

# PO-MoM 结合近场预条件技术 分析复杂载体上线天线辐射特性

牛臻弋 王文博 徐金平

(东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘要:**提出了一种将近场预条件技术与物理光学-矩量法(PO-MoM)相结合的新技术,并应用于分析电大尺寸复杂载体上线天线的辐射问题.根据PO-MoM方法导出系数矩阵元素的物理意义,忽略PO区的影响,构造出一个稀疏化系数矩阵的近似阵.采用LDU分解和简化的分块Gauss消元算法,快速构造出一个矩阵分解形式的预条件阵.将该预条件阵用于预条件广义最小留数(GMRES)法迭代求解线性方程组,对一个复杂金属载体上的线天线辐射问题进行了分析,验证了此方法的有效性和正确性.在此基础上,计算了一个尺度与真实尺寸相当的舰船模型上超短波天线的远场辐射特性.数值结果表明,采用该技术可以快速有效地分析舰船、飞机等真实移动平台上线天线的辐射特性.

**关键词:**预条件;PO-MoM;复杂载体;线天线;GMRES

**中图分类号:**TM154.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0505(2005)04-0514-05

## Analysis of radiation behavior of wire antennas mounted on complex platforms by hybrid PO-MoM method in conjunction with near-field preconditioning technique

Niu Zhenyi Wang Wenbo Xu Jinping

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** By combining the near-field preconditioning technique with hybrid physical optics-method of moments (PO-MoM), a novel technique is proposed for analyzing the radiation problems of wire antennas mounted on complex platforms with electrically large size. Based on the physical meaning of the elements in the coefficient matrix deduced from PO-MoM and neglecting the effect of PO-region, a sparse approximate matrix of the coefficient matrix is constructed. Then, a preconditioner with a decomposed matrix form is built easily by LDU (lower-diagonal-upper) decomposition and a simplified blocked Gauss elimination algorithm. The preconditioner is applied to preconditioned generalized minimal residual (GMRES) method to iteratively solve the system of linear equations. The efficiency and exactness of the proposed technique is validated by analyzing a radiation problem of wire antennas mounted on a complex metal platform. Furthermore, the radiation patterns in far field of an ultra-shortwave antenna mounted on a ship model with the comparative size as real ones are calculated. Numerical results show that the technique is suitable for the fast and efficient analysis of radiation behavior of wire antennas mounted on the real mobile platforms of ships, planes, etc.

**Key words:** preconditioning; physical optics-method of moments (PO-MoM); complex platform; wire antenna; generalized minimal residual (GMRES)

在现代舰船、飞机以及卫星等真实移动平台

上,电子系统种类繁多,天线工作环境复杂.为了准确分析天线的辐射特性,实现良好的电磁兼容性,需要准确分析载体对天线性能的影响.矩量法<sup>[1]</sup>已被证明是分析这类问题的一种可靠的低频

数值方法。但是,矩量法计算复杂度较高。随着目标电尺寸的增大,单纯的矩量法难以快速有效地分析这类问题。而高频方法建模简单,但是对复杂结构求解精度不高。基于 RWG 基函数<sup>[2]</sup>展开的 PO-MoM 混合方法是目前一种非常流行的高低频混合方法<sup>[3~7]</sup>。该方法可保证 MoM 区和 PO 区交界处的电流连续性。运用该方法分析复杂载体上天线辐射问题时,通常将天线及其附近一定范围的区域划为 MoM 区,做精确分析;将其他区域划入 PO 区,做近似分析。这样,可在满足一定精度的条件下,大大节省计算中的内存和 CPU 需求。

为了提高计算速度,MoM 区要取得尽可能小,但是为了保证足够的计算精度,MoM 区不能划分得太小。随着 MoM 区的扩大,未知元数目增多。一般来说,PO-MoM 所导出的方程组的稠密系数矩阵的谱特性较差,而未知元的增多将使其特性变得更差,这将严重影响方程组的迭代求解收敛速度。预条件方法是用来改善系数矩阵性态以加速方程组迭代求解的常用方法。用于加速 MoM 所导出的方程组迭代求解的预条件方法已有大量报道<sup>[8~11]</sup>,但是专门用于加速 PO-MoM 所导出的方程组迭代求解的预条件方法尚未见报道。

本文基于 PO-MoM 导出的系数矩阵元素的物理意义,提出了一种近场预条件器构造方案。首先忽略 PO 区影响,并根据 MoM 区基函数间的距离,对表示 MoM 区内部相互作用的矩阵进行稀疏化,构造系数矩阵的近似阵。在此基础上,采用 LDU 分解和简化分块 Gauss 消元算法,构造出一个矩阵分解形式的预条件阵。将该预条件阵用于预条件 GMRES 法<sup>[12]</sup>迭代求解线性方程组的过程,对不同载体上线天线辐射问题进行了求解。数值结果表明,采用该方法可有效加快分析大型复杂载体上天线辐射特性时方程组的迭代求解收敛速度。

### 1 PO-MoM 基本原理

应用 PO-MoM 分析电大尺寸 PEC 目标的辐射问题时,将目标表面划分为 MoM 区和 PO 区,天线及其附近区域划入 MoM 区,其他区域为 PO 区。在 MoM 区和 PO 区分别应用电场积分方程(EFIE)和磁场积分方程(MFIE),并将感应电流用基函数展开,则有<sup>[3,7]</sup>

$$\mathbf{n} \times \left[ \sum_{n=1}^M \alpha_n \mathbf{L}^e \mathbf{f}_n + \sum_{k=1}^N \gamma_k \mathbf{L}^h \mathbf{f}_k \right] = -\mathbf{n} \times \mathbf{E}^{\text{inc}} \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{\text{MM}} \quad (1)$$
$$\mathbf{J}^{\text{PO}}(\mathbf{r}) = 2\delta_r \mathbf{n} \times \mathbf{H}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) + 2 \sum_{n=1}^M \alpha_n \delta_{r,n} \mathbf{n} \times \mathbf{L}^h \mathbf{f}_n$$

$$\mathbf{r} \in \Gamma_{\text{PO}} \quad (2)$$

式中,电场积分算子  $\mathbf{L}^e(\mathbf{J}) = \text{j}\omega\mu \int_{\Gamma} \bar{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') \text{d}S'$ ; 磁场积分算子  $\mathbf{L}^h(\mathbf{J}) = \int_{\Gamma} \mathbf{K}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \nabla' \bar{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \text{d}S' (\mathbf{E}^{\text{inc}}, \mathbf{H}^{\text{inc}})$  为外界入射场,  $\mathbf{n}$  为目标表面外单位法向向量,  $\delta_r$  和  $\delta_{r,n}$  为遮蔽因子,  $\mathbf{J}^{\text{PO}}$  为 PO 区感应电流,  $M$  和  $N$  分别表示 MoM 区和 PO 区中基函数的个数,  $\bar{\mathbf{Q}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  和  $\mathbf{K}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  分别表示自由空间并矢格林函数和标量格林函数,  $\alpha_n$  和  $\gamma_k$  分别为 MoM 区和 PO 区的电流展开系数,波数  $k = 2\pi/\lambda$ 。

PO 区中  $\mathbf{J}^{\text{PO}}$  的展开系数不必通过直接求解方程得到。采用文献[3]中方法,引入一对位于第  $k$  个基函数公共边中点且垂直于公共边的单位矢量  $\mathbf{t}_k^{\pm}$ ,如图 1 所示。由 RWG 基函数性质有

$$\gamma_k = \frac{1}{2}(\mathbf{t}_k^+ + \mathbf{t}_k^-) \cdot \mathbf{J}^{\text{PO}}(\mathbf{r}_k) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

代入式(2),有  $\gamma_k = \tau_k + \sum_{n=1}^M \tau_{k,n} \alpha_n$ , 其中  $\tau_k = \delta_k(\mathbf{t}_k^+ + \mathbf{t}_k^-) \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{H}^{\text{inc}}$ ,  $\tau_{k,n} = \delta_k(\mathbf{t}_k^+ + \mathbf{t}_k^-) \cdot \mathbf{n} \times \mathbf{L}^h(\mathbf{f}_n)$ , 因此式(1)可写成

$$\sum_{n=1}^M \mathbf{n} \times \alpha_n (\mathbf{L}^e \mathbf{f}_n + \sum_{k=1}^N \tau_{k,n} \mathbf{L}^h \mathbf{f}_k) = -\mathbf{n} \times (\mathbf{E}^{\text{inc}} + \sum_{k=1}^N \tau_k \mathbf{L}^h \mathbf{f}_k) \quad (4)$$

用 Galerkin 法求解该方程,可得如下方程:

$$(\mathbf{Z}_e^{\text{MM,MM}} + \mathbf{Z}_e^{\text{MM,PO}} \boldsymbol{\tau}_k) \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{V}_e - \mathbf{Z}_e^{\text{MM,PO}} \boldsymbol{\tau}_k \quad (5)$$

式中  $\mathbf{Z}_e^{\text{MM,MM}}(m,n) = \mathbf{f}_m \cdot \mathbf{L}^e(\mathbf{f}_n)$ ,  $\mathbf{Z}_e^{\text{MM,PO}}(m,k) = \mathbf{f}_m \cdot \mathbf{L}^h(\mathbf{f}_k)$ ,  $\mathbf{V}_e = \mathbf{f}_m \cdot \mathbf{E}^{\text{inc}}$ ,  $m, n = 1, 2, \dots, M$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ 。对于天线辐射问题,方程(5)右端第 2 项为零。

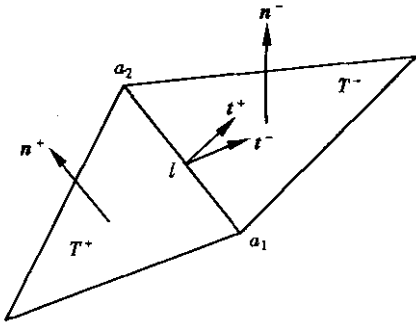


图 1 RWG 基函数上的辅助矢量

### 2 预条件器的构造

式(5)所示的线性方程组的系数矩阵为稠密

满秩矩阵 ,通常采用迭代方法求解该方程. 基于 Krylov 子空间正交序列的 GMRES 等非稳态迭代方法是求解这类方程组的有效方法. 迭代方法的求解收敛速度由系数矩阵的条件数决定 ,条件数越大 ,方程组迭代求解的收敛速度越慢. 一般而言 ,由 EFIE 导出的线性方程组的系数矩阵的条件数较大 ,而且条件数随未知量的增长而增大. 因此通过预条件方法对系数矩阵进行变换以改善其谱特征成为一种常用的技术手段. 可将方程 ( 5 ) 简写成如下形式 :

( Z<sub>e</sub><sup>MM MM</sup> + ΔZ<sup>MM MM</sup> )α = V<sub>e</sub> ( 6 )

式中 ΔZ<sup>MM MM</sup> = Z<sub>e</sub><sup>MM PO</sup>τ<sub>k n</sub>. 左端第 1 项表示 MoM 区内部的相互作用 ,第 2 项表示 PO 区与 MoM 区间的相互作用. 由于在积分方程的积分核中存在奇异项 e<sup>-jk|r-r'|</sup>/|r-r'| 及其高阶项 ,该奇异项随场点 r 和源点 r' 间距离的增大而振荡衰减. 因此方程 ( 6 ) 的系数矩阵的谱特征主要由左端具有强烈奇异性的第 1 项决定 ,而第 2 项可看作对第 1 项的修正. 在构造预条件阵时 ,可忽略第 2 项的贡献. 下面将 Z<sub>e</sub><sup>MM MM</sup> 简记为 Z.

积分方程离散化时 ,在载体表面、天线上和线面连接处分别采用 RWG 基函数<sup>[2]</sup>、分段正弦基函数<sup>[1]</sup>和一种能够保持线面连接处电流连续性的基函数<sup>[13]</sup>. 通常情况下 ,与载体部分对应的未知元数目相比 ,天线和线面连接处部分对应的未知元数目较少 ,可不对其做近似处理而直接计算 ,这对总的计算效率影响较小. 分块形式的系数阵可表示为

Z = [ Z<sub>ss</sub> Z<sub>sw</sub> Z<sub>sj</sub> ; Z<sub>sw</sub><sup>T</sup> Z<sub>ww</sub> Z<sub>wj</sub> ; Z<sub>sj</sub><sup>T</sup> Z<sub>wj</sub><sup>T</sup> Z<sub>jj</sub> ] → [ Z<sub>1</sub> U ; U<sup>T</sup> Z<sub>2</sub> ]

Z<sub>1</sub> = Z<sub>ss</sub> , U = [ Z<sub>sw</sub> Z<sub>sj</sub> ] , Z<sub>2</sub> = [ Z<sub>ww</sub> Z<sub>wj</sub> ; Z<sub>wj</sub><sup>T</sup> Z<sub>jj</sub> ] ( 7 )

式中 Z<sub>ss</sub> Z<sub>sw</sub> Z<sub>sj</sub> Z<sub>ww</sub> Z<sub>wj</sub> 和 Z<sub>jj</sub> 分别表示面元之间、面元-线元间、面元-线面连接处、线元之间、线元-线面连接处和线面连接处单元之间的相互作用子矩阵. 然后做如下分块 LDU 分解

Z = [ Z<sub>1</sub> U ; U<sup>T</sup> Z<sub>2</sub> ] = [ I 0 ; 0 I ] [ I Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> U ; 0 ( Z<sub>2</sub> - U<sup>T</sup> Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> U ) ] ( 8 )

则 Z 的逆阵为

Z<sup>-1</sup> = [ I - Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> U ; 0 I ] [ Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> 0 ; 0 ( Z<sub>2</sub> - U<sup>T</sup> Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> U )<sup>-1</sup> ] .

[ I 0 ; - U<sup>T</sup> Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> I ] ( 9 )

通过上述过程 ,可将系数矩阵中与载体部分对应的具有对角占优特性的子阵 Z<sub>1</sub> 的逆阵 Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> 分离出来.

与积分方程积分核的奇异性相应 ,对积分方程应用 Galerkin 方法进行离散后得到的矩阵方程元素模值大小随着 R<sub>mn</sub> 的增大而以 1/R<sub>mn</sub> 衰减 ,其中 R<sub>mn</sub> 表示第 m 个和第 n 个基函数间的距离. 所以可根据基函数间的距离 ,对 Z<sub>1</sub> 阵进行稀疏化. 另外 ,由于 Z<sub>1</sub> 阵具有对称对角占优特性 ,所以与其逆阵 Z<sub>1</sub><sup>-1</sup> 具有类似的矩阵分布. 下面给出对 Z<sub>1</sub> 阵稀疏化并进行近似求逆的过程. 同样 ,为简化记号 ,在下述过程中将 Z<sub>1</sub> 简记为 Z.

1 ) 根据 RWG 基函数单元间的距离 ,按照图 2 所示关系将矩阵分解为 2 部分 :

Z = Z<sup>n</sup> + Z<sup>f</sup> ( 10 )

式中

Z<sub>mn</sub><sup>n</sup> = { Z<sub>mn</sub> R<sub>mn</sub> ≤ ε ; 0 其他 ( 11 )

这样就可以得到一个稀疏化矩阵 Z<sup>n</sup> ,是由阻抗矩阵中场点单元和源点单元间距离小于阈值距离 ε 的阻抗矩阵元素所构成的. 记 Z<sup>n</sup> 的非零元素分布集合为 S<sub>1</sub>.

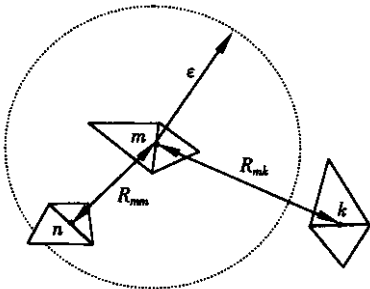


图 2 第 m 个基函数与其周围基函数间的关系

2 ) 对待分析的几何模型的表面网格进行分组. 以二维结构为例 ,图 3 给出了分组方法示意图 ,图中 n<sub>x</sub> 和 n<sub>y</sub> 分别表示各个分组在 x 和 y 方向的编号. 将未知元按照分组后顺序重新排列. 进而可按分组关系将 Z<sup>n</sup> 分块 ,得到一个分块形式的稀疏化阵 [ Z<sub>ij</sub><sup>n</sup> ] .

3 ) 由各个分组间距离关系将各个分组分为 2 类 :邻近组和非邻近组 ,如图 3 所示. 把邻近组在阻抗矩阵中对应的分块子阵的位置记录下来 ,作为对 Z<sup>n</sup> 进行近似求逆时待填充的部分. 将此待填充的元素分布集合记为 S<sub>2</sub>. 一般取 S<sub>1</sub> ⊂ S<sub>2</sub>.

4 ) 对稀疏化矩阵 Z<sup>n</sup> 采用简化的分块 Gauss 消

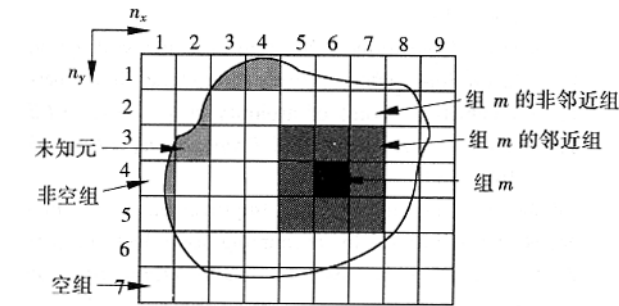


图 3 未知元分组方式

元法进行近似求逆. 在求逆过程中忽略集合  $S_2$  以外部分的相关计算.

经过上述处理,就可得到矩阵  $Z$  的一个近似逆阵  $M$ . 用  $M$  代换式(9)中的  $Z_i^{-1}$  就可构造出一个 LDU 逆阵形式的预条件阵.

3 数值结果

在预条件 GMRES 法迭代求解 PO-MoM 导出的线性方程组的过程中,应用上述预条件技术,计算了 2 个如图 4 所示的垂直装于金属组合体底板上的单极天线的辐射特性. 图中  $a=5\text{ m}$   $b=10\text{ m}$  ,  $c=12.5\text{ m}$   $d=6.125\text{ m}$   $e=3.125\text{ m}$ . 单极天线长度为  $\lambda/4$  ,工作频率为 90 MHz ,同相馈电. 金属组合体表面剖分所得三角形面元总数为 4 679. 计算过程中,采用 2 种不同的 MoM 区划分方式. 方式 1 :MoM 区包括分别以 2 个天线安装点为中心,半径  $\lambda/2$  的圆形区域,方程组总未知数为 486 ;方式 2 :MoM 区包括分别以 2 个天线安装点为中心,半径  $\lambda$  的圆形区域,方程组总未知数为 1 260. 采用双精度计算. 预条件阵构造过程中,阈值距离  $\varepsilon$  为  $0.1\lambda$  ,分组尺度  $0.4\lambda$ . 图 5 给出了分别采用 MoM 和上述 2 种设置方式下 PO-MoM 计算所得  $yoz$  面(与组合体对称面垂直且与 2 个天线相切的平面)内归一化功率方向图. 由图可见,当 MoM 区扩大后,方式 2 所得计算结果比方式 1 所得计算结果更接近于完全采用 MoM 所得计算结果. 图 6 和图 7 分别给出了 2 种设置方式下 GMRES 方法和预条件 GMRES 方法迭代计算过程中的收敛曲线. 图中 PreGMRES 表示采用了预条件技术的 GMRES 方法. 计算过程中的收敛判据为归一化留数的 2-范数小于  $10^{-4}$ . 采用不同计算方法的内存消耗和 CPU 时间比较如表 1 所示. 计算使用的工作站 CPU 为 Xeon2.8 GHz ,内存为 4 GB. 可见,预条件方法大大加快了迭代计算的收敛速度,改善了计算分析的综合效率.

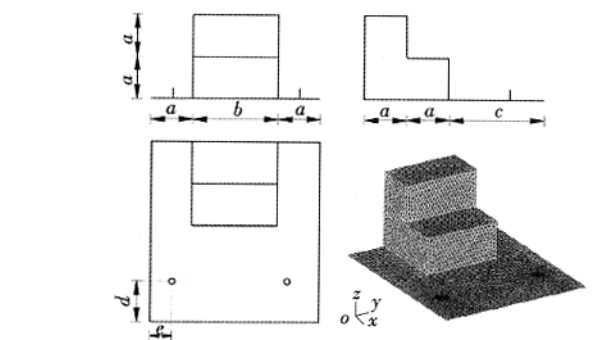


图 4 装有 2 个单极子天线的金属组合体

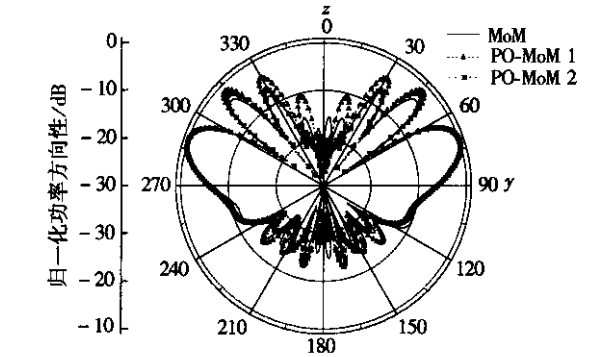


图 5  $yoz$  面内归一化功率方向性图

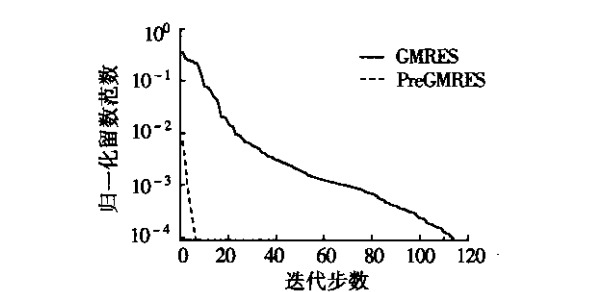


图 6 方式 1 下迭代收敛曲线

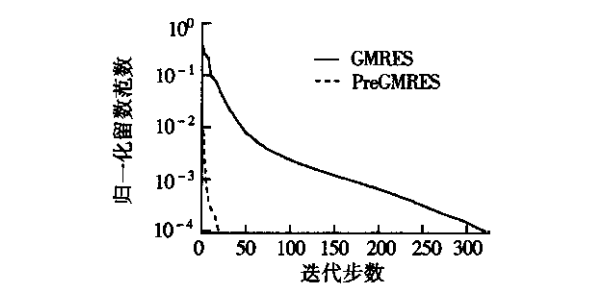


图 7 方式 2 下迭代收敛曲线

表 1 采用不同迭代方法的内存消耗和 CPU 时间

设置方式	迭代方法	预条件阵构造时间/s	迭代步数	迭代时间/s	内存需求/MB
方式 1	GMRES	—	114	98	83
	预条件	6	7	6	85
	GMRES	—	321	662	177
方式 2	预条件	88	19	41	190

采用上述技术,分析了一个如图 8 所示的长约 145 m,宽约 16 m 的舰船模型上超短波天线的辐射特性。 $\lambda/2$  长的单极子天线安装在驾驶舱顶部。工作频率 100 MHz。整个模型的三角面元数为 45 722。计算所得 3 个坐标平面内天线远场归一化功率方向性图如图 9 所示。计算过程中,MoM 区包括驾驶舱的整个顶部,方程组总未知数为 2 124。方程组迭代求解到归一化留数的 2 范数小于  $10^{-4}$ ,仅需 12 步,耗时 112 s。

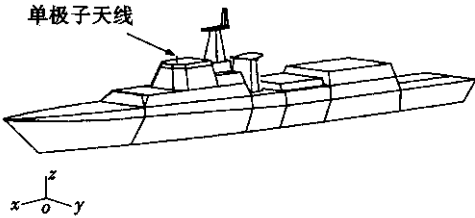


图 8 舰船模型

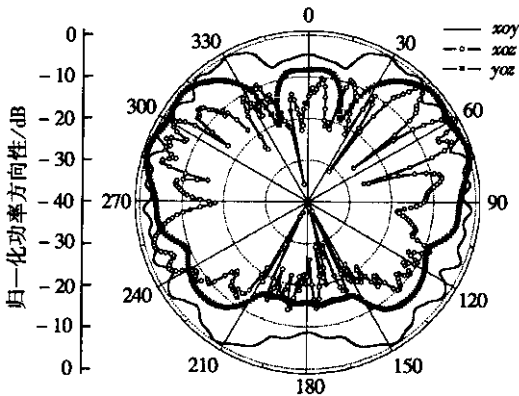


图 9 舰载天线归一化功率方向性图

4 结 论

将近场预条件技术与 PO-MoM 相结合,分析电大尺寸复杂载体上线天线的辐射问题。从计算结果可以看出,采用本文预条件技术的 GMRES 算法迭代求解 PO-MoM 导出的线性方程组时,在迭代时间以及迭代步数上,尤其当 MoM 区较大时,有明显的优势。

参考文献 (References)

[ 1 ] Harrington R F. *Field computation by moment methods* [ M ]. New York : IEEE Press , 1993. 62 - 81.  
[ 2 ] Rao S M , Wilton D R , Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [ J ]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 1982 , 30

( 3 ) : 409 - 418.  
[ 3 ] Jakobus U , Landstorfer F M. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape [ J ]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 1995 , 43 ( 2 ) : 162 - 169.  
[ 4 ] Jakobus U , Landstorfer F M. Improvement of the PO-MoM hybrid method by accounting for effects of perfectly conducting wedges [ J ]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 1995 , 43 ( 10 ) : 1123 - 1129.  
[ 5 ] Obelleiro F , Taboada J M , Rodriguez J L , et al. Hybrid moment-method physical-optics formulation for modeling the electromagnetic behavior of on-board antennas [ J ]. *Microwave and Optical Technology Letters* , 2000 , 27 ( 2 ) : 88 - 93.  
[ 6 ] Obelleiro F , Taboada J M , Rodriguez J L , et al. HEM-CUVI : a software package for the electromagnetic analysis and design of radiating systems on board real platforms [ J ]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* , 2002 , 44 ( 5 ) : 44 - 61.  
[ 7 ] 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.  
Hua Yihe , Xu Jinping , Niu Zhenyi. FAFFA accelerated PO-MM for the simulation of electromagnetic behavior of wire antennas mounted on complex PEC objects [ J ]. *Acta Electronica Sinica* , 2003 , 31 ( 12A ) : 2045 - 2049. ( in Chinese )  
[ 8 ] Sertel K , Volakis J L. Incomplete L U preconditioner for FMM implementation [ J ]. *Microwave and Optical Technology Letters* , 2000 , 26 ( 4 ) : 265 - 267.  
[ 9 ] Lee J , Zhang J , Lu C C. Sparse inverse preconditioning of multilevel fast multipole algorithm for hybrid integral equations in electromagnetics [ J ]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 2004 , 52 ( 9 ) : 2277 - 2287.  
[ 10 ] Xie Y , He J , Sullivan A , et al. A simple preconditioner for electric-field integral equations [ J ]. *Microwave and Optical Technology Letters* , 2001 , 30 ( 1 ) : 51 - 54.  
[ 11 ] Carr M , Bleszynski M , Volakis J L. A near-field preconditioner and its performance in conjunction with the BICGstab( ell ) solver [ J ]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* , 2004 , 46 ( 2 ) : 23 - 30.  
[ 12 ] Saad Y , Schultz M. GMRES : a generalized minimal residual algorithm for solving non-symmetric linear systems [ J ]. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* , 1986 , 7 ( 3 ) : 856 - 869.  
[ 13 ] Tekin I , Newman E H. Method of moments solution for a wire attached to an arbitrary faceted surface [ J ]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* , 1998 , 46 ( 4 ) : 559 - 562.

## 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](http://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](http://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](http://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>