

· 通信与信息工程 ·

## 导体平台上线天线问题的MoM-PO分析

阙肖峰, 聂在平

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**采用高低频混合技术的混合矩量法-物理光学法(MoM-PO)分析导体平台上的线天线问题;天线与平台上不规则区域采用MoM分析,平台其他部分用PO方法计算。研究了MoM区的选择对计算精度和内存需求的影响,给出了一种考虑PO区域单元间互耦的迭代方法,以此改善PO近似带来的计算误差。分析了典型载体平台上线天线问题,研究了载体上天线的阻抗和辐射特性。数值计算结果和传统MoM结果有较好的吻合。该方法在工程应用中具有较高的实用性。

**关键词** 导体平台; 混合矩量法-物理光学法; 迭代方法; 线天线  
中图分类号 TN820 文献标识码 A

## Hybrid Method of Moment-Physical Optics Modeling Technique for Wire Antennas Mounted on Conducting Objects

QUE Xiao-feng, NIE Zai-ping

(School of Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper presents a hybrid method, which combines Physical Optics (PO) and Method of Moment (MoM) techniques, to analyze the electromagnetic properties of wire antennas mounted on or near electrically large conducting surface with arbitrary shapes. The antenna and the irregular region are divided into MoM region and the other regular and continuous regions analyzed using PO method. An iterative method is proposed to improve the accuracy by considering the coupling among the elements in the PO region. The radiation and impedance properties of wire antennas are analyzed. Numerical examples are illustrated to show the accuracy and high efficiency.

**Key words** conducting platform; hybrid MoM-PO method; iterative method; wire antenna

线天线加载于导体平台上,如飞机、舰船,以及各类通信设备上的线天线问题,具有重要的研究价值。MoM<sup>[1-3]</sup>和FDTD<sup>[4-5]</sup>可以很好地分析复杂载体平台上线天线的辐射问题。传统MoM的局限性在于数值计算中未知量个数将随着目标尺寸的增大急剧增加,不能求解电大尺寸目标。其他快速方法如快速多极子方法(FMM)、多层快速多极子方法(MLFMA)也应用于分析平台上天线的辐射问题<sup>[6]</sup>。基于电流的低频/高频混合方法如MoM-PO方法在研究电大尺寸载体上的天线问题时,有很高的计算效率和较好的计算结果<sup>[7-9]</sup>。本文利用混合电场/磁场积分方程(EFIE/MFIE)的方法建立分析模型,天线与不规则区域建立EFIE,采用MoM分析;平坦规则的载体平台表面建立MFIE,运用PO近似,推导出了各区

域矩阵元素表达式。考察了MoM区域的选择对数值计算精度以及储存量的影响,研究了考虑PO区域单元间互耦时的迭代方法。数值结果验证了方法的正确性和效率。

### 1 混合MoM-PO方法

采用积分方程求解电磁散射与辐射问题时,EFIE可用于求解开域和闭域问题,计算精度高,但收敛较慢;MFIE只能用于求解闭域问题,收敛较快但精度较低,由于一般线天线的细线结构,不能直接采用MFIE,为了同时利用EFIE和MFIE在数值计算上的优点,运用混合EFIE/MFIE方法,在天线与平台上不规则、不连续区域建立EFIE,利用MoM进行分析;其他连续、光滑区域表面建立MFIE,采用高频方法PO近似。如图1所示,导体表面以平面三

收稿日期:2005-09-11

基金项目:自然科学基金重点资助项目(60431010)

作者简介:阙肖峰(1977-),男,在职博士生,主要从事计算电磁学、天线理论与设计等方面的研究。

角形单元剖分, 分别定义 MoM 区和 PO 区 RWG 基函数<sup>[10]</sup>, 两个区域交界线上的三角形单元公共边定义为 MoM 区基函数  $J_s^{\text{MoM}}$ , 因此以基函数定义的两个区域有重叠的部分。

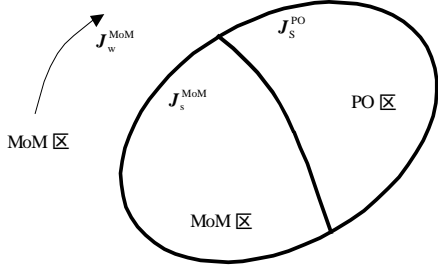


图1 MoM区和PO区的划分

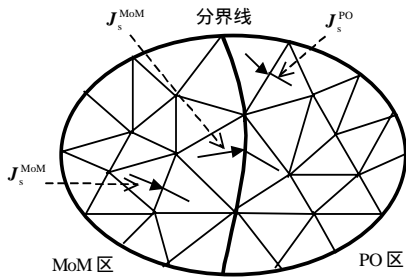


图2 MoM和PO区基函数的定义

根据导体表面边界条件, 建立两个区域表面积分方程为:

$$n \times [E(J_s^{\text{MoM}}) + E(J_s^{\text{PO}}) + E^i] = 0 \quad (\text{EFIE}) \quad (1)$$

$$J_s^{\text{MoM}} + J_s^{\text{PO}} = 2n \times [H(J_s^{\text{MoM}}) + H(J_s^{\text{PO}}) + H^i] \quad (\text{MFIE}) \quad (2)$$

式中  $n$  为导体表面外法向单位矢量;  $J_s^{\text{MoM}}$  只存在于两个区域基函数有重叠的部分, 如图2所示。式(2)运用 PO 近似, 假定几何阴影区中电流为零, 且忽略 PO 区中各单元之间的互耦, 可将式(2)简化为:

$$J_s^{\text{MoM}} + J_s^{\text{PO}} = \begin{cases} 2n \times [H(J_s^{\text{MoM}}) + H^i] & \text{亮区} \\ 0 & \text{阴影区} \end{cases} \quad (3)$$

将电流用基函数展开, 然后利用检验函数对式(1)、

(3)取内积, 可得如下矩阵方程形式<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} Z_{\text{MoM}}^{\text{MoM}} & Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} \\ P_{\text{MoM}}^{\text{PO}} - Z_{\text{MoM}}^{\text{MoM}} & P_{\text{PO}}^{\text{PO}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\text{MoM}} \\ I_{\text{PO}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^{\text{MoM}} \\ V^{\text{PO}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 下标表示该矩阵在 MoM 区或 PO 区定义电流基函数; 上标为相应的权函数所在区。矩阵元素为:

$$z_{\text{MoM/PO}}^{\text{MoM}} = j\omega\mu \int_{S_t} \int_{S_b} f_m^{\text{MoM}} \cdot f_n^{\text{MoM/PO}} g dS_b dS_t + 1/(j\omega\epsilon) \times \int_{S_t} \int_{S_b} (\nabla_s \cdot f_m^{\text{MoM}})(\nabla_s' \cdot f_n^{\text{MoM/PO}}) g dS_b dS_t \quad (5)$$

$$z_{\text{MoM}}^{\text{PO}} = \xi_{mn} \int_{S_t} f_m^{\text{PO}} \cdot n \times \nabla \times \int_{S_b} f_n^{\text{MoM}} g dS_b dS_t \quad (6)$$

$$p_{\text{MoM/PO}}^{\text{PO}} = 0.5 \int_{S_t} f_m^{\text{PO}} \cdot f_n^{\text{MoM/PO}} dS_t \quad (7)$$

式中  $f_n$  和  $f_m$  分别为基函数和权函数;  $S_b$  和  $S_t$  分别为基函数和权函数的积分区域;  $g$  为自由空间格林函数;  $\xi_{mn}$  为单元  $m$ 、 $n$  之间的遮挡因子。PO 区和 MoM 区电流为:

$$I_{\text{PO}} = (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} [V^{\text{PO}} - (P_{\text{MoM}}^{\text{PO}} - Z_{\text{MoM}}^{\text{PO}}) I_{\text{MoM}}] \quad (8)$$

$$[Z_{\text{MoM}}^{\text{MoM}} - Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} (P_{\text{MoM}}^{\text{PO}} - Z_{\text{MoM}}^{\text{PO}})] I_{\text{MoM}} = V^{\text{MoM}} - Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} V^{\text{PO}} \quad (9)$$

通过式(9)先求出 MoM 区未知电流系数  $I_{\text{MoM}}$ , 代入式(8)求得  $I_{\text{PO}}$ 。

## 2 MoM区域选择和基函数的定义

MoM-PO 方法获得较高的计算效率在于采用 PO 近似, MoM 区域选择的大小和位置对计算效率和精度有相当的影响。MoM 区不宜选得过大, 过大会增加存储量, 降低计算效率。MoM 区应包括线天线、近场强耦合区, 平台上不规则的区域; MoM 区也不能选得过小, 过小会影响数值计算结果的精度。如图3所示, 线面连接点附近电流变化剧烈的区域应包括在 MoM 区中, 导体表面和线上分别定义 RWG 基函数和三角基函数, 连接点位于三角形单元节点上, 定义连接单元基函数<sup>[1]</sup>。

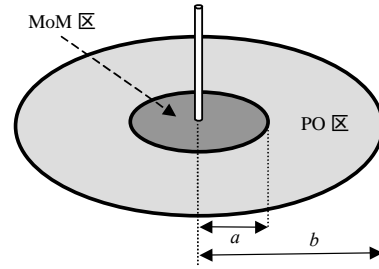


图3 金属圆盘中心单极天线示意图

## 3 MoM-PO迭代方法求解

采用 PO 近似忽略了单元之间互耦, 式(4)没有计算  $Z_{\text{PO}}^{\text{PO}}$ 。这一近似在 PO 条件得到很好满足时能够得到较好的结果。为了得到更高的计算精度, 将采用 MoM-PO 方法得到的  $I_{\text{PO}}$  作为电流初始值, 重新考虑  $Z_{\text{PO}}^{\text{PO}}$  的贡献, 利用迭代方法求解电流分布<sup>[9]</sup>。将式(8)、(9)改写为:

$$[Z_{\text{MoM}}^{\text{MoM}} - Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} (P_{\text{MoM}}^{\text{PO}} - Z_{\text{MoM}}^{\text{PO}})] I_{\text{MoM}}^j = V^{\text{MoM}} - Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} V^{\text{PO}} - Z_{\text{PO}}^{\text{MoM}} (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} Z_{\text{PO}}^{\text{PO}} I_{\text{PO}}^k \quad (10)$$

$$I_{\text{PO}}^{k+1} = (P_{\text{PO}}^{\text{PO}})^{-1} [V^{\text{PO}} - (P_{\text{MoM}}^{\text{PO}} - Z_{\text{MoM}}^{\text{PO}}) I_{\text{MoM}}^j + Z_{\text{PO}}^{\text{PO}} I_{\text{PO}}^k] \quad (11)$$

首先将  $I_{\text{PO}}^0$  代入式(10)求得  $I_{\text{MoM}}^0$ , 再将  $I_{\text{PO}}^0$ 、 $I_{\text{MoM}}^0$  代入式(11)求得  $I_{\text{PO}}^1$ , 依次类推, 直到前后两次迭代

求得的电流相对均方根误差小于门限值则结束迭代。式(10)基于EFIE求解线性方程组,得到天线近场较好的计算精度;式(11)基于MFIE的迭代求解,有较快的收敛特性。同时,以 $I_{PO}$ 作为初始值使收敛过程大大加快。对于实际求解电大尺寸目标,需要结合快速算法加速矩阵矢量相乘计算,减少存储量。上述方程中存在对稀疏矩阵 $P_{PO}^{PO}$ 的求逆,通过在PO区的检验过程中采用点匹配技术,避免了直接求逆过程。

#### 4 数值算例及讨论

本文所有数值计算都在CPU为AMD 2800+的微机完成,单极天线均在线面连接处馈电。

例1 几何模型如图3所示,工作频率为300 MHz。半径为1.5 m的导体圆盘中心放置一根长度为0.25 m、半径为0.001 m的单极天线。图4所示为利用MoM-PO方法计算所得输入阻抗与MoM结果的相对误差,随MoM区半径的增加发生的变化。以连接点为圆心的MoM区半径超过0.4 m时,相对误差小于1%。图5给出了随着半径的增加内存需求和计算时间的变化趋势。图6为比较了不同MoM区半径时计算所得的E面辐射方向图。随着MoM区的增大,计算结果更加接近MoM结果。

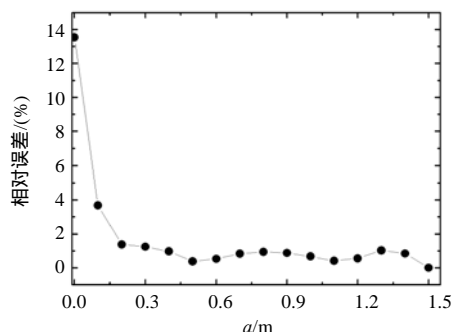


图4 输入阻抗和相对误差随MoM区半径的变化

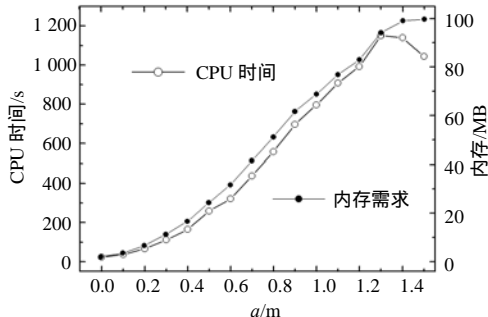


图5 内存需求和计算时间随MoM区半径的变化

例2 如图7所示,一半径为 $0.001\lambda$ 、中心馈电的半波振子位于金属球前。球半径为 $0.5\lambda$ ,馈电点

距球心 $1.5\lambda$ 。用MoM-PO方法进行计算,由于PO近似条件不够好,计算结果有偏差。将MoM-PO方法计算得到的电流值作为初始值,利用式(10)、(11)迭代求解。设定收敛条件为: $\|I_{PO}^{k+1} - I_{PO}^k\| / \|I_{PO}^k\| < \varepsilon_{PO}$ ,且 $\|I_{MoM}^{j+1} - I_{MoM}^j\| / \|I_{MoM}^j\| < \varepsilon_{MoM}$ 。其中,门限值 $\varepsilon_{PO}$ 、 $\varepsilon_{MoM}$ 均设为0.01; $I_{MoM}$ 为严格求解; $I_{PO}$ 通过迭代得到,则对 $I_{PO}$ 多次迭代后再更新一次 $I_{MoM}$ 。迭代计算XOY面方向图如图8所示,与MoM结果非常一致。本文采用的是每进行5次 $I_{PO}$ 迭代才计算一次 $I_{MoM}$ ,总的 $I_{PO}$ 迭代次数为21。

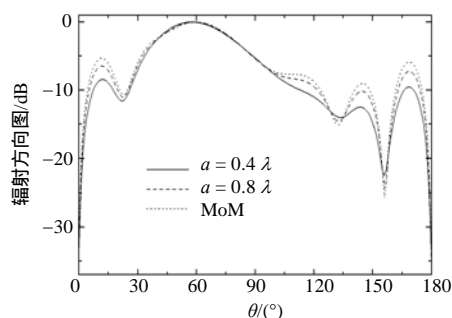


图6 不同MoM区半径计算的辐射方向图

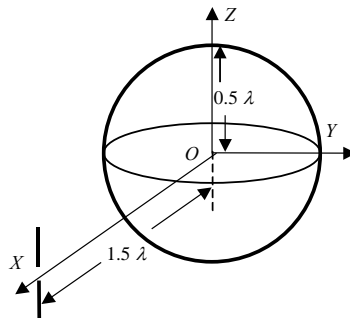


图7 导体球前半波振子示意图

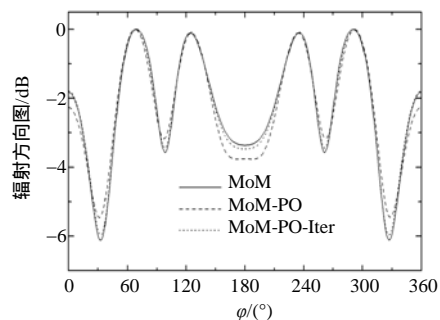


图8 XOY面归一化辐射方向图

例3 长度为 $0.25\lambda$ 、半径为 $0.001\lambda$ 的线天线加载于边长为 $6\lambda$ 的正方形导体平板中心,如图9所示。总的未知量数目为12 212,MoM计算时间为2 800 s,内存需求为1 150 MB;采用MoM-PO方法,选取线面连接点附近半径为 $0.5\lambda$ 圆形区域为MoM区,其他部分为PO区,计算时间为708 s,所需内存

46 MB, 内存需求极大地减少。图10所示为XOZ面的归一化辐射方向图, 在主要辐射方向上MoM-PO方法和MoM计算的结果吻合得很好, 在后瓣辐射方向上有一些差别, 但计算效率大大提高。

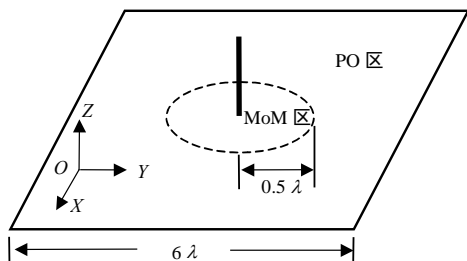


图9 正方形导体平板中心单极天线示意图

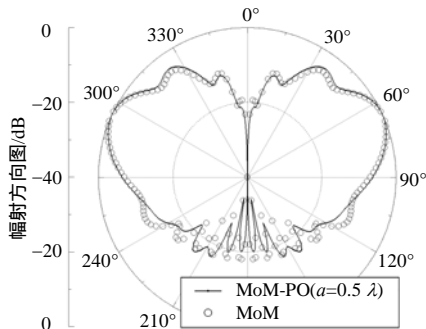


图10 XOZ面归一化辐射方向图

## 5 结束语

本文研究了导体平台上线天线的电磁辐射问题; 利用MoM-PO方法加速计算, 减少存储量, 给出了矩阵方程的一般表达式; 通过合理选择MoM区, 有效地提高计算精度, 降低了对计算机资源的需求; 给出了一类关于PO电流的迭代方法, 改善了PO近似带来的误差。该方法是分析电大尺寸载体上线天线问题简洁、有效的途径。

## 参 考 文 献

- [1] COSTA M F, HARRINGTON R F. Minimization of radiation from computer systems[C]//Int. Electrical Electronics Conference and Exposition Proc. [S.l.]: IEEE Press, 1983: 660-665.
- [2] MATTHEWS J C G, COOK G G. An efficient method for attaching thin wire monopoles to surfaces modeled using triangular patch segmentation[J]. IEEE Trans-AP, 2003, 51(7): 1623-1629.
- [3] 万继响, 张 玉, 梁昌洪. 任意导体与线天线连接问题的 MoM分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 523-528.
- [4] 傅友华, 王敏锡. R-FDTD法计算圆柱形单极天线辐射场[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(2): 195-198.
- [5] 闫玉波, 李清亮. 复杂载体短波天线特性的FDTD模拟与分析[J]. 电波科学学报, 2004, 19(2): 135-142.
- [6] CHAO H Y, ZHAO J S, CHEW W C. Application of curvilinear basis functions and MLFMA for radiation and scattering problems involving curved PEC structures[J]. IEEE Trans-AP, 2003, 51(2): 331-336.
- [7] JAKOBUS U, LANDSTORFER F M. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape[J]. IEEE Trans-AP, 1995, 43(2): 162-169.
- [8] DJORDJEVIC M, NOTAROS B M. Higher order hybrid method of moments-physical optics modeling technique for radiation and scattering from large perfectly conducting surfaces[J]. IEEE Trans-AP, 2005, 53(2): 800-813.
- [9] RICHARD E H, YAHYA R S. An iterative current-based hybrid method for complex structures[J]. IEEE Trans-AP, 1997, 45(2): 265-276.
- [10] RAO S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Trans-AP, 1982, 30(5): 409-418.

编辑 黄 莘