

文章编号 :1005-6122( 2003 )03-0043-04

## 近地对数周期偶极天线的分析<sup>\*</sup>

丁晓磊<sup>1</sup> 王 建<sup>2</sup> 林昌禄<sup>2</sup>

( 1. 中国航天科技集团公司一院 704 所 ,北京 100076 ;

2. 电子科技大学微波工程系 ,成都 610054 )

**摘 要 :** 采用矩量法结合离散复镜像法求解近地对数周期偶极天线的电流分布 ,用基于驻相法的远场 Sommerfeld 积分近似公式求解辐射场。在计算广义阻抗矩阵元素时 ,利用矩阵的互易性和天线阵的结构对称性进行了算法优化 ,从而大大提高了计算速度。

**关键词 :** 矩量法 ,对数周期偶极天线 ,离散复镜像法

## Analysis of the Log-periodic Dipole Antennas over a Ground Plane

Ding Xiaolei<sup>1</sup> , Wang Jian<sup>2</sup> , Lin Changlu<sup>2</sup>

( 1. Institute of No. 704 ,The First Academy ,CASC ,Beijing 100076 ;

2. Dept. of Microwave Eng. ,UEST of China ,Chengdu ,610054 )

**Abstract :** The paper applies the moment method and discrete complex image method to determine the distribution current of log-periodic antennas over a ground plane ,applies the far-field approximation of the Sommerfeld integral based on the stationary phase method to determine the radiation patterns. Benefiting the symmetry and the reciprocity of the generalized matrix ,only a few elements of the generalized matrix need evaluated. After the optimizing for the algorithm ,the calculating time can be decreased evidently .

**Key words :** Method of moments ,Log-periodic dipole antennas ,Discrete complex image method

### 1 引言

对数周期偶极天线(简称 LPDA)是一种结构简单、性能良好的极宽频带天线。它在短波、超短波、微波等波段的通信、测向、搜索、电子对抗等方面有着广泛应用。LPDA 的理论分析方法有多种 ,文献 [1] 和 [2] 分别提出了适用于不同激励源的矩量法结合网络理论的方法 ,可考虑所有振子间的互耦 ,但只对自由空间 LPDA 进行了分析。当 LPDA 用于短波段时 ,必然近地架设。对于邻近地面架设的天线 ,由于地中感应的传导电流和位移电流与天线上电流的相互影响 ,必须把天线和大地同时作为 Maxwell 方程的边值问题处理 ,增加了地面的边界条件而使问题的求解变得相当复杂。本文采用矩量法结合离散复镜像法求解近地水平极化对数周期偶极天线的电流分布 ,用基于驻相法的远场 Sommerfeld 积分近

似公式求解辐射场。在计算广义阻抗矩阵元素时 ,利用矩阵的互易性和天线阵的结构对称性进行了算法优化 ,从而大大提高了计算速度。

### 2 近地对数周期偶极天线的分析方法

由于分析近地水平极化 LPDA 比分析近地垂直极化 LPDA 复杂 ,文中仅对近地水平极化 LPDA 进行分析 ,近地垂直极化 LPDA 的分析可采用类似的方法。图 1 为近地水平极化 LPDA 的坐标示意图。

LPDA 的结构特点是各振子的尺寸、位置与振子的序号有关 ,它们是按比例因子  $\tau$  构成 ,即

$$\tau = \frac{R_p}{R_{p+1}} = \frac{L_p}{L_{p+1}} = \frac{d_p}{d_{p+1}} \quad (1)$$

式中  $p$  为振子序号 ,按振子长度由小到大排列 , $R_p$  为天线的虚顶点 A 到第  $p$  根振子的垂直距离 , $L_p$

\* 收稿日期 2002-10-14 定稿日期 2003-01-16  
万方数据

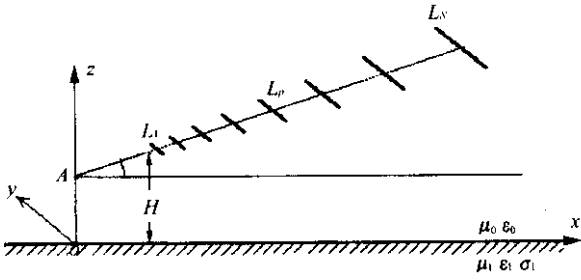


图 1 近地水平极化 LPDA 的坐标示意图

为第  $p$  根振子的长度  $d_p$  为第  $p$  和第  $p+1$  根振子间的距离。有时为了设计上的方便也引用另一个称为间隔因子的参数  $\sigma$  其定义为  $\sigma = d_p / (2L_{p+1})$ 。

对于近地水平极化 LPDA ,当采用离散复镜像法<sup>[3]</sup>求解近场 Sommerfeld 积分并采用矩量法-分段正弦基伽略金法<sup>[4]</sup>求解天线的积分方程时 ,可导出如下矩阵方程

$$\sum_{p=1}^N \sum_{n=1}^{M_p} I_{p,n} Z_{mn}^{pq} = V_{q,m} \quad (2)$$

式中  $I_{p,n}$  为第  $p$  根振子的第  $n$  段长度上的电流分布系数 ,

$$Z_{mn}^{pq} = -\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{y_{q,m-1}}^{y_{q,m+1}} \frac{\sin k_0(h_p - |y_q - y_{q,m}|)}{\sin k_0 h_q} E_{p,qn}(x_q, y_q, z_q) dy_q \quad (2a)$$

$$V_{q,m} = \begin{cases} U_{A,q} & \text{在点}(x_q, 0, z_q)\text{处} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$U_{A,q}$  为第  $q$  根振子的激励电压。而

$$E_{p,qn}(x_q, y_q, z_q) = \frac{k_0}{\sin k_0 h_p} \cdot$$

$$[G_{hy}(x_q, y_{q,n+1}, z_q/x_p, y_p, z_p)] +$$

$$G_{hy}(x_q, y_{q,n-1}, z_q/x_p, y_p, z_p) -$$

$$2\cos k_0 h_p G_{hy}(x_q, y_{q,n}, z_q/x_p, y_p, z_p)] +$$

$$\frac{2k_0}{k_1^2} \sum_{i=1}^{N_0} a_i^z \int_{y_{p,n-1}}^{y_{p,n+1}} \sin[k_0(h_p - |y_p - y_{p,n}|)]$$

$$g_i^z(x_q, y_q, z_q/x_p, y_p, z_p) dy_p \}$$

$$G_{hy}(x_q, y_{q,n}, z_q/x_p, y_p, z_p) =$$

$$\frac{e^{-jk_0 R_{0,n}}}{4\pi R_{0,n}} + \sum_{i=1}^{N_0} a_i^y \frac{e^{-jk_0 R_i^y}}{4\pi R_i^y} - \frac{2}{k_1^2} \sum_{i=1}^{N_0} a_i^z \frac{e^{-jk_0 R_i^z}}{4\pi R_i^z}$$

$$g_i^z(x_q, y_q, z_q/x_p, y_p, z_p) = \frac{e^{-jk_0 R_i^z}}{4\pi R_i^z}$$

$$R_{0,n} = \sqrt{a_p^2 + A^2 + B_n^2 + (z_q - z_p)^2}$$

$$R_{i,n}^y = \sqrt{a_p^2 + A^2 + B_n^2 + (z_q + z_p - \frac{b_i^y}{k_0})^2}$$

$$R_{i,n}^z = \sqrt{a_p^2 + A^2 + B_n^2 + (z_q + z_p - \frac{b_i^z}{k_0})^2}$$

式中  $A = x_q - x_p$   $B_n = y_q - y_{p,n}$   $p, q$  为振子序数  $m, n$  分别为第  $p$  根和第  $q$  根振子上的分段序数  $m = 1, 2, \dots, M_q$   $q = 1, 2, \dots, N$   $M_{p+1}, M_{q+1}$  分别为第  $p$  根和第  $q$  根振子的分段总数  $N$  为对数周期天线的振子总数  $a_p$  为第  $p$  根振子的半径 ,当场、源点在同一根振子上时  $a_p \neq 0$  ;否则  $a_p = 0$ 。  $h_p = L_p / (M_p + 1)$  为第  $p$  根振子上的分段长度  $x_p = R_p \cos \gamma$   $x_q = R_q \cos \gamma$  ,  $z_p = H + (R_p - R_1) \sin \gamma$   $z_q = H + (R_q - R_1) \sin \gamma$  分别为第  $p$  根和第  $q$  根振子在图 1 所示的坐标系中的坐标  $H$  为近地水平极化 LPDA 最短振子的离地高度 ,  $a_i^y, a_i^z$  及  $b_i^y/k_0, b_i^z/k_0$  分别为第  $i$  个复镜像的复数幅度和复数位置  $N_0$  为复镜像个数  $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$   $k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_1}$  分别为上半空间和下半空间的波数。

由式(2a)并结合文献[1]或[2]解得天线中各振子的电流分布 ,采用文献[5]中基于驻相法的远场 Sommerfeld 积分近似公式计算远区辐射场 ,可得近地水平极化 LPDA 的方向图函数为

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^N \frac{\exp(jk_0 x_p \sin \theta \cos \varphi)}{(1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) \sin k_0 h_p} \cdot [\cos(k_0 h_p \sin \theta \sin \varphi) - \cos(k_0 h_p)] \cdot [\exp(jk_0 z_p \cos \theta) + R_p \exp(-jk_0 z_p \cos \theta)] \cdot \sum_{n=1}^{M_p} I_{p,n} \exp(jk_0 y_{p,n} \sin \theta \sin \varphi) \quad (3)$$

其准 E 面( $\theta = \theta_{\max}$  ,H 面场强最大时的  $\theta$  值)方向图函数为

$$f_E(\varphi) = f(\theta, \varphi)|_{\theta=\theta_{\max}} \quad (3a)$$

其 H 面( $\varphi = 0$ )方向图函数( $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ )为

$$f_H(\theta) = f(\theta, \varphi)|_{\varphi=0} \quad (3b)$$

式中

$$R_h = \frac{\cos \theta - k_1/k_0 \sqrt{1 - (k_0 \sin \theta / k_1)^2}}{\cos \theta + k_1/k_0 \sqrt{1 - (k_0 \sin \theta / k_1)^2}}$$

### 3 算法优化

由以上的分析过程可知 ,采用矩量法分析 LPDA 时 ,在计算广义阻抗矩阵的过程中 ,计算量是相当大的。如果  $Q$  是所有振子的分段总数 ,则需要计算  $Q^2$  个矩阵元素。考虑近地影响时 ,在计算每个矩阵元素时还要计算一个级数来逼近 Sommerfeld 积分 ,使计算量更大。为了减少计算量和提高计算速

度,在计算 LPDA 的广义阻抗矩阵时,可以利用 LPDA 的结构对称性和广义阻抗矩阵的互易性进行算法优化:

· 结构对称性的利用

由于 LPDA 的结构对称性,计算式(2a)时,有下列关系

①当场、源点在同一根振子上时,即  $q = p$ , 则有

$$Z_{mn}^{pq} = Z_{1, |m-n|+1}^{p, q}, \quad 2 \leq m \leq M[q], 1 \leq n \leq M[p] \quad (4)$$

②当场、源点在不同根振子上时,即  $q \neq p$ , 则有

$$Z_{[M[q]+1-m][M[p]+1-n]}^{pq} = Z_{mn}^{pq} \quad (5)$$

式中  $m = 1, 2, \dots, \frac{M[q]+1}{2}, n = 1, 2, \dots, \frac{M[p]+1}{2}$ .

· 互易性的利用

由式(2a)的具体表示式可知,矩阵元素具有关系

$$Z_{ji} = Z_{ij} \quad (6)$$

则广义阻抗矩阵是一个对称矩阵,因此,可以只计算主对角线及其以上的矩阵元素。利用以上关系式对一些矩阵元素直接赋值,可以大大减少计算量。

4 计算实例

实验测试值是检验理论计算正确与否的理想方法。对于工作在 HF 和 VHF 频段范围的近地水平极化 LPDA 的实验测试是一件困难的事。好在法国无线通信实验室<sup>[6]</sup>对这种天线进行了方向图测试。他们采用了直升机和 GPS 接收机。实验中,被测天线做发射,直升机携带 GPS 接收机作为辅助接收系统,分别对实验天线进行了水平面和垂直面方向图的精确测试。LPDA 的参数值为  $\tau = 0.847$ 、 $\sigma = 0.063$ 、振子数  $N = 10$ 、工作频带为  $f = 28 \sim 100\text{MHz}$ 、特性阻抗和负载阻抗为  $Z_c = Z_L = 138\Omega$ 、振子半径  $a_p = 0.019\text{m}$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 。他们对该天线用近似反射系数法也进行了计算,给出了相应的理论计算与实测结果曲线,见图 2~4。

由图 2~4 近地水平极化 LPDA 的方向图对比结果可知,在低频时,本文的计算结果与测试值更为吻合,且优于文献[6]采用近似反射系数法<sup>[7]</sup>的理论计算值,当频率逐渐升高时,近似反射系数法的计算结果与本文计算结果比较接近。即近似反射系数法仅对于较高频率时的近地水平极化天线的计算精度接近离散复镜像法,而对于较低频段的近地水平极化天线的计算精度误差较大。这是因为近似反射系数

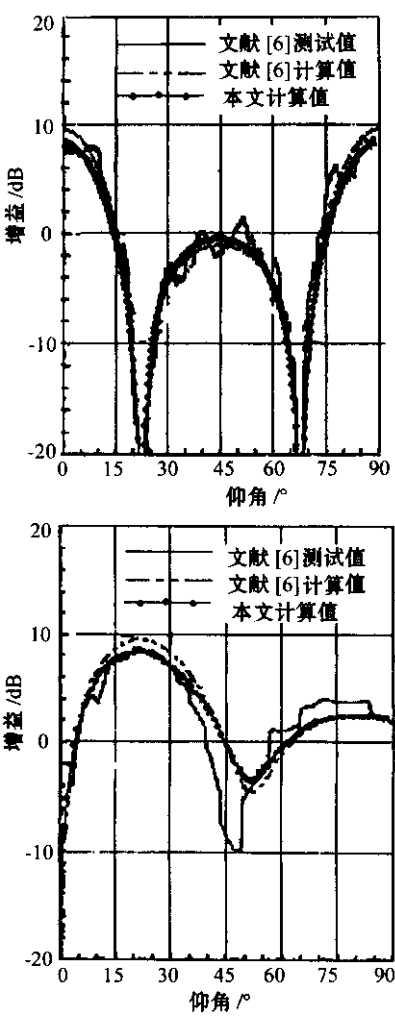


图 2  $f = 30.5\text{MHz}$ 、 $H = 6\text{m}$ 、 $\varepsilon_r = 6$ 、 $\sigma_1 = 0.01\text{S/m}$

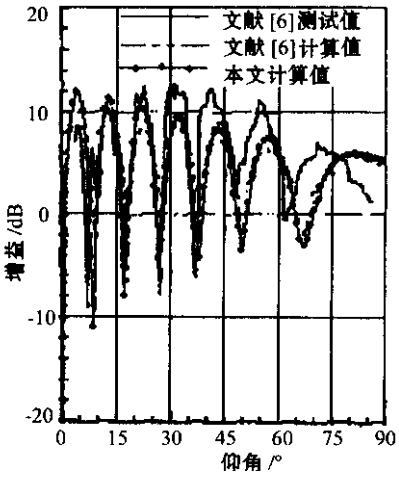


图 3  $f = 69.5\text{MHz}$ 、 $H = 14\text{m}$ 、 $\varepsilon_r = 6$ 、 $\sigma_1 = 0.01\text{S/m}$

法在分析近地天线时,忽略了地表面波的影响,而地表面波随着频率的升高,衰减加剧,从而使该方法对较高频率时的近地水平极化天线的计算精度接近离

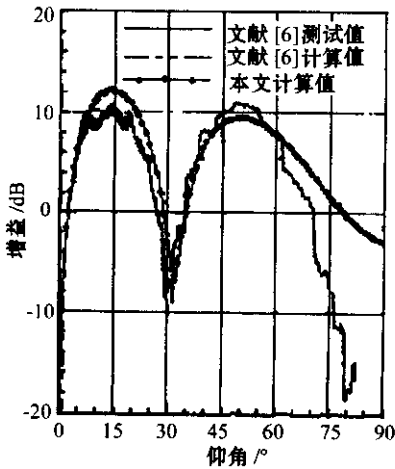


图4  $f=40.5\text{MHz}$ 、 $H=7\text{m}$ 、  
 $\varepsilon_r=15$ 、 $\sigma_1=0.001\text{S/m}$

散复镜像法。由此可见,在考虑地面对近地天线的影  
响时,采用离散复镜像法求解近场 Sommerfeld 积  
分,不仅具有较高的精度,而且更具通用性。基于前  
面的理论推导,编写了近地 LPDA 特性分析仿真软  
件。该软件可对 LPDA 的结构参数(包括比例因子  
 $\tau$ 、间隔因子  $\sigma$ 、结构角  $\alpha$ 、振子个数  $N$ 、振子半径  $a_p$   
和最长振子的长度)、极化方式(垂直极化和水平极  
化)、地层参数(包括介电常数  $\varepsilon_r$ 、地层电导率  $\sigma_1$ )、  
架设参数( $\gamma$ 、 $H$ )、激励源的幅度和相位、工作频带宽  
度和工作频率进行任意设置,可对近地 LPDA 的电  
流分布、方向图、增益、输入阻抗和驻波比等电特性  
进行分析计算,且自动保存计算结果。另外,该软件  
还具有丰富的图形绘制功能,可将计算结果用直观  
的图形显示出来。通过对不同地层参数近地 LPDA  
的计算结果表明,地层参数的取值大小,会明显影响  
近地 LPDA 的电特性。

5 结论

图2~图4中计算值与测试值的一致性充分证  
明了本文在计算近地水平极化 LPDA 时的算法优  
化和处理地面对近地天线影响的方法是正确的,

同时也表明作者所编制的近地 LPDA 特性分析软件  
具有很高的精度。

参 考 文 献

[1] 丁晓磊,王建,林昌禄. 对数周期偶极天线的一种新的  
方法. 系统工程与电子技术. 2002, 24(5): 16~20  
[2] 袁伟良,梁昌洪,史小卫. 矩量法结合网络理论分析对  
数周期偶极天线. 微波学报. 2000, 16(2): 106~110  
[3] Chow Y L, Yang J J, Fang D G, et al. A closed-form  
spatial Green's function for the thick microstrip substrate.  
IEEE Trans. Microwave Theory Tech. ,1991, 39: 588~  
592  
[4] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法. 电子工业出  
版社, 1987: 1~44  
[5] Chew A W. A quick way to approximate a Sommerfeld-  
Weyl-Type integral. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,  
1988, 36(11): 1654~1657  
[6] Brousseau C, et al. Radiation patterns of a log-periodic  
antenna in the VHF band: comparison between simulations  
and measurements. 1997 IEEE Int. Sym. on Antennas  
Propagat. ,1997, 1: 534~541  
[7] Miller E K, Poggio A J, Burke G J, et al. Analysis of  
wire antennas in the presence of a conducting half-space.  
Part II, the horizontal antenna in free space, Canadian  
J. of Physics, 1972, 50: 2614~2627

丁晓磊 女,河南人,1971年生,2002年于电子科技大学获  
博士学位,目前主要从事天线理论和技术方面的研究工作。  
王 建 男,四川人,1956年生,教授,从事微波天线理论  
与工程,电磁场数值算法、电磁兼容与逆散射等教学和科研  
工作。  
林昌禄 男,四川人,1937年生,大学教授,博士生导师,1960  
年毕业于成都电讯工程学院雷达专业(现电子科技大学电  
子工程学院),留校任教至今,已出版《近代天线设计》、《圆  
极化天线》、《天线测量技术》等专著七部,发表论文近百篇。  
现从事天线理论与工程、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方  
面的教学和科研工作。

## 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](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>