

文章编号 1005-0388(2003)06-0655-04

对数周期偶极天线扇形阵的分析^{*}

丁晓磊¹ 王 建² 郭 宏³ 林昌禄²

(1. 中国航天科技集团公司 704 所, dxiaolei@163.com, 北京 100076;
2. 电子科技大学微波工程系, 四川 成都 610054; 3. 西南电子电信技术研究所, 四川 成都 610041)

摘要 采用矩量法对对数周期偶极天线扇形阵进行理论分析, 在计算广义阻抗矩阵元素时, 利用矩阵的互易性、天线阵的结构对称性和对数周期天线的工作原理进行了算法简化, 从而在保证计算精度的前提下, 大大提高了计算速度。

关键词 矩量法 对数周期偶极天线 扇形阵

中图分类号 TN82 文献标识码 A

Analysis of fan-shaped arrays of log-periodic dipole antennas

DING Xiao-lei¹ WANG Jian² GUO hong³ LIN Chang-lu²

(1. Institute of No. 704, China Aerospace Science and Technology Corporation,
dxiaolei@163.com, Beijing 100076, China; 2. Dept. of Microwave Eng.,
UEST of China, Chengdu Sichuan 610054, China; 3. The South-west Electronics &
Telecommunication Technique Institute, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract In this paper, the electrical characteristics of a fan-shaped array of log-periodic dipole antennas is analyzed by using the method of moments. Employing the array symmetries and the reciprocity characteristics of the general matrix, and considering the principle of a log-periodic dipole antenna, the computation time and necessary storage space are effectively reduced when the elements of the general matrix are calculated.

Key words method of moments, log-periodic dipole antennas, fan-shaped array

1 引言

对数周期偶极天线(简称 LPDA)是一种人所共知的结构简单、性能良好的极宽频带天线。它一经提出以后就在短波、超短波、微波等波段的通信、测向、搜索、电子对抗等方面获得了应用。LPDA 的理论分析方法有多种, 文献[1]和[2]分别提出的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。他们仅对 LPDA 进行了分析。实际应用中常常根据不同的应用要求, 以 LPDA 为单元组成扇形阵。由于扇形阵的分析不能应用方向图乘法, 因此, 扇形阵的理论比之于各项同性单元组成的直线阵要复杂得多。本文采用矩量法对 LPDA 扇形阵进行理论分析, 并在计算广义阻抗矩

阵元素时, 利用矩阵的互易性、天线阵的结构对称性和对数周期天线的工作原理进行了算法简化, 从而在保证计算精度的前提下, 大大提高了计算速度。

2 LPDA 扇形阵的分析方法

图 1 为对数周期偶极天线的结构及坐标示意图。图 2 为水平极化扇形阵在水平面的投影示意图。

如图 1 所示 $x_t o y_t$ 为由 xoy 旋转角度 β_t 时的子坐标系, 当逆时针旋转时 β_t 为正值, 反之 β_t 为负值, 则 $x_t o y_t$ 子坐标系与 xoy 主坐标系间的矢量关系为

$$\begin{cases} \hat{x}_t = \hat{x}\cos\beta_t + \hat{y}\sin\beta_t \\ \hat{y}_t = -\hat{x}\sin\beta_t + \hat{y}\cos\beta_t \end{cases} \quad (1a)$$

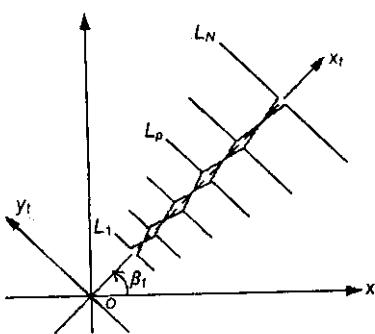


图1 单元 LPDA 及坐标转换示意图

和 $\begin{cases} \hat{x} = \hat{x}_t \cos\beta_t - \hat{y}_t \sin\beta_t \\ \hat{y} = \hat{x}_t \sin\beta_t + \hat{y}_t \cos\beta_t \end{cases}$ (1b)

由图2可知,扇形阵各单元的结构顶点位于半径为 r_0 ($r_0 \geq 0$)的同一个圆上,整个扇形阵以x轴为对称轴,第t个阵元与x轴的夹角用 β_t 表示,当 β_t 为从x轴逆时针旋至阵元集合线位置(当集合线与水平面有夹角时为集合线在水平面的投影位置)时 β_t 为正值,反之 β_t 为负值。相邻阵元间的夹角用 β 表示。在扇形阵中第t个LPDA单元上第p根振子可简写为第tp根振子,由于扇形阵是有完全相同的单元组成的,则其第tp根振子的长度 L_{tp} 、距离天线结构顶点的距离 R_{tp} 、矩量法分段长度 h_{tp} 和分段数 M_{tp} 可简写为 L_p 、 R_p 、 h_p 和 M_p 。假设由M个LPDA单元组成一扇形阵,则第t个LPDA单元集合线与x轴的夹角 β_t 可表示为

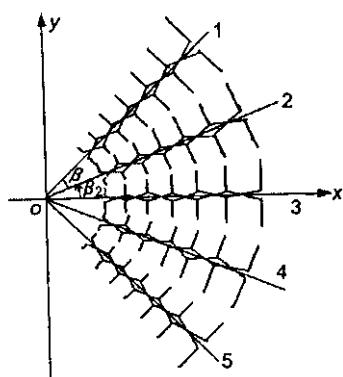


图2 水平极化扇形阵水平面投影示意图

$$\beta_t = \frac{M-1}{2}\beta - (t-1)\beta \quad (2)$$

为了分析的方便,对于扇形阵中的不同单元,分别建立相应的子坐标系,如图1所示为第t个LPDA单元在水平面的坐标示意图,其子坐标系的原点与主坐标系的原点重合,x_t轴沿集合线位置或沿集合

线在水平面的投影位置(当集合线与水平面有夹角时)。则第t个LPDA单元的振子沿 y_t 方向。

若扇形阵中LPDA单元的集合线与水平面的夹角为 γ ,则第t个LPDA单元上第p根振子在 x_t oz平面的投影坐标(x_{tp} , z_p)为

$$\{x_{tp} = (r_0 + R_p) \cos\gamma, z_p = (r_0 + R_p) \sin\gamma\} \quad (3)$$

r_0 为扇形阵中LPDA单元的虚顶点所在圆的半径。

对于由M个LPDA单元组成的扇形天线阵,当采用矩量法-分段正弦基伽略金法^[3]对其进行分析时,可导出如下矩阵方程

$$\sum_{t=1}^M \sum_{p=1}^M \sum_{n=1}^{M_p} I_{tp,n} Z_{mn}^{tp,sq} = V_{sq,m} \quad (4)$$

式中

$$Z_{mn}^{tp,sq} = -\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{y_{sq,m-1}}^{y_{sq,m+1}} \frac{\sin k_0(h_q - |y_{sq} - y_{sq,m}|)}{\sin k_0 h_q} [E_{tp,txn}(x_{sq}, y_{sq}, z_q) \cdot \sin(\beta_t - \beta_s) + E_{tp,tny}(x_{sq}, y_{sq}, z_q) \cos(\beta_t - \beta_s)] dy_{sq} \quad (5)$$

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

$U_{A,sq}$ 为第sq根振子的激励电压 $s=1, 2, \dots, M$; $q=1, 2, \dots, N$; $m=1, 2, \dots, M_q$ 。

其中

$$E_{tp,txn}(x_{sq}, y_{sq}, z_q) = \frac{k_0 A}{4\pi \sin k_0 h_p} \left[\int_{y_{tp,n}}^{y_{tp,n+1}} \frac{1 + jk_0 R_0}{R_0^3} e^{-j k_0 R_0} \cos k_0(h_p - y_{tp,n} + y_{tp,n}) dy_{tp} - \int_{y_{tp,n-1}}^{y_{tp,n}} \frac{1 + jk_0 R_0}{R_0^3} e^{-j k_0 R_0} \cos k_0(h_p + y_{tp,n} - y_{tp,n}) dy_{tp} \right] \quad (5a)$$

$$E_{tp,tny}(x_{sq}, y_{sq}, z_q) = \frac{k_0}{4\pi \sin k_0 h_p} \left(\frac{e^{-j k_0 R_0,n-1}}{R_0,n-1} + \frac{e^{-j k_0 R_0,n+1}}{R_0,n+1} - 2 \cos k_0 h_p \frac{e^{-j k_0 R_0,n}}{R_0,n} \right) \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} R_0 &= \sqrt{a_p^2 + A^2 + B^2 + (z_p - z_q)^2}, \\ R_{0,n} &= \sqrt{a_p^2 + A^2 + B_n^2 + (z_p + z_q)^2}, \\ x_{sq} &= (R_q + r_0) \cos\gamma, x_{tp} = (R_p + r_0) \cos\gamma, \\ z_q &= (R_q + r_0) \sin\gamma, z_p = (R_p + r_0) \sin\gamma, \\ A &= x_{sq} \cos(\beta_t - \beta_s) + y_{sq} \sin(\beta_t - \beta_s) - x_{tp}, \\ B &= -x_{sq} \sin(\beta_t - \beta_s) + y_{sq} \cos(\beta_t - \beta_s) - y_{tp}, \\ B_n &= -x_{sq} \sin(\beta_t - \beta_s) + y_{sq} \cos(\beta_t - \beta_s) - y_{tp}. \end{aligned}$$

a_p 为扇形阵中各 LPDA 单元的第 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 $a_p = 0$ 。

由式(4)并结合文献[1]或[2]解得阵列中各振子的电流分布 , 可得水平极化扇形阵的方向图函数为

$$\begin{aligned} J(\theta, \varphi) = & \sum_{t=1}^M \sum_{p=1}^N \cdot \\ & \frac{\exp[jk_0(x_{tp} \sin \theta \cos(\varphi - \beta_t) + z_p \cos \theta)]}{[1 - \sin^2 \theta \sin^2(\varphi - \beta_t)] \sin k_0 h_p} \cdot \\ & \{\cos[k_0 h_p \sin \theta \sin(\varphi - \beta_t)] - \cos k_0 h_p\} \cdot \\ & \sum_{n=1}^{M_p} I_{tp,n} \exp[jk_0 y_{tp,n} \sin \theta \sin(\varphi - \beta_t)] \quad (6) \end{aligned}$$

为水平极化扇形阵的方向图函数。

其 E 面 ($\theta = \pi/2$) 方向图函数为

$$f_E(\varphi) = J(\theta, \varphi)|_{\theta=\pi/2} \quad (7)$$

其 H 面 ($\varphi = 0$) 方向图函数为

$$f_H(\theta) = J(\theta, \varphi)|_{\varphi=0} \quad (8)$$

3 算法简化

由以上的分析过程可知 , 采用矩量法分析 LPDA 或由其组成的扇形阵时 , 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。为了减少计算量从而提高计算速度 , 在计算 LPDA 扇性阵的广义阻抗矩阵时 , 可以利用 LPDA 或由其组成的扇形阵的结构对称性和广义阻抗矩阵的互易性以及对数周期天线的工作原理进行算法简化 :

● 结构对称性的利用

由于 LPDA 或由其组成的扇形阵的结构对称性 , 计算式(5)时 , 有下列关系

① 当场、源点在同一根振子上时 , 即 $s = t, q = p$, 则有

$$\begin{aligned} Z_{mn}^{tp,sq} &= Z_{1 \lfloor m-n \rfloor+1}^{tp,sq}, \\ 2 \leq m \leq M[q], 1 \leq n \leq M[p] \end{aligned} \quad (9)$$

② 当场、源点在同一个 LPDA 单元的不同根振子上时 , 即 $s = t$ 和 $q \neq p$, 则有

$$Z_{[\lfloor M_q \rfloor+1-m][\lfloor M_p \rfloor+1-n]}^{tp,sq} = Z_{mn}^{tp,sq} \quad (10)$$

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

令 Z_{ij} 表示广义阻抗矩阵的矩阵元素 , 则有

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= Z_{mn}^{tp,sq}, i = 1, 2, \dots, Q, \\ j = 1, 2, \dots, Q \end{aligned} \quad (11)$$

由式(5)的具体表示式可知 , 矩阵元素具有关系

$$Z_{ji} = Z_{ij} \quad (12)$$

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。

● 对数周期天线工作原理的利用

由对数周期天线的工作原理可知 , 在任一工作频率上 , 对数周期天线的整个结构并未全部发挥作用 , 而仅仅是一部分振子——辐射区的振子产生有效辐射 , 而其余振子对远场的贡献很小。因此 , 对于频带较宽且振子数较多的 LPDA 扇形阵 , 当工作频率较高时 , 可以忽略未激励区中靠近末端的几根长振子的影响 , 即实际计算时振子数的取值为截去末端长振子后剩下的振子数。若 LPDA 单元的振子数为 $x = N$, 假定谐振振子 (振子长度略大于 0.43λ) 的序号为 q , 通过计算得知当 $q + 12 \leq N$ 时 , 计算时可令 $x = q + 12$ 。这样 , 直接减少了振子的总数 , 从而大大减少计算量。

扇形阵的结构参数为 $\tau = 0.95$ 、 $\sigma = 0.15$ 、 $\beta = 10^\circ$ 、 LPDA 单元的振子数 $N = 37$ 、 频带范围为 $300 \sim 1350\text{MHz}$ 、 $r_0 = 0.0\text{m}$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 。激励为等幅同相均匀激励。表 1 为 $f = 900\text{MHz}$ 时 , 水平极化 3 元阵截去每个 LPDA 单元末端 12 根长振子前后的计算结果。

表 1 3 元水平极化 LPDA 扇形阵截去每个单元末端 12 根长振子前后的计算值

增益值(dB)	LPDA 单元的输入阻抗(Ω)		
截前	截后	截前	截后
		$Z_{in1} = 65.36 + j1.32$	$Z_{in1} = 65.40 + j1.39$
11.73	11.83	$Z_{in2} = 62.80 + j4.21$	$Z_{in2} = 62.84 + j4.26$
		$Z_{in3} = Z_{in1}$	$Z_{in3} = Z_{in1}$

由对比结果可知 , 对于频带范围为 $300 \sim 1350\text{MHz}$ 、 单元振子数为 37 的 3 元阵而言 , 当 $f = 900\text{MHz}$ 时 , 截去每个单元末端 12 根长振子后的计算误差是可以忽略的。但是 , 当振子总数由 111 根减少到 75 根时 , 却可以减少很多的计算量 , 从而大大提高计算速度。

4 计算实例

为检验分析方法的正确与否 , 下面对水平极化 8 元 LPDA 扇形阵进行实验测试和理论计算。实验中 , 被测天线作为接收天线 , 辅助天线做发射天线。

由于天线尺寸较大,测试垂直面方向图时需要在满足远场条件距离为半径的垂直面半圆周上移动发射天线,这是相当困难的。所以只作了方位面方向图测试。天线参数为 $\tau = 0.95$ 、 $\sigma = 0.15$ 、频率范围为300~1350MHz、 $N = 37$ 、 $r_0 = 0.13m$ 、 $\gamma = 0^\circ$ 、 $\beta = 10^\circ$,激励为等幅同相均匀激励。实验测试值和采用本文方法的理论计算值见图3。

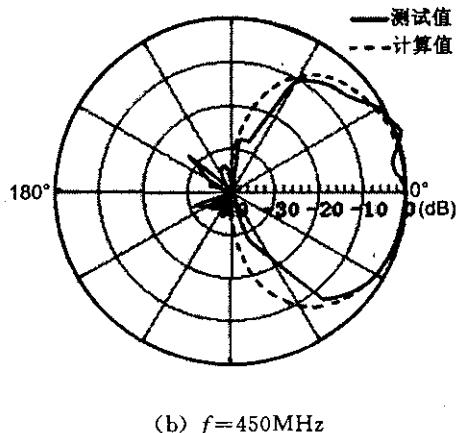
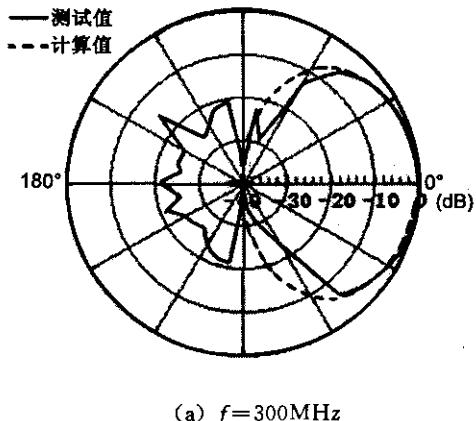


图3 近地水平极化8元扇形阵的E面方向图

对比图3中2个频率点处的计算结果和实验值可知,理论值和实验结果是比较吻合的。由此可见,本文对复杂的水平极化扇形阵的公式推导、算法简化和程序编写是正确的。基于前面的理论推导,编写了LPDA扇形阵特性分析仿真软件。该软件可对LPDA的结构参数(包括比例因子 τ 、间隔因子 σ 、结构角 α 、振子个数 N 、振子半径 a_p 和最长振子的长度)、扇形阵参数(包括 β 、 M 、 γ 、 r_0 、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,

可对扇形阵的电流分布、方向图、增益、LPDA单元的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。通过对不同阵元参数的扇形阵的计算结果表明,阵元参数的合适与否,会明显影响扇形阵的电特性。

5 结论

由图3中计算值与测试值的一致性,充分证明了本文对复杂的水平极化扇形阵的公式推导和算法简化是正确的。同时也表明作者所编制的LPDA扇形阵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[J].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[J].微波学报,2000,16(2):106~110.
- [3] 李世智.电磁辐射与散射问题的矩量法[M].电子工业出版社,1987,1~44.



丁晓磊 (1971-),女,河南人,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 (1956-),男,四川人,教授。从事天线理论与工程、电磁场数值算法、电磁兼容、电磁散射与逆散射等方面的教学和科研工作。2002年作为访问学者在香港城市大学工作一年,从事微带电路的矩量法数值分析等研究工作。

郭宏 (1968-),男,四川人,高级工程师。1986年毕业于成都电讯工程学院电磁场工程系微波技术与天线专业,工学学士。长期致力于天线理论和工程研究,先后有十几篇论文在年会论文集或学术刊物上发表,获得过两项国家科技进步二等奖。

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>