

MoM-NPO 混合算法分析天线-载体系统

张浩斌^{①③} 杜建春^② 聂在平^③

^①(电子科技集团公司 29 所重点实验室 成都 610036)

^②(电子科技集团公司 29 所宽带天馈研究部 成都 610036)

^③(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 安装在电大尺寸平台上的天线，载体的影响不容忽视。采用同样基于电流展开的矩量——物理光学混合算法，并通过 NURBS 物理光学法进一步降低复杂结构的建模和计算，将载体对天线的影响用物理光学电流合并到包括天线的在内较小的矩量法区，使矩量法解决天线-载体系统成为可能。通过矩量法和混合算法分析载体对天线性能的影响证明，载体对天线的影响是显著的，混合算法能够在保证精度的前提下提高运算速度，为解决电大尺寸载体上天线的特性提供了良好的途径。

关键词 天线，载体平台，矩量法，物理光学法，非均匀有理 B 样条

中图分类号：TN820.8

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2006)09-1731-04

Analyzing Antenna-Plateform System with Hybrid MoM-PO Method

Zhang Hao-bin^{①③} Du Jian-chun^② Nie Zai-ping^③

^①(National Laboratory of EW, Chengdu 610036, China)

^②(The 29th Institute of ESTC, Chengdu 610036, China)

^③(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Influence of electrical large platform on antennas can not be ignored when designing effective electric system. In this article, a hybrid technique, which combines two current-based method: Method of Moment(MoM) and Physical Optics(PO), is preferred to take the platform effects into account through PO current when solving the antenna by MoM , and the NURBBS-PO is applied further to reduce the complexity of modeling and computation, thereby making it impossible to solve the antenna-platform system through MoM. The analyzing results of MoM and hybrid technique show that the effects of platform is obvious, while the hybrid technique is accurate enough and spare great computational time and storage, providing a good access to solve the EM characters of antennas on electrical large carrier.

Key words Antennas, Platform-carrier, Method of Moment(MoM) Physical Optics(PO), Non-Uniform Reasonable B-Spline (NURBS)

1 引言

天线作为各类电子系统辐射和接收电磁能量的孔径，其性能不仅取决于天线本身，和承载天线的平台环境也息息相关，如载体平台的散射效应、平台对天线辐射的遮挡效应，其他天线的耦合效应等等，都直接影响天线能否在复杂的载体环境中表现出良好的性能，必须综合考虑载体对天线的效应才能建立有效的天线系统。载体效应可以通过试验测量得到，但试验不仅成本高，而且难以从复杂环境中的测量结果分析改进天线或平台结构的有效措施。因此，从理论和数值分析的角度预测载体对天线的效应，是设计载体平台上天线系统的重要措施。但目前计算机的容量和速度都还受到了很大的限制，从整体上分析天线及电大尺寸结构的飞机、舰船、

导弹等载体的电磁特性，还具有相当的难度。

要分析电大尺寸载体平台对天线的影响，一是采用低频和高频混合算法^[1-3]，前者如矩量法(MoM)，精确的分析电小尺寸的天线结构；后者则适合分析电大尺寸的载体，如物理光学法(PO)，几何绕射理论(GTD)，通过光学近似来降低分析的难度；二是从方法本身上进行加速，如基于快速多极子的矩量法，采用 NURBS 曲面的 PO 和 UTD 法^[4,5]，最大限度地降低建模需要的网格划分单元，降低分析各单元及单元间相互影响的所需的运算。目前，NURBS 建模的高频近似多直接用于 RCS 计算，本文采用矩量法和基于 NURBS 曲面的 PO 混合算法分析天线在载体上的特性，采用 NURBS 建模进一步简化物理光学区的计算，为分析电大尺寸的载体提供了良好的途径。通过算例模拟表明，相对矩量法，文中提出的混合算法能够在保证精度的前提下，极大地降低存储

量, 提高了运算速度。

2 MoM-PO 混合算法

采用混合算法之前, 首先在复杂的电磁模型上划分出不同方法的求解区域, 如图所示 1 所示, 包围天线(十字)的虚线范围为 MoM 求解域, 外部为物理光学区。MoM 区域的电流可以展开为

$$\mathbf{J}^{\text{MoM}} = \sum_{n=1}^{N_1} a_n \mathbf{f}_n \quad (1)$$

N_1 为 MoM 区电流基函数的个数, \mathbf{f}_n 为电流基函数, a_n 为矩法电流基函数的系数。相应的 PO 区电流可以表示为

$$\mathbf{J}^{\text{PO}} = \sum_{n=N_1+1}^N b_n \mathbf{f}_n \quad (2)$$

N 为整个模型上的基函数的个数, b_n 为 PO 电流基函数的系数根据物理光学的高频假设,

$$\mathbf{J}^{\text{PO}}(\mathbf{r}) = 2\hat{n}\delta_i \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^{N_1} 2a_n \hat{n}\delta_M \times L^H(\mathbf{f}_n(\mathbf{r})) \quad (3)$$

第一项为外加的照射波($\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i$)在 PO 区产生的电流, 第二项为 MoM 区在 PO 区产生的电流, 算子 $L^H(\cdot)$ ^[6] 为电流在 \mathbf{r} 处的辐射磁场, 算子 $L^E(\cdot)$ ^[6] 为电流在 \mathbf{r} 处的辐射电场。 δ_i, δ_M 为照射源和场点 \mathbf{r} 之间的遮挡因子,

$$\delta_{i,M} = \begin{cases} 0, & \text{有遮挡} \\ 1, & \text{无遮挡} \end{cases} \quad (4)$$

若模型为理想导体(PEC), 可由 PEC 上的电场切向量为 0 的边界条件得:

$$L^E(\mathbf{J}^{\text{MoM}})_{\tan} + L^E(\mathbf{J}^{\text{PO}})_{\tan} = \mathbf{E}_{i,\tan} \quad (5)$$

依据式(3)各区域间的电流关系, 可以进一步把 I_{PO} 转换为外加磁场和 \mathbf{J}_{MoM}

$$\begin{aligned} & L^E(\mathbf{J}^{\text{MoM}})_{\tan} + (L^E(2\delta_M \hat{n} \times L^H(\mathbf{J}^{\text{MoM}})))_{\tan} \\ &= \mathbf{E}_{i,\tan} - L^E(2\delta_i \hat{n} \times \mathbf{H}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

通过矩量法可将式(6)转换为矩阵形式:

$$[\mathbf{z}_{mn}] [\mathbf{a}_m] = [\mathbf{v}_m] \quad (7)$$

式(6)将 MoM 区从整个模型中分离出来, 求解式(6)就能得到天线系统受载体影响的电流特性, 极大缩减了求解的范围, 并进一步从式(3)得到 \mathbf{J}^{PO} 及其对 MoM 区域的影响。可见, 高低频混合算法从一定程度上降低了计算量, 分析的关键集中在两个方面: (1)矩法区域的求逆; (2)MoM 区和 PO 区的相互作用。因为目前矩量法和物理光学法都是基于平面片的建模结构, 为了使模型更接近于实际情况, 需要采用很多的面片, 特别是对于曲面和复杂的结构, 因此需要对大量

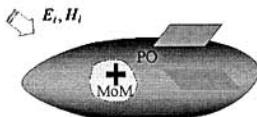


图 1 混合算法模型

Fig.1 Model of hybrid method

的单元及单元间的相互作用进行分析, 从而使运算量急剧的增大, 因此, 通过合理的单元设置精确建模成为进一步分析电大结构的瓶颈。NURBS 建模技术作为工业设计和制造的标准, 采用较少的单元可以更加精确地模拟非平面的结构, 而且不会引入人为的棱边。因此, 采用 NURBS 技术来构建电大尺寸的 PO 区, 将能进一步降低计算量。

3 NURBS-PO 技术

非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面常作为设计和存储模型的曲面, 为了数值计算提取几何信息的便利, 采用 Cox-De Boor 算法^[7]将 NURBS 面分解为有理 Bezier 曲面:

$$r(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} b_{ij} B_i^m(u) B_j^n(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{ij} B_i^m(u) B_j^n(v)} \quad (8)$$

b_{ij} 是 Bezier 曲面的控制点, w_{ij} 是控制点的权, $B_{i,j}^m(\cdot)$ 为波恩斯坦多项式。Bezier 曲面的个数决定于 NURBS 面的节点向量, 根据形状可以分为: 多边形平面、曲边平面、直纹面和一般曲面, NURBS 面的效应就等效为这些 Bezier 的和。

PO 法的关键是阴影区的判断及电流辐射场的计算, 只有当源和场点之间无遮挡时, 才需要考虑物理光学效应。一种遮挡是当源从曲面背后照射时, 曲面自身形成的遮挡。由于曲面的法向量在不断变化, 可能部分曲面在照明区, 部分在阴影区, 因此相对面片结构的遮挡判断要复杂一些。实际上由于曲面的散射中心只在一些关键的位置上, 只需要考虑这些散射中心是否存在遮挡就可以了。另一种遮挡是当散射中心被模型的其他部分遮挡, 需要将形成遮挡的 NURBS 曲面边沿入射方向投影到被遮挡的面上, 和被遮面形成交叠的部分则构成了遮挡区。

当场和源之间无遮挡时, Bezier 面的 PO 电流贡献可表示为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \iint_S [(2\hat{n} \times \mathbf{H}_i) \times \hat{r}_s] e^{-jk\hat{r}_s} dS \quad (9)$$

r 为原点到场点的矢径, \hat{r}_s 为原点到源点的矢径, $r = |\mathbf{r}|$ 为原点到场点的距离, \hat{n} 为源点的单位法向量, \hat{r}_s 为向量 $\mathbf{r} - \mathbf{r}_s$ 的单位方向向量。采用双参形式的 Bezier 面, 积分变量为

$$\hat{n}(u,v)dS = \frac{\partial}{\partial u} \mathbf{r}_s \times \frac{\partial}{\partial v} \mathbf{r}_s du dv \quad u, v \in [0,1] \quad (10)$$

从而式(10)可以表示为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \iint_0^1 A(u,v) e^{-jk[r_s(u,v) + r_t(u,v)]} du dv \quad (11)$$

直接采用数值方法进行二重积分的运算量非常大, 因此首先在曲面上选择一个曲率半径较大的参数方向(设为 u), 保证 A 的幅度变换较小, 采用稳相近似法^[7]推导得到该方向上的积分式(12)。 f', f'' 为关于 u 的一阶、二阶的偏导数, F 为几何绕射理论的过渡函数, u_0 满足 $f'(u_0(v), v) = 0$,

$\delta = -\operatorname{sgn}[f''(u_0, v)]$, $\tau_0 = -\operatorname{sgn}|u_0|$, $\tau_1 = -\operatorname{sgn}|u_0 - 1|$, U 为单位阶跃函数。从而得到关于参数 v 在 $[0, 1]$ 区间上的曲线积分, 通过一维数值积分即得到 J^{PO} 在任意位置的辐射场, 用新的 L^E 算子代替平面 J^{PO} 的算子, 构造起 NURBS 建模的混合 MoM-NPO 算法。

$$\begin{aligned} & \int_0^1 A(u, v) e^{-jkf(u, v)} du \\ &= e^{-j\delta\pi/4} A(u_0, v) \sqrt{\frac{2\pi}{kf''(u_0, v)}} \{U(u_0 - U(u_0 - 1)\} \\ &+ \delta\tau_0 e^{-jkf(0, v)} A(u_0, v) \frac{F\{k[f(0, v) - f(u_0, v)]\} - 1}{jk\sqrt{2|f''(u_0, v)(f(0, v) - f(u_0, v))|}} \\ &+ \delta\tau_1 e^{-jkf(1, v)} A(0, v) \frac{1}{jk|f'(0, v)|} \\ &- \delta\tau_1 e^{-jkf(1, v)} A(u_0, v) \frac{F\{k[f(1, v) - f(u_0, v)]\} - 1}{jk\sqrt{2|f''(u_0, v)(f(1, v) - f(u_0, v))|}} \\ &- \delta\tau_1 e^{-jkf(1, v)} A(1, v) \frac{1}{jk|f'(1, v)|} \end{aligned} \quad (12)$$

4 算例

如图 2 所示, $h = \lambda/2$ 的单极子安装在长、宽均为 $a = 5\lambda$ 的导体板上, 板分别为平面、 90° 、 180° 的柱面。天线和尺寸为 b 的部分导体板选作矩量区, 其他部分作为物理光学区。图 3 为不同形状载体上, δ -源激励天线在 $x-z$ 面的辐射场特性, 结果表明, 由于载体的二次辐射作用, 载体上天线的特性和天线单独的特性是明显不同的, 因此在飞机、舰船等平台上的天线系统, 单独考虑天线的特性是不够的, 必须将天线和载体作为统一的整体进行分析, 从而设计有效的天线系统。

进一步分析矩量法、矩量法-PO 混合法以及矩量法-NURBSPO 法计算模型所需的时间, 内存分配和天线阻抗(表 1 所示)。可见, 分析相同的模型, 矩量法所需的时间和存储量远远高于混合算法, 要将实际电大尺寸的载体和天线

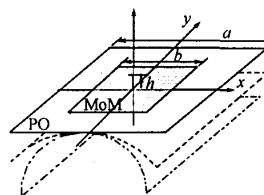


图 2 不同载体上的天线模型

Fig.2 Antenna on different platform carrier

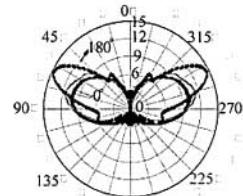


图 3 不同载体上天线的特性比较

Fig.3 Characters of antenna on different platform carrier

作为整体进行分析是不可能的。比较不同矩量区和物理光学区的划分结果, 物理光学区域越大, 所需的计算时间和存储量越少; 但从阻抗特性可见, 光学区越大, 依赖于精确电流分布的天线特性精确性越差, 但对于远区方向性等特性, 混合算法则具有足够的精度。

为了进一步验证算法的有效性, 建立如图 4 所示的飞机模型, 若单元上每波长划分 6 个单元, 离散矩阵为 22431×22431 , 单纯的矩量法已经不能承受模型的运算量。分别采用 MoM-PO 和 MoM-NPO 法分析靠近机翼的单极子天线的方向性。结果表明(图 5: $y-z$ 面的方向性, 图 6: $x-y$ 面方向性), 两者得到的远区特性基本相同, MoM-PO 的占据的存储为 436MB, 运行时间为 3212.3s, MoM-NPO 占据的存储为 237MB, 运行时间为 1207.3s。随着模型的复杂化, MoM-NPO 建模上的优势使的运算量得到了降低, 也使分析更大电尺寸的载体成为可能。

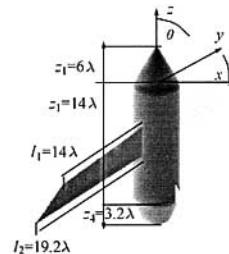


图 4 复杂载体上的天线模型 z

Fig.4 Model of antenna on complicate platform

表 1 不同算法的比较
Tab.1 Comparison among different methods

		平板	90°柱面	180°柱面
MoM	时间(s)	784.6	784.6	784.6
	存储(MB)	178	178	178
	阻抗(Ohm)	$41.86+j18.47$	$42.71+j 17.57$	$43.58+j17.38$
MoM-PO1 $a=3\lambda$ $b=5\lambda$	时间(s)	234.3	234.3	234.3
	存储(MB)	106	106	66.9
	阻抗(Ohm)	$41.56+j 17.66$	$42.51+j 16.59$	$43.2+j16.3$
MoM-PO2 $a=0.5\lambda$ $b=5\lambda$	时间(s)	16.562	16.562	16.562
	存储(MB)	6.42	6.42	6.42
	阻抗(Ohm)	$40.6+j *17.7$	$39.4+j 19.97$	$40.8+j 21$
MoM-NPO	时间(s)	7.13	4.21	4.21
	存储(MB)	0.75	0.63	0.63
	阻抗(Ohm)	$39.2+j 18.3$	$37.6+j 26.89$	$37.2+j 25.8$

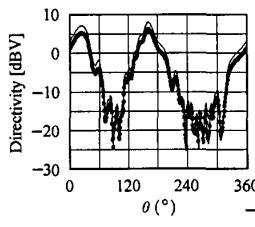


图 5 x - z 面的方向性比较
Fig.5 Directivity on x - z plane

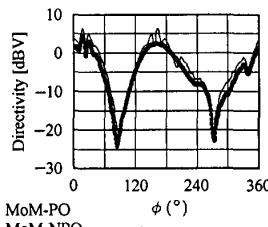


图 6 x - y 面的方向性比较
Fig.6 Directivity on x - y plane

5 结束语

本文采用 MoM-NURBSPO 混合算法分析了安装电大尺寸载体上的天线。通过高低频混合算法, 将高频区电大尺寸的载体的影响归入较小的 MoM 天线求解区域, 并通过 NURBS 建模高频频进一步简化运算, 为分析天线-载体系统提供了良好的途径。算例表明, 载体对天线特性的影响是不可忽视的, 混合算法分析电大尺寸的载体在保证精度的前提下, 极大地节省运算量和时间。算法中没有考虑 PO 区内单元之间的互耦, 还需进一步地分析以提高计算精度。

参 考 文 献

- [1] Jakobus U, Landstorfer F M. Hybrid MM/PO-Fock analysis of monopole antennas mounted on curved convex bodies. Proc. Of 12th Annual Review of Progress in Applied computational Electromagnetics. Monterey, 1996: 101–108.
- [2] 唐松, 彭宏利, 刘其中. 电大尺寸导体上背腔式微带天线散射的混合法. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(4): 562–564.
- [3] Wei X C, Li E P. Wide-band EMC analysis of On-platform antennas using impedance-matrix interpolation with the moment method-physical optics method. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 2003, 45(3): 552–556.
- [4] Pérez J, Cátedra M F. Application of Physical Optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1994, 42(10): 1404–1411.
- [5] Domingo M, Rivas F, Perez J, Torres R P. Computation of the RCS of complex bodies modeled using NURBS surfaces. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, 37(6): 36–47.
- [6] 易义军, 唐良宝等. MoM-PO混合方法在电磁散射问题中的应用. 桂林电子工业学院院报, 2004, 24(6): 26–29.
- [7] Perez J, Cátedra M F. RCS of electrically large targets modeled with NURBS surfaces. *Electronics Letters*, 1992, 28(12): 1119–1121.
- [8] Conde O M, Pérez J, Cátedra M F. Stationary phase application for the analysis of radiation of complex 3-D conducting surfaces. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2001, 49(5): 724–731.

张浩斌: 男, 1976年生, 博士后, 主要研究方向为复杂目标的电磁散射特性及隐身技术研究.

杜建春: 男, 1963年生, 研究员, 主要从事电子战领域的宽带天线系统设计.

聂在平: 男, 1946年生, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂非均匀媒质中电磁散射逆散射、计算电磁学、宽带天线、智能天线技术等研究.

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>