

# 采用高阶矩量法分析 LPDA 电磁特性

焦光龙<sup>1,2</sup>, 李树彬<sup>1</sup>, 白渭雄<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:**采用高阶矩量法研究对数周期天线的电磁特性;首先借助广义导线截锥体几何建模技术对天线进行线剖分,再依据电磁场边界条件在天线表面建立电场积分方程,最后用基于混合域基函数的高阶矩量法对其离散求解;仿真验证表明,此方法简单易行、结果精确,与传统的分域基矩量法相比,大大减少了未知数个数,而且不失精度;高阶矩量法是一种切实可行的高效电磁场数值计算方法,在分析相关辐射问题时具有一定的应用价值和理论意义。

**关键词:**对数周期天线;电磁特性;混合域基;高阶矩量法

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.06.012

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)06-0050-04

高阶矩量法是一种采用高阶基函数的矩量法,形成于上世纪90年代末<sup>[1]</sup>,并在近几年得到了长足的发展<sup>[2-5]</sup>,但其多应用于电磁散射问题。本文采用广义导线截锥体几何建模<sup>[6]</sup>技术,用基于混合域基<sup>[7]</sup>的高阶矩量法<sup>[8]</sup>对对数周期天线(简称LPDA)的电磁辐射特性进行研究。

## 1 天线的几何结构

见图1的LPDA,其参数为  $N=18, \alpha=14^\circ, l_1=0.172\text{ m}, l_{18}=0.75\text{ m}, Z_0=Z_T=83\ \Omega$ 。

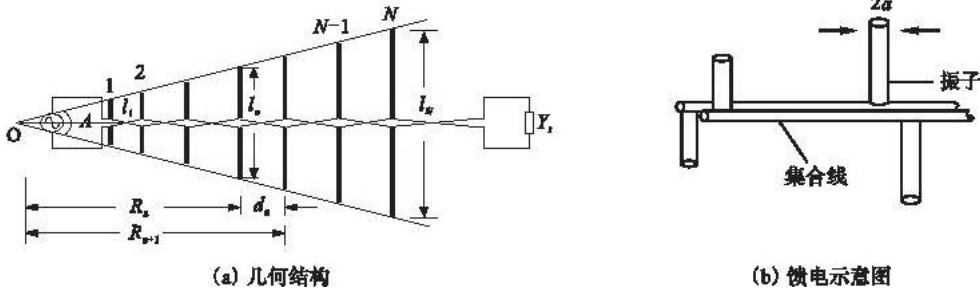


图1 对数周期偶极天线示意图

Fig.1 Description of LPDA

## 2 分析模型

设入射电磁场分别为  $E^i$ , 天线表面的感应电流为  $J$ ,  $J$  在天线表面产生的辐射场为  $E^s$ , 根据理想导体表面电场切向分量为零, 可建立如下电场积分方程(EFIE):

$$E^s = L(J) = -E^i \quad (1)$$

式中  $L$  为关于  $J$  积分运算符, 其表达式为:

\* 收稿日期: 2008-10-28

基金项目: 毫米波国家重点实验室开放课题资助项目(K200818; K200907)

作者简介: 焦光龙(1963-), 男, 陕西富平人, 副教授, 主要从事雷达信息处理与对抗研究. E-mail: jxzt701@163.com

$$L(\mathbf{J}(\mathbf{r}')) = -j\omega\mu \left[ \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') G(R) dS + \frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu^2} \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') \nabla G(R) dS \right] \quad (2)$$

式中格林函数  $G(R) = e^{-jkR}/4\pi R, R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$  为场点  $\mathbf{r}$  与源点  $\mathbf{r}'$  之间的距离,传播常数  $k = \omega \sqrt{\epsilon\mu}, \epsilon$  和  $\mu$  分别为真空的介电常数和磁导率。

LPDA 可以用若干段广义导线<sup>[6]</sup> 结构来表示,本文采用直截锥体<sup>[6]</sup> 来模拟广义导线几何形状。直截锥体由首尾两处的位置矢量  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  与半径  $a_1, a_2$  共同决定,见图 2。

截锥体表面的参数方程可写成如下形式:

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{r}_a(u) + a(u)\mathbf{i}_p(v) \quad (3)$$

式中  $u_1 \leq u \leq u_2, v_1 \leq v \leq v_2$ , 且  $\mathbf{r}_a(u)$  与  $a(u)$  分别是圆锥体轴线及圆锥体的局部半径的参量方程:

$$\mathbf{r}_a(u) = \mathbf{r}_1 + (u - u_1) \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{u_2 - u_1} \quad (4)$$

$$a(u) = a_1 + (u - u_1) \frac{a_2 - a_1}{u_2 - u_1} \quad (5)$$

由以上表述知,只要知道  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  与  $a_1, a_2$  即可确定一个直截锥体。在式(3)中  $u$  是沿参考圆锥母线的局部坐标,  $v$  是从  $x$  轴线测起关于圆锥轴线的局部坐标,而  $\mathbf{i}_p$  是垂直圆锥轴线的局部坐标系中的径向单位矢量,见图 1。 $u, v$  不是长度坐标,而  $u_1$  和  $u_2$  可以任意选择,为简化分析,取截锥体的  $u_1 = -1, u_2 = 1$ 。

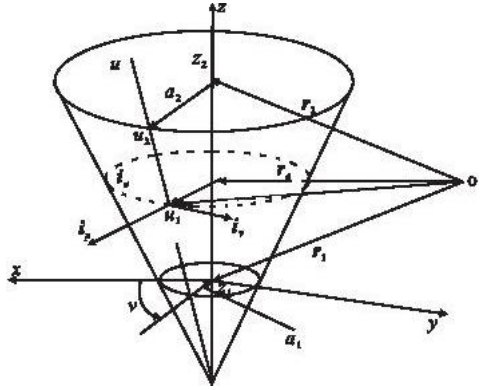


图 2 截锥体的几何形状

Fig. 2 Geometrical structure of truncated cone

### 3 广义导线上的混合域基函数

几何建模中将 LPDA 用广义导线来表示,下面采用混合域基<sup>[7]</sup> 来展开广义导线上的电流,其形式为:

$$I(u) = \sum_{i=1}^{M_u} I_i \omega_i(u) \quad (6)$$

式中:  $M_u$  为沿  $u$  坐标近似时的阶数;  $I_i$  是待定系数;  $\omega_i(u)$  是待选用轴向的基函数,其定义式为:

$$\omega_i(u) = f_i(u) + A_i f_2(u) + B_i \quad (7)$$

式中:

$$A_i = \begin{cases} -0.5, & (i = 1, 2) \\ 0.5 [(-1)^{i-1} - 1], & (i \geq 3) \end{cases}; \quad B_i = \begin{cases} 0.5(-1)^i, & (i = 1, 2) \\ 0.5 [(-1)^{i-1} - 1], & (i \geq 3) \end{cases} \quad (8)$$

设 LPDA 共由  $N$  段截锥体组成,记场段编号为  $k$ ,源段编号为  $l$ 。将式(6)代入式(1),同时采用伽略金匹配<sup>[9]</sup> 得:

$$\langle \omega_k, L \left( \sum_{l=1}^N I_l \omega_l \right) \rangle = \langle \omega_k, -\mathbf{E}_k^i \rangle \quad (9)$$

整理得矩阵方程:

$$\mathbf{Z}_{kl} \mathbf{I} = \mathbf{V} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{Z}_{kl}$  为阻抗矩阵;  $\mathbf{I}$  为  $I_i$  组成的未知系数列向量;  $\mathbf{V}$  表示电场激励列向量。

最后采用文献[8]中计算阻抗矩阵元素的方法填充矩阵,进而求解线性方程组得未知系数  $I_i$ ,将  $I_i$  代入式(6)即可求得 LPDA 表面的电流分布。

### 4 仿真结果及分析

根据电磁辐射理论<sup>[10]</sup>,可由式(11)求得辐射场  $\mathbf{E}^r$

$$\mathbf{E}^r = L(\mathbf{J}) \quad (11)$$

设归一化方向函数为  $\bar{F}(\theta, \varphi)$ , 则:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|\mathbf{E}^r(\theta, \varphi)|}{|\mathbf{E}^r(\theta, \varphi)|_{\max}} \quad (12)$$

由此天线的归一化方向图即可算出。

本文计算了该 LPDA 在 3 个频率点的  $E$  面方向图,每根振子被分成 2 段,基函数的阶数  $M_j = 3$ ,共 54 个未知数。本文计算了该天线的  $E$  面方向图,与文献[11-12]所给结果吻合见图 3。(实线为本文计算结果,虚线为文献所给结果)。

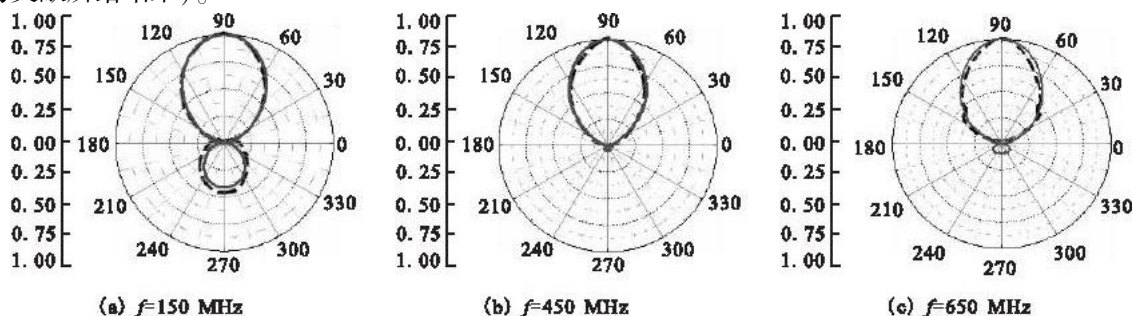


图 3 LPDA 天线在不同频率点的  $E$  面方向图

Fig. 3 Radiation patterns in  $E$  plane of LPDA at different frequency

本文在计算 LPDA 时只需把每根振子分成两段,利用混合基矩量法求解了频率 150 MHz - 650 MHz 3 个频率点的  $E$  面方向图,本文计算结果与文献[11-12]所给的结果非常吻合,证明本文所提方法不仅正确,且有利于计算机快速求解。可以看出,当天线工作在 650 MHz,最长的那根振子  $l_{18}$  约为  $1.62\lambda$ ,这时计算结果与文献结果的吻合情况没有其它的图好,这说明我们把振子分两段的计算精度开始下降,如果计算更大电尺寸的天线只需将振子再多分几段(但如果用分域基计算此天线,当振子的电长度超过  $1\lambda$  需将振子分为 10 段左右才能算准<sup>[13]</sup>)。

## 5 结论

与分域基方法比,达到同样精度本文方法所需的剖分段数少:这从基函数的特点和算例可以看出,若用分域基方法计算,当振子的电长度超过  $1\lambda$  时,需将振子分为 10 段左右才能算准,而本文方仅需把每根振子分成 2 段,本文计算结果与文献[11-12]所给的结果非常吻合,相应的未知数个数、计算时间都是比较少的。

## 参考文献:

- [1] Graglia R D, Wilton D R, Peterson A F. Higher Order Interpolatory Vector Bases for Computational Electromagnetics[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 45(5): 329 - 342.
- [2] Kang G, Song J, Chew W C, et al. A Novel Grid - robust Higher Order Vector Basis Function for the Method of Moments [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2001, 49: 908 - 915.
- [3] Djordjevic M, Notaro B M. Three Types of Higher - order MoM Basis Functions Automatically Satisfying Current Continuity Conditions[J]. Proc IEEE Antennas and Propagation Society Int Symp Digest San Antonio TX, 2002, 3(6): 610 - 623.
- [4] Djordjevic M, Notaro B M. Higher - order Moment - method Modeling of Curved Metallic Antennas and scatterers[J]. Proc IEEE Antennas and Propagation Society Int Symp Dig, 2003, 4(6): 94 - 97.
- [5] Wei Cai, Tiejun Yu, Han Wang, et al. High - order Mixed RWG Basis Functions for Electromagnetic Applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(7): 423 - 429.
- [6] B D 波波维奇. 金属天线与散射体分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1999.  
B D Popovic et c. Analysis of Metallic Antennas and Scatterers [M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 童创明, 项春望, 耿方志. 线状散射体的有效电磁建模方法及其应用[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 117 - 120.  
TONG Chuangming, XIANG Chunwang, GENG Fangzhi. Efficient Scattering Modeling and Application of Wire Targets[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(1): 117 - 120. (in Chinese)
- [8] 李西敏, 童创明, 付树洪. 介质体电磁散射的矩量法快速求解[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 110 - 112.  
LI Ximin, TONG Chuangming, FU Shuhong. The Fast Method of Moment Solution of Dielectric Body Scattering Problems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(3): 110 - 112. (in Chinese)
- [9] Harrington R F. Field Computation by Moment Method[M]. New York: Mac Millan Press, 1968.

- [10] 王一平. 电磁场与波理论基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.  
WANG Yiping. Base Theory of EM Field and Wave[M]. Xi'an: Xidian University Press,2002. (in Chinese)
- [11] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.  
LIN Changlu. Manual of Antenna Engineering[M]. Beijing: Electric Industry Press,2002. (in Chinese)
- [12] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京:电子工业出版社,1985.  
LI Shizhi. MOM in EM Radiation and Scattering Problems[M]. Beijing: Electric Industry Press,1985. (in Chinese)
- [13] 杨洲. 询问机天线的分析与设计[D]. 西安:空军工程大学,2001.  
YANG Zhou. The Analysis and Designing of Answering Radar[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2001. (in Chinese)

(编辑:田新华)

## The Analysis of LPDA EM Characteristics Based on High Order MoM

JIAO Guang-long<sup>1,2</sup>, LI Shu-bing<sup>1</sup>, BAI Wei-xiong<sup>1</sup>

(1. Missile Institute, Air force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The electromagnetic (EM) characteristics of log-periodic antenna (LPDA) are studied by adopting high order Method of Moment (MoM). Firstly, the antenna is segmented via generalized wire geometrical modeling. Then, electric field integral equations are formed based on EM boundary conditions. Finally, by virtue of high order MoM in which mixed-domain basis functions are adopted, the equations are made discrete and solved. The results of simulation show that this method is simple, accurate and has some practical value and theoretical meanings

**Key words:** LPDA; EM characteristics; mixed domain basis; high order MOM

(上接第22页)

- [6] 邱浩正. 量化研究与统计分析[M]. 重庆:重庆大学出版社,2009:296-335.  
QIU Haozheng. Quantificational Research and Statistical Analysis[M]. Chongqing: Chongqing University Press,2009:296-335. (in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

## An Evaluation Model for Materiel After-Sale Technical Service Quality Based on Fuzzy Mathematics & Analytic Hierarchy Process

CUI Yi-yong<sup>1</sup>, CUI Chen<sup>2</sup>, SU Jian-yong<sup>3</sup>

(1. Beijing Aeronautical Engineering Technology Research Center, Beijing 100076, China; 2. College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100043, China; 3. Air Force Flight Test Training Base, Cangzhou 061000 Hebei, China)

**Abstract:** The after-sale technical service is a vital condition of operating properly for materiel. However, how to evaluate the quality of the after-sale technical service, which has never been concerned so extensively as the consumption servicing business, now become a new subject and an important measure for assuring and improving the after-sale technical service quality. Commencing from the analysis of the contents and quality elements of the after-sale technical service for materiel, the paper builds up an evaluation index system and layer structure, and simultaneously sets up an evaluation model on the basis of Analytic Hierarchy Process and fuzzy mathematics theories. The effects of this model in application to airplanes are satisfactory

**Key words:** system engineering; after-sales technique service quality evaluation; fuzzy mathematics evaluating model; Analytic Hierarchy Process