

文章编号 1005-0388(2008)02-0292-05

基于 UV/MoM-PO 的电大载体附近阵列天线的研究

陈海涛^{1,2}☆ 罗建新¹ 朱国强²

(1. 中国船舶重工集团公司第 722 研究所, 湖北 武汉 430079;
2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 基于 UV 技术加速的矩量法/物理光学混合算法(UV/MoM-PO), 研究了电大尺寸载体对位于其附近的阵列天线性能的影响。在 UV/MoM-PO 算法中, 载体被设置为 PO 区域, 阵列天线被设置为 MoM 区域。PO 区域采用三角面片剖分, 并用 RWG 基函数展开, MoM 区域则用线段剖分, 并用分段线性基函数展开。根据与 MoM 区域的远近, 将 PO 区域的单元分组, 其中每个小组与 MoM 区域的相互作用矩阵采用 UV 分解技术快速得到。给出了两个具体的算例, 并与多层快速多极子(MLFMM)的结果进行了比较, 表明本文的算法有较好的计算精度。

关键词 矩量法/物理光学混合算法; UV 分解; 阵列天线; 载体

中图分类号 TN82 **文献标志码** A

Analysis of array located near to electric large-scale platform based on UV/MoM-PO method

CHEN Hai-tao^{1,2} LUO Jian-xin¹ ZHU Guo-qiang²

(1. Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan Hubei 430079, China;
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

Abstract In this paper, an UV accelerating MoM-PO method is presented to analyze the array antennas located near to electric large-scale platforms. The platforms are considered as the PO region and the array antenna are assigned to the MoM region, and the basis functions in PO region are divided into many groups and the reaction matrixes between each group and MoM region are obtained by UV decomposition technique. Two examples are illustrated at last, and the results are compared with the results of MLFMM which are obtained by commercial software FEKO. It is shown that the algorithm of this paper is effective and suitable to solve the composite structure of wire antennas and electric large-scale platform.

Key words MoM-PO hybrid method; UV decomposition; array; platform

1 引言

矩量法/物理光学混合算法(MoM-PO)作为一种高效的数值技术, 已广泛应用于三维复杂结构的电磁辐射与散射问题^[1~5]。MoM-PO 方法将整个求解区域划分为 MoM 区域和 PO 区域。其中, 只

有位于 MoM 区域内的电流才作为未知量, 用矩量法处理, 而位于 PO 区域的待求电流, 则认为其由外加的人射场和 MoM 区的电流决定, 用物理光学方法近似处理。与严格的矩量法相比, MoM-PO 方法中只有极少的未知量, 因此具有比矩量法高得多的计算效率; 与单纯的物理光学方法相比, MoM-PO

方法计入了 MoM 区域和 PO 区域的耦合,因而其计算精度要优于物理光学方法。

为了解决电大尺寸结构的全波电磁分析问题,近年来已发展了各种快速算法,这些快速算法主要有层快速多极子方法(MLFMM)^[6],共轭梯度一快速傅立叶变换方法(CG-FFT)^[7],稀疏矩阵规范网格方法(SMC)^[8]以及多层 UV 算法^[9,10]等。与这些快速算法相比,作为高一低频混合技术的 MoM-PO 方法有着更高的计算效率。但 MoM-PO 方法中要计算 MoM 区域与 PO 区域的互耦,对于超电大问题或是需要进行反演计算的电大问题,例如天线优化、逆散射等,其计算量也是巨大的。为进一步提高 MoM-PO 方法的计算效率,一种可行的办法是将 MoM-PO 方法与快速算法结合起来,利用快速算法中的相关处理技术加速 MoM-PO 方法中矩量法区域和物理光学区域耦合的计算。文献^[11]引入了 FAFFA 技术,该方法与快速多极子类似,利用远场近似,加速了 MoM 区和 PO 区的互阻抗计算。本文作者在前期的研究工作中,提出了 UV 加速的 MoM-PO 算法^[12],该算法利用远区相互作用矩阵的秩远小于维数的特性,采用 UV 压缩技术,加快了耦合矩阵的计算。本文进一步发展 UV/MoM-PO 算法,将 PO 区单元按空间位置分组,每一分组所对应的耦合矩阵块分别采用 UV 技术处理,进一步提高了计算效率,并运用该算法对电大载体附近阵列天线的特性进行了研究。

本文所采用的时谐因子为 $\exp(j\omega t)$,将在下面的叙述中省略。

2 线面混合结构的 MoM-PO 算法及 UV 加速技术

考察如图 1 所示的线面混合结构,线天线与面结构均为理想导体。为简单起见,假设线天线离开面结构一定距离,激励源为天线上的片状电压源。由等效原理,原问题可转换为表面等效电流在均匀空间的辐射。

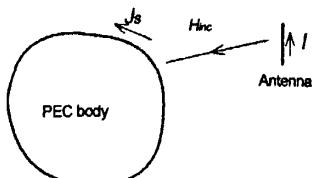


图 1 PEC 结构附近的线天线

应用 MoM-PO 方法,将等效电流分为 MoM 区和 PO 区,其中天线上的电流属于 MoM 区,面结构上的电流属于 PO 区。在天线表面上应用电场边界条件,可得到电场积分方程为

$$\begin{aligned} E_{sc} = & j\omega\mu_0 \int_L I(l') G(r, r') l' dl' - \\ & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \int_L \frac{\partial}{\partial l'} I(l') G(r, r') dl' + \\ & j\omega\mu_0 \int_S J_e^{PO}(r') G(r, r') ds' - \\ & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla' \cdot J_e^{PO}(r') G(r, r') ds' \end{aligned} \quad (1)$$

式中, I 为天线(MoM 区)的电流; J_e^{PO} 为面结构(PO 区)的电流; $G(r, r')$ 为自由空间的磁矢位格林函数; l' 为线上电流方向的单位矢量。

在严格的矩量法中,面上电流和线上电流是两个独立的待求量。为求解出全部的电流分布,还需要在面结构上建立积分方程,与式(1)联立求解。而在 MoM-PO 方法中,面上电流被认为是由线上电流所激励的场感应产生,面上电流分布依赖于线上电流,它们之间的联系由物理光学方法近似得到。即:将天线电流激励的场作为入射场,由物理光学方法确定面结构的表面等效电流,然后面结构上的电流再反过来作用于天线电流。这样式(1)就只是关于天线上电流的积分方程。在面结构表面,由物理光学方法有

$$J_e^{PO} = 2n \times \delta H_{sc} \quad (2)$$

式中, δ 为照亮因子,亮区取 1,暗区取 0; n 为外法线矢量;

$$H_{sc} = \nabla \times \int_L I(l') G(r, r') l' dl' \quad (3)$$

将面结构用三角面片进行剖分,其电流分布用 RWG 函数^[13]展开,而天线电流则用分段线性基函数展开。

$$J_e^{PO}(r) = \sum_{n=1}^N j_{e,n}^{PO} f_n(r); I(l) = \sum_{n=1}^N i_n g_n(l); \quad (4)$$

将(3)、(4)两式代入式(2)中,运用点匹配方法^[11],PO 区电流展开系数与 MoM 区电流展开系数之间的关系可用矩阵方程表示为:

$$[j_{e,1}^{PO}, j_{e,2}^{PO}, \dots, j_{e,N}^{PO}]^T = \bar{\tau} \cdot [i_1, i_2, \dots, i_N]^T \quad (5)$$

其中 $\bar{\tau}$ 为联系 MoM 区和 PO 区电流展开系数的矩阵,因其对应于 MoM 区电流在 PO 区产生的磁场,这里将其称为磁场作用矩阵,其元素的表达式为

$$\bar{\tau}(k, n) = (t_k^+ + t_k^-) \cdot \delta(k, n) [\nabla \times \int_{L_n} g_n(l') \cdot G(r, r') l' dl'] \quad (6)$$

上式中括号内的部分表示天线上第 n 个基函数在 PO 区第 k 个公共边处产生的磁场; t_k^\pm 为垂直于该公共边的单位矢量, 其定义见文献[1]。照亮因子则用来判断第 k 个公共边是否在第 n 个线性基函数的照亮区。对电场积分方程(1)运用 Galerkin's 方法, 并将式(5)代入, 便得到关于矩量法区电流系数的矩阵方程

$$(\bar{Z}_{mm, mm} + \bar{Z}_{mm, po} \cdot \bar{\tau}) \bar{I} = \bar{V} \quad (7)$$

其中下标“mm, mm”表示 MoM 区的自作用阻抗矩阵, “mm, po”表示 MoM 区和 PO 区的互阻抗矩阵。MoM-PO 方法的计算量包括 MoM 区自阻抗矩阵的填充、MoM 区和 PO 区互阻抗矩阵、磁场作用矩阵的填充以及矩阵方程的求解。由于只有线天线部分被划为 MoM 区, 未知量较少, 因而 MoM 区自阻抗矩阵的填充以及矩阵方程的求解都十分迅速, 主要的计算量集中在互阻抗矩阵和磁场作用矩阵的处理上。生成这两个矩阵所需的计算量与 PO 区的单元数呈线性关系。当 PO 区单元过多时, MoM-PO 算法的计算效率将会受到影响。为提高 MoM-PO 方法的效率, 采用 UV 分解技术来加速互阻抗矩阵和磁场作用矩阵的计算。

首先将 PO 区的单元进行空间分组, 其分组过程与 FMM 方法类似。其中每一小组对应的互作用矩阵, 根据该小组与 MoM 区的距离远近, 选择不同的采样点数, 由 UV 分解技术得到^[9,10]。由矩阵理论, 一个 $M \times N$ 的矩阵可以分解为

$$\bar{Z}_{M \times N} = \bar{U}_{M \times r} \cdot \bar{V}_{r \times N} \quad (8)$$

r 是该矩阵的秩。当 $r < < M$ 且 $r < < N$ 时, 用计算矩阵 U 和 V 来替代矩阵 Z 的计算无疑能较大程度上提高计算效率。文献[9,10]的研究指出, 对于远距离相互作用的矩阵块, 其数值秩远小于其维数。如矩阵元素值在空间上具有平滑性, 则可以用粗取样插值技术构造出 U 、 V 矩阵。然而对于三维矢量场问题, 由于 RWG 基函数的方向性, 使得 MoM 区和 PO 区的互作用矩阵的元素不仅与场点和源点之间的距离有关, 也与基函数的取向有关, 呈现出震荡的特点。为了便于处理, 需要将互作用矩阵中仅与距离有关的部分分离出来, 对这一部分采用 UV 方法处理。

以 MoM 区和 PO 区的互阻抗矩阵为例进行分析, 可知其中包含了定义在 PO 区的三角形单元上

的两个基本积分

$$I_1 = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} \frac{e^{-j\pi R}}{R} d\xi d\eta \quad (9a)$$

$$I_2 = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} \nabla \frac{e^{-j\pi R}}{R} d\xi d\eta \quad (9b)$$

这两个基本积分仅与 PO 区的三角形和 MoM 区的线性基函数的位置有关。对所有的单元, 这两个基本积分构成了基本积分矩阵, 求得基本积分矩阵后, 就可以很快构造出互阻抗矩阵和磁场作用矩阵。既然基本积分仅与场、源点距离有关, 于是就可以采用 UV 方法来加速基本积分矩阵的生成。UV 方法仅需要计算少量采样点上的值, 便可以构造出整个矩阵, 因而可以显著提高计算效率。

3 算例及分析

为检验本算法的有效性以及利用该算法分析载体对阵列天线的影响, 研究了两个算例。第一个例子为一个四元共线阵平行放置在一块导电平板前方中心处, 如图 2 所示。导电板尺寸为 $10\lambda \times 10\lambda$, 天线阵与平板的距离为 2λ , 天线单元中心间距为 $\lambda/2$ 。天线各单元采用电压源馈电, 馈电幅度相等, 如果期望该天线阵在自由空间中的波束指向为 45° , 则各单元的馈电电压依次应相差相位 $\pi \sin(\pi/4)$ 。

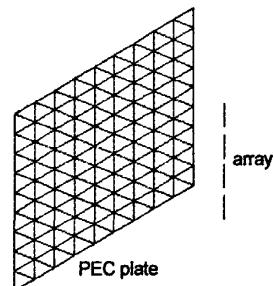


图 2 PEC 平面附近的阵列天线

图 3 给出了 UV/MoM-PO 的计算结果, 并与 FEKO 中 MLFMM 模块的计算结果进行了比较, 二者吻合的较好。该算例总的剖分单元数为 29880 个, 在 P4、CPU2.6G 的单机上, FEKO 的计算时间为 270s, 用 Visual Fortran 编制的 MoM-PO 程序的计算时间为 144s, 而 UV/MoM-PO 程序的计算时间仅为 15s, 显然后者有效地提高了原始 MoM-PO 算法的计算效率。与快速算法相比, 当问题的电尺度进一步加大时, 混合算法在计算效率上的优势将进一步突出。

从图中计算结果可以看出, 由于平板的影响, 天

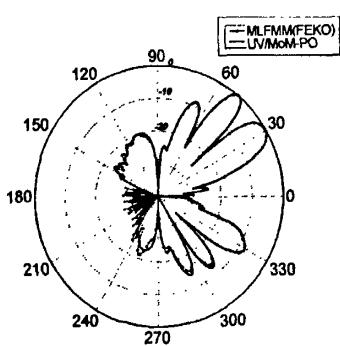


图3 PEC平板附近4元阵的方向图

线阵的方向图产生了畸变,在预设的主瓣方向上反而出现了零陷。

第2个例子为一四元并排偶极子阵位于一导电球附近,如图4所示。导电球半径为 5λ ,天线与球面最近距离为 5λ ,天线单元为同相馈电,幅度则按切比雪夫阵分布,依次为0.576,1.0,1.0,0.576。该算例中,球面剖分为24000个三角面片。图5给出了UV/MoM-PO方法的计算结果,与FEKO软件的计算结果吻合良好。由计算结果可以看出,由于金属球的干扰,天线阵的方向图不再具有切比雪夫性质。从以上两个算例可以看出,载体环境对阵列天线的性能有着重要的影响。为获得理想的天线

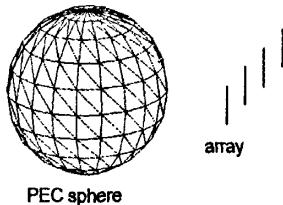


图4 导电球附近的天线阵

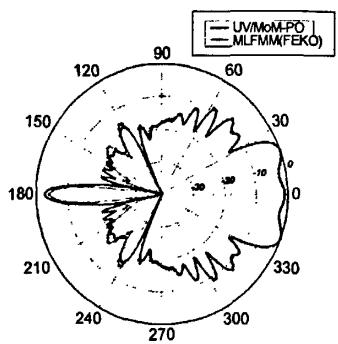


图5 导电球附近四元切比雪夫阵的方向图

阵特性,必须在考虑周围环境的情况下,对天线阵进行优化设计,为此,需要正向分析算法既具有较好的精度,又有很高的计算效率,UV/MoM-PO算法无疑是一种很好的选择。

4 结论

为了解决电大尺寸载体与天线的联合求解问题,人们建立了两类求解技术。一类是高低频混合方法,包括MoM-GTD方法和MoM-PO方法等。另一类是基于积分方程的各种快速算法。在各种快速算法中,UV分解方法是一种较新的技术,它不依赖于格林函数的具体形式,而是利用了远区互作用矩阵的低秩特性,进行加速处理。本文将UV技术引入到MoM-PO方法中,在前期工作的基础上,进一步提高其计算效率,并以此为工具,研究了载体对其附近天线阵性能的影响。通过与商业电磁软件的结果比较,表明本文的算法既具有较好的精度,也具有优异的计算效率。

致谢:本文部分研究工作得到武汉大学国家自然科学基金项目(60671040)的支持,在此表示感谢。

参考文献

- [1] U Jakobus and F M Landstorfer. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1995, 43(2): 162-169.
- [2] F Obelleiro, J M Taboada, and J L Rodriguez. Hybrid moment-method physical-optics formulation for modeling the electromagnetic behaviour of on-board antennas [J]. Microwave Opt Technol Lett., 2000, 27(1): 81-87.
- [3] Zhai Hui-qing, Wang Li-na, Liang Chang-hong. A hybrid method of MoM and PO modified by UTD[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 529-533.
- [4] M X Chen, W Zhao, Y Zhang, et al.. Analysis of antenna around NURBS surface with iterative MoM-PO technique [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2006, 20(12): 1667-1680.
- [5] Zhai, H and C Liang. A simple iterative method for considering multibounce in PO region of MoM-PO [J]. Microwave Opt. Technol. Lett., 2004, 40(2): 110-112.

(下转第314页)

16(4):441-446.

- [8] Jazi, M N Azarmanesh, M N Design and implementation of circularly polarised microstrip antenna array using a new serial feed sequentially rotated technique[C]. IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation, 2006, 153 :133-140.
- [9] 董玉良, 田步宇, 纪奕才. 宽频带双层微带天线研究[J]. 微波学报, 2002, 18(1):43-45.
- [10] C L Mak, K M Luk, K F Lee, et al.. Experimental study of a microstrip patch antenna with an L-shaped probe [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2000, 48 (5):777-782.



付世强 (1981—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事卫星通信和卫星定位移动终端天线研究。



房少军 (1957—), 男, 山东人, 博士生导师, 从事电磁场与微波技术、微波通信和天线的教学与科研, 在国内外发表论文 60 余篇, 出版著作教材 6 部, 目前主要研究方向为微波技术与天线等。

(上接第 295 页)

- [6] J M Song and W C Chew. Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering [J]. Microwave Opt. Technol. Lett., 1995, 10(1): 14-19.
- [7] P Zwamborn, P M van der Berg. The three-dimensional weak form of the conjugate gradient FFT method for solving scattering problems[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 1992, 40(9): 1757-1766.
- [8] G Zhang, L Tsang, and K Pak. Angular correlation function and scattering coefficient of electromagnetic waves scattered by a buried object under a two-dimensional rough surface [J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1998, 15(12): 2995-3002.
- [9] L Tsang, D Chen, P Xu, et al.. Wave scattering with the UV multilevel partitioning method: 1. Two-dimensional problem of perfect electric conductor surface scattering[J]. Radio Science, 2004, 39, RS5010.
- [10] L Tsang, Q Li, P Xu, et al.. Wave scattering with the UV multilevel partitioning method: 2. Three-dimensional problem of nonpenetrable surface scattering [J]. Radio Science, 2004, 39, RS5011.
- [11] 华夷和, 徐金平, 牛臻弋. FAFFA 加速的 PO-MM 研究复杂金属载体上线天线电磁特性[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 2045-2049.
- [12] H T Chen, J X Luo and G Q Zhu. Using UV technique to accelerate the MM-PO method for three-dimensional radiation and scattering problem[J]. Microwave Opt. Technol. Lett., 2006, 48(8): 1615-1618.

- [13] S M Rao, D R Wilton and A W. Glisson electromagnetic scattering by surface of arbitrary shape [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1982, 30(3): 409-418.



陈海涛 (1979—), 男, 湖北人, 工程师, 现为武汉大学电子信息学院博士生, 主要从事电磁理论与天线技术的研究。



罗建新 (1965—), 男, 湖北人, 研究员, 中船重工集团第 722 研究所副总工程师, 主要从事舰船天线理论与工程研究工作。



朱国强 (1959—), 男, 湖北人, 博士, 武汉大学电子信息学院教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论与天线、复杂目标散射特性等领域研究工作。

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>