐射问题。

首先利用等效原理和边界条件, 导体和介质表面分别建立电场积分方程(EFIE)和 PMCHW 方程组, 构造矩阵方程进行求解。当线天线加载于导体表面, 分别定义线、面和连接基函数描述电流分布。表面采用平面三角形单元剖分时,

在导体介质分界面边缘会存在 3 个三角形共有一条公共边情况, 分析了分界面处基函数的选择。为求解实际工程中的电大问题, 利用 MLFMA 加速迭代求解过程中的矩阵矢量相乘运算, 减少内存需求; 考虑了有耗介质背景中 MLFMA 多极子模式数的选择。最后给出数值算例验证方法的正确性, 并对数值结果进行分析。

2 导体介质复合结构分析

如图 1 所示导体介质复合目标的几何示意图。背景媒质参数为 $(\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1)$, 媒质无耗各向同性或有耗均匀, 媒质参数为 $(\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2)$ 。导体、介质表面和分界面分别表示为 S_c 、 S_d 和 S_{cd} 。在平面波照射下, 由等效原理, 介质表面 S_d 上定义等效电流 J_d 和等效磁流 \mathbf{M}_d , 导体面 S_c 和分界面 S_{cd} 上分别定义等效电流 J_c 和 J_{cd} 。根据边界条件, 介质表面建立电场和磁场积分方程, 构造 PMCHW 方程组^[4]:

$$Z_1 \mathbf{L}_1^*(J_c) - Z_2 \mathbf{L}_2^*(J_{cd}) + Z_1 \mathbf{L}_1^*(J_d) + Z_2 \mathbf{L}_2^*(J_d) - \mathbf{K}_1^*(\mathbf{M}_d) - \mathbf{K}_2^*(\mathbf{M}_d) = -\mathbf{E}^{inc} \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_1^*(J_c) - \mathbf{K}_2^*(J_{cd}) + \mathbf{K}_1^*(J_d) + \mathbf{K}_2^*(J_d) + \frac{1}{Z_1} \mathbf{L}_1^*(\mathbf{M}_d) + \frac{1}{Z_2} \mathbf{L}_2^*(\mathbf{M}_d) = -\mathbf{H}^{inc} \quad (2)$$

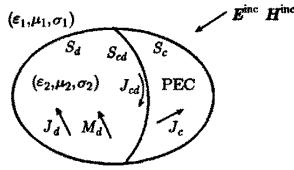


图 1 导体介质复合结构

其中下标 i 表示媒质 i , Z_i 表示媒质 i 中波阻抗, E^{inc} 和 H^{inc} 表示入射电场和磁场。算子 L_i 和 K_i 表示为

$$L_i(X) = jk_i \int_s [X(r') + \frac{1}{k_i^2} \nabla V' \cdot X(r')] G_i(r, r') dS' \quad (3)$$

$$K_i(X) = \int_s \nabla G_i(r, r') \times X(r') dS' \quad (4)$$

其中 $j = \sqrt{-1}$, X 表示 J 或 M , G_i 和 k_i 分别为媒质 i 中的格林函数和波数。导体表面和分界面分别建立电场积分方程

$$[Z_1 L_i(J_c) + Z_1 L_i(J_d) - K_i(M_d) + E^{\text{inc}}] \times n_c = 0 \quad (5)$$

$$[Z_2 L_2(J_{cd}) + Z_2 L_2(-J_d) - K_2(-M_d)] \times n_{cd} = 0 \quad (6)$$

其中 $n_{c/cd}$ 表示相对于导体面和分界面的单位外法向矢量。式(1), 式(2), 式(5)和式(6)构成 EFIE-PMCHW 方程组。为求解上述积分方程, 首先对目标表面进行离散剖分, 在离散单元上对等效电流和磁流用基函数进行展开, 运用伽略金方法, 建立矩阵方程组。

3 复杂结构电磁建模

当目标结构如图 2 所示存在线、面以及线面连接等多种结构时, 为更好地模拟导体表面的电流分布, 分别定义线、面和线面连接基函数。将曲线离散为直线段, 定义三角基函数 J_{cw} : 导体面剖分为平面三角形单元, 构造 RWG 基函数 J_{cs} ^[5]; 线面连接处定义 Costa 连接基函数 J_{cd} ^[6]。

$$J_c = \sum_i \alpha_i J_{cs} + \sum_j \alpha_j J_{cw} + \sum_k \alpha_k J_{cd} \quad (7)$$

其中 α 为电流展开系数。于是构造的 EFIE-PMCHW 矩阵方程组中导体表面电流 J_c 的互阻抗子矩阵表示为

$$Z_{\alpha} = \begin{bmatrix} Z_{ss}, Z_{sw}, Z_{sj} \\ Z_{ws}, Z_{ww}, Z_{wj} \\ Z_{js}, Z_{wj}, Z_{jj} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中下标 s, w, j 分别表示面、线和连接处。相应的导体表面电流 J_c 与其它部分等效电、磁流的互阻抗矩阵也类似的表达。

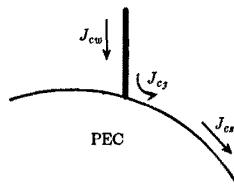


图 2 线天线与导体面连接处电流示意图

RWG 基函数定义在平面三角形单元的公共边上, 在导体介质分界面边缘会出现 3 个三角形共有一条公共边的情

况。根据基尔霍夫定理, 流入某条公共边的电流应等于该公共边流出的电流。如图 3 所示, 每条共有公共边电流由两个 RWG 基函数展开, 这样定义能够满足电流的连续性条件。

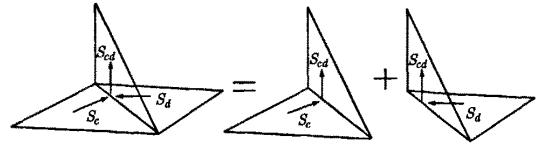


图 3 3 个三角形共有一条公共边时基函数的定义

4 MLFMA 分析

介质表面剖分密度与介电常数有关, 一般需细剖分; 介质表面同时具有未知电流和磁流展开系数, 未知量数目大为增加, 直接采用矩量法(MOM)难以求解矩阵方程。相对于 MOM 的 $O(N^3)$ 量级存储量和 $O(N^2 - N^3)$ 的计算量(其中 N 为数值计算未知量个数), MLFMA 将计算量和存储量均降为 $O(N \log N)$ 量级, 提高了求解电大尺寸问题的能力。MLFMA 是 FMM 的多层形式, 它能加速迭代求解过程中的矩阵矢量相乘运算^[7]。通过对散射体表面进行分组, 任意两个基函数的互耦计算由所在组的位置确定。对于附近组之间的互耦直接计算, 非附近组之间的耦合关系通过聚合-转移-配置实现; 同时只需保存附近组之间的阻抗矩阵元素, 极大地降低了内存需求。MLFMA 的数学基础是矢量加法定理, 即利用加法定理对积分方程中的格林函数在角谱空间展开。因此非附近组阻抗矩阵元素具有如下表示形式:

$$P_{lmn}^{\text{TE}}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n) = \langle \mathbf{g}_m, \mathbf{L}_i^*(\mathbf{g}_n) \rangle \\ = -(k_i / 4\pi)^2 \int V_{lm}^{fp}(\hat{k}) \cdot \alpha_{lw}(\hat{k} \cdot \hat{r}_w) V_{ln}^{sp}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (9)$$

$$Q_{lmn}^{\text{TE}}(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n) = \langle \mathbf{g}_m, \mathbf{K}_i^*(\mathbf{g}_n) \rangle \\ = (k_i / 4\pi)^2 \int V_{lm}^{fq}(\hat{k}) \cdot \alpha_{lw}(\hat{k} \cdot \hat{r}_w) V_{ln}^{sq}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (10)$$

其中 k_i 为媒质 i 中的波数, \mathbf{g}_n 和 \mathbf{g}_m 分别表示基函数和权函数, $\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n$ 表示场、源位置矢量, $\mathbf{r}_l, \mathbf{r}_l$ 分别表示场、源组中心的位置矢量。聚合量 V_{lm}^{sp}, V_{ln}^{sq} , 转移因子 α_{lw} 和配置量 V_{lm}^{fp} , V_{lm}^{fq} 可表示为

$$V_{lm}^{sp}(\hat{k}) = V_{lm}^{sq}(\hat{k}) = \int_s e^{j k_i \cdot \mathbf{r}_{lm}} \mathbf{g}_n d\mathbf{s} \quad (11)$$

$$\alpha_{lw}(\hat{r}_w \cdot \hat{k}) = \sum_{s=0}^L j^s (2s+1) h_s^{(1)}(k_i r_w) P_l(\hat{r}_w \cdot \hat{k}) \quad (12)$$

$$V_{lm}^{fp}(\hat{k}) = \int_s e^{j k_i \cdot \mathbf{r}_{lm}} (\hat{I} - \hat{k} \hat{k}) \cdot \mathbf{g}_m d\mathbf{s} \quad (13)$$

$$V_{lm}^{fq}(\hat{k}) = \int_s e^{j k_i \cdot \mathbf{r}_{lm}} \hat{k} \times \mathbf{g}_m d\mathbf{s} \quad (14)$$

其中 $h_s^{(1)}(k_i r_w)$ 为第一类球汉克尔函数, $P_l(\hat{r}_w \cdot \hat{k})$ 为勒让德多项式。

在无耗媒质空间 i 中进行 MLFMA 运算时, 多极子模式数的选择可根据公式 $L \approx k_i D + \gamma \ln(\pi + k_i D)$ 得到, 其中 D 为子散射体组的最大尺寸, 系数 γ 决定相对误差, 一般取 2。如果媒质有耗, 即 $\sigma_i \neq 0$, $\epsilon_i = \epsilon_0 \epsilon_n + j \sigma_i / \omega$, 复波数

$k_i = k'_i + jk''_i$ 同样可利用加法定理进行展开, 此时多极子模式数的选择取决于 k''_i / k'_i 。当损耗不大情况下, L 的稍微增加就能确保级数收敛和稳定^[8]。

5 数值结果

通过数值算例验证方法的正确性以及在实际问题分析中的有效性。MLFMA 采用广义最小残差(GMRES)迭代方法, 误差收敛门限为 0.01。所有计算均在 SGI 350 计算机的单 CPU 上完成。

如图 4(a)所示, 半径为 $0.5\lambda_0$ 的球体上、下半球分别由导体和相对介电常数 $\epsilon_r = 2$ 的无耗介质体组成。长度为 $0.25\lambda_0$, 半径为 $0.002\lambda_0$ 的单极天线加载于导体半球顶部, 在线面连接处采用单位电压源进行馈电。介质半球的存在对天线的辐射特性产生影响。采用 FEKO(MOM), MLFMA 和有限元-边界积分方法(FEM-BI)计算了天线的 E 面辐射方向图并进行了比较。从图 4(b)可以看出, 3 个计算结果吻合很好。

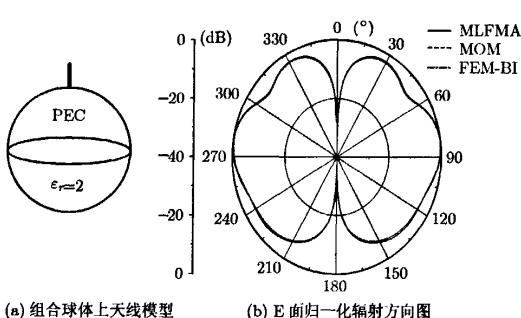


图 4 导体介质-特性

如图 5(a)所示长度为 $0.25\lambda_0$, 半径为 $0.002\lambda_0$ 的单极天线加载于导体方块上表面。天线底部进行馈电, 导体块两边连接有相对介电常数 $\epsilon_r = 2$ 的介质块, 模型的几何参数在图中标出。采用 MLFMA 计算了 xoz 面辐射方向图, 如图 5(b)所示计算结果和 FEM-BI 计算结果吻合很好。

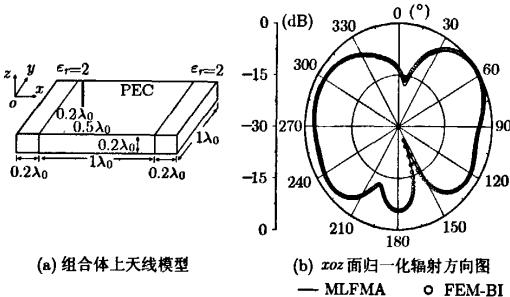


图 5 导体介质组合体上天线辐射特性

第 3 个例子如图 6(a)所示, 锥形导体平台上沿 x 轴放置两根单极天线。导体上下圆面的半径分别为 0.5m 和 0.79m ,

平台高为 0.5m 。天线 1 加载于基座中心处, 底部进行馈电, 工作频率为 2.5GHz 。天线 1, 2 相距 0.04762m , 长度分别为 $0.25\lambda_0$ 和 $0.3\lambda_0$, 半径均为 $0.002\lambda_0$, 其中 λ_0 为工作波长。在基座上方安装复介电常数 $\epsilon_r = 2 + j1$ 的球形介质天线罩。天线罩高 0.28868m , 厚度 0.03m 。图 6(b)所示采用 MLFMA 计算了安装天线罩前后 xoz 面的辐射方向图。由于介质罩对电磁波的相位延迟和损耗影响, 最大辐射方向的辐射电平降低, 旁瓣也发生变化。表 1 给出两种情况下计算时间和内存需求的比较。可以看出由于介质材料的加入导致数值计算未知量数目极大地增加, 采用传统全波分析方法已难以求解, 而 MLFMA 的应用提高了计算能力和计算效率。该方法可用于分析不同形状、不同材料的天线罩问题, 研究天线的阻抗和辐射特性。

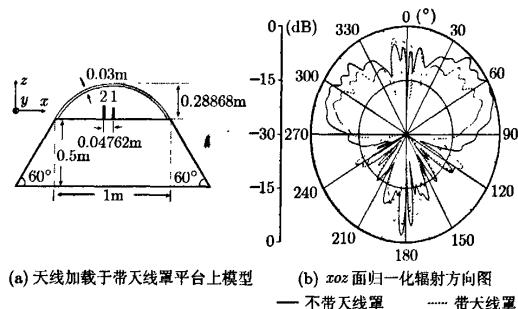


图 6 天线加载于带天线罩平台上的辐射特性

表 1 计算时间和内存比较

未知量个数	每次迭代计算		内存需求 (MB)
	时间 (s)	总计算时间 (s)	
不带天线罩	119 066	58	8 043
带天线罩	217 514	88	18 678

6 结束语

采用耦合面积分方程方法结合 MLFMA 分析了复杂平台上天线问题。研究了复杂结构目标上电流基函数的选择, 并推导了含介质目标 MLFMA 的相关公式。该方法能用于求解各种复杂结构、材料的电磁辐射与散射问题, 实现对电大尺寸目标的准确建模和快速计算。

参 考 文 献

- [1] Chao H Y, Song G M, Michielssen E, and Chew W C. The multilevel fast multipole algorithm for analyzing electromagnetic radiation from complex surface-wire structures. Proceedings of the 1998 Antenna Applications Symposium, Alerton Park, Monticello, IL, 1998: 291-303.
- [2] 万继响, 张玉, 梁昌洪. 任意导体与线天线连接问题的 MOM

- 分析. 电波科学学报, 2003, 18(5): 523-528.
- Wan J X, Zhang Y, and Liang C H. Method of moment analysis of connect between wire antennas and arbitrary shape conductors. *Chinese Journal of Radio Science*, 2003, 18 (5): 523-528.
- [3] Lu C C and Chew W C. A coupled surface-volume integral equation approach for the calculation of electromagnetic scattering from composite metallic and material targets. *IEEE Trans on AP*, 2001, 48(12): 1866-1868.
- [4] 姚海英. 介质以及涂敷介质结构电磁散射特性的基础研究: 积分方程方法及其快速求解. [博士论文]. 电子科技大学, 2002.
- Yao H Y. Basic study of electromagnetic scattering from dielectric and coated structures-integral equation method and its fast solver. [Dissertation]. University of Electronic Science and Technology of China, 2002.
- [5] Rao S M, Wilton D R, and Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Trans on AP*, 1982, 30(5): 409-418.
- [6] Costa M F and Harrington R F. Minimization of radiation from computer systems. *Proc. Int. Electrical Electronics Conference, Canada, Sept.1983*: 660-665.
- [7] 聂在平, 胡俊, 姚海英, 王浩刚. 用于复杂目标三维矢量散射分析的快速多极子方法. 电子学报. 1999, 27(6): 104-109.
- Nie Z P, Hu J, Yao H Y, and Wang H G. The fast multipole methods for vector analysis of scattering from 3-dimensional objects with complex structure. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 104-109.
- [8] Geng N, Sullivan A, and Carin L. Fast multipole method for scattering from an arbitrary PEC target above or buried in a lossy half space. *IEEE Trans on AP*, 2001, 49(5): 740-748.

阙肖峰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为电磁场数值方法、天线设计.

聂在平: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向为计算电磁学、电磁散射与逆散射、非均匀介质中的场与波、新一代移动通信中的多天线技术等.

胡俊: 男, 1973 年生, 副教授, 博士, 主要从事计算电磁学、并行计算研究.

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>