

# 基于模拟退火算法的对数周期偶极天线相位中心计算

姜铁华 苏东林 杨争光

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 采用模拟退火算法(SA)结合矩量法精确计算对数周期偶极天线(LPDA)的视在相位中心, 并对某 LPDA 的视在相位中心随不同频率的变化特性进行了分析, 给出了天线 E 面和 H 面半功率波瓣宽度内的相位方向图。良好的计算结果表明, 该方法是有效的。

**关键词:** 对数周期偶极天线; 模拟退火; 视在相位中心

## Calculation for the Phase Center of LPDA Based on Simulated Annealing Algorithms

JIANG Tie-hua, SU Dong-lin, YANG Zheng-guang

(Department of Electrical Engineering, BeiHang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The approximate phase center of LPDA is calculated in this paper using simulated annealing algorithms combined with MOM. The characteristic of phase center varies with frequency is analyzed and the fluctuated curves of phase are presented within the main lobe in E-plane and H-plane radiation patterns. It can be concluded from the good result of phase center that this method is an effective method to calculate the LPDA' phase center.

**Keywords:** Log periodic dipole antenna, Simulated annealing algorithms, Approximate phase center.

### 引 言

在干涉仪测向中, 准确确定阵列单元的相位中心对于提高测向精度至关重要。当 LPDA 作为干涉仪的阵列单元使用时, 由于 LPDA 的远区场并不是球面波, LPDA 没有完整的相位中心, 所以如何在天线的主瓣宽度内确定准确的相位中心是一个非常重要的问题。关于 LPDA 相位中心的研究, 文献[1]提出了可变相位中心的概念, 认为给定的方位角不同, 可变相位中心的位置也不同, 即该相位中心是方位角的函数。文献[2]提出了视在相位中心的概念, 并对 LPDA 视在相位中心的存在情况进行了分析和计算。本文重点关注天线主瓣宽度内的视在相位中心的精确计算, 基于矩量法对 LPDA 远区场的分析结果, 提出了采用模拟退火算法(SA)结合矩量法精确计算对数周期偶极天线(LPDA)的视在相位中心的方法, 并对相位中心随频率的分布情况进行了分析, 给出了天线 E 面和 H 面半功率波瓣宽度内的相位方向图, 对于相位测向应用具有一定的

指导意义。

### 1 对数周期偶极天线

对数周期偶极天线是极宽频带天线中的一类, 其优点是频带宽、结构简单、造价低廉、架设容易等, 在 HF、VHF、UHF 频段应用十分广泛, 其结构如图 1 所示, 它是由 N 根平行排列的对称振子构成, 其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, 这里<sup>[3]</sup>

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

式中,  $p$  为振子序号, 按振子长度由小到大排列, 分别以  $p=1, 2, \dots, N$  标示;  $R_p$  为天线的虚顶点  $O$  到第  $p$  根振子的垂直距离;  $L_p$  为第  $p$  根振子的长度;  $d_p$  为两相邻振子间的距离。

\* 定稿日期: 2006-10-10

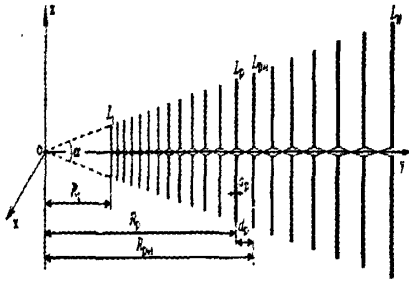


图1 LPDA结构示意图

$N$  根对称振子用双线传输线(即集合线)馈电, 馈源接在最短振子一端, 两相邻振子交叉馈电。LPDA 的整体结构决定于  $\tau$  和结构角  $\alpha$ 。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

$$\sigma = d_p / 2L_{p+1} \tag{2}$$

$\alpha$ 、 $\tau$  和  $\sigma$  的关系为

$$\alpha = 2\arctg \frac{1-\tau}{4\sigma} \tag{3}$$

这种天线具有随频率的对数作周期(周期是  $\ln \tau$ )变化的特点。因为电磁能量由馈电点沿天线结构推进时, 到振子长度约为  $L_p \approx \lambda_p / 2$  (工作频率为  $f_p$ ) 处发生谐振, 由此产生辐射。余下的极小一部分能量继续向前推进, 在天线末端反射回来已极微弱。当频率改变时, 谐振点移动, 但天线的几何形式保证了天线的特性不受谐振点移动的影响。

## 2 基于SA的LPDA视在相位中心计算

所谓相位中心, 是指以该点为球心的等半径球面上的辐射场相位均相等。尽管LPDA的远区场不是球面波, 没有完整的相位中心, 但在LPDA的天线主瓣宽度内, 总可以找到一个点, 使得主瓣宽度内的远区场都可以看作是由这一个点所辐射出来的球面波, 即有视在相位中心<sup>[2]</sup>。

### 2.1 LPDA的辐射方向图计算

视在相位中心的计算依赖于天线远场方向图的准确计算。本文采用矩量法求解, 计算中使用的坐标系如图2所示。采用矩量法求解LPDA的电流分布, 基函数和检验函数均选择分段正弦函数。求出天线上的电流分布后, 可以把天线作为  $N$  个电流元  $I(n)\Delta l_n$  的天线阵而得到线天线的辐射方向图。

根据公式, 远区矢位如下<sup>[4]</sup>:

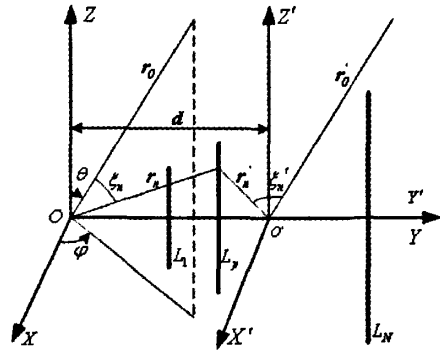


图2 用于计算的坐标系

$$A = \frac{\mu e^{-jk_0}}{4\pi r_0} \sum_n I(n) \Delta l_n e^{jkr_n \cos \xi_n} \tag{4}$$

则远区场分量为:

$$E = -j\omega A \tag{5}$$

式中,  $r_0$  和  $r_n$  分别为远区场点及源点的矢径,  $\xi_n$  是  $r_0$  和  $r_n$  之间的夹角。由远区场分量即可求得电场的幅度和相位方向图。

### 2.2 LPDA的视在相位中心

为确定LPDA视在相位中心的位置, 可以通过模拟退火的全局搜索算法得到。

将原坐标系  $XYZ$  沿  $Y$  轴平移  $d$ , 构成新的坐标系  $X'Y'Z'$ , 新的坐标原点为  $O'$ , 即假定的视在相位中心。 $d$  的长度则是假定的视在相位中心距离原坐标系原点(即天线虚顶点)的距离。

在坐标系  $X'Y'Z'$  中, 远区场点及源点的矢径分别为  $r'_0$  和  $r'_n$ ,  $\xi'_n$  是  $r'_0$  和  $r'_n$  之间的夹角。平移前后源点的矢径有如下关系:  $r'_n = r_n - d$ 。

对于给定的工作频率, 在给定的区间内, 通过模拟退火算法即可找到精确的视在相位中心位置。

### 2.3 模拟退火算法的应用

#### 2.3.1 模拟退火算法的基本思想

模拟退火算法思想最早由 Metropolis 在 1953 年提出, 它的物理背景是固体退火过程的物理图像和统计性质。退火过程是一个徐徐降温的过程, 通过这种降温使系统在每一温度下都达到平衡态, 最终达到固体的基态。令优化问题的一个解及其目标函数分别与固体的一个微观状态及其能量等价, 随

算法进程递减的控制参数  $t$  与固体退火过程中的温度等价, 则对于  $t$  的每一取值, 算法持续进行“产生新解——判断——接受/舍弃”的迭代过程, 在  $t$  趋于零时, 最终求得优化问题的整体最优解。

模拟退火算法由与 Metropolis 准则对应的转移概率  $P$  确定是否接受当前解  $i$  转移到新解  $j$ 。  $P$  的表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$P(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1 & f(j) \leq f(i) \\ \exp\left(\frac{f(i) - f(j)}{t}\right) & f(j) > f(i) \end{cases} \quad (6)$$

模拟退火算法的一般流程如图 3 所示。

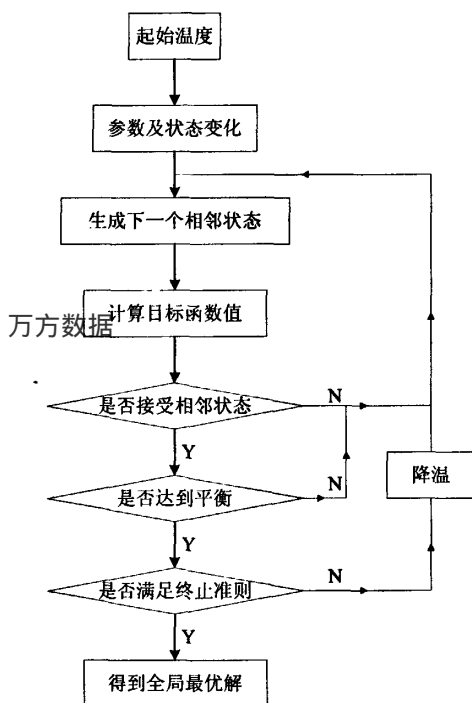


图 3 模拟退火算法流程图

### 2.3.2 目标函数的确定

$$\min f = \sqrt{\sum_{i=1}^{M-1} (\Delta\phi_i)^2} \quad (7)$$

式中,  $M$  为在两个主平面方向图的波束宽度内选取的  $M$  个角度,  $\Delta\phi_i$  为第  $i$  个角度上的相位与主瓣最大方向上的相位之差。函数  $f$  即可反映出相位的波动情况。当  $f$  最小时即对应视在相位中心的位置。

### 2.3.3 算法的实现

1. 由矩量法计算天线在特定频点的 E 面和 H 面的幅度方向图, 读取两个方向图的波束宽度, 并在该波束宽度内选取  $M$  个角度。
2. 设定搜索变量初值  $d$ , 即假定此时视在相位中心位于谐振振子处。
3. 确定搜索范围, 以谐振振子为中心, 前后各 0.2 个工作波长的范围作为变量的搜索区间。
4. 应用模拟退火算法, 计算搜索区间范围内目标函数的最优值。
5. 得到 E 面和 H 面的视在相位中心。
6. 计算过主瓣的其它更多平面内的相位方向图, 可进一步得到天线整体的视在相位中心。

### 2.3.4 结果和分析

我们采用频率范围 200-400MHz 的对数周期偶极天线, 天线参数为  $r = 0.85, \sigma = 0.15$ , 振子总数目为 10, 其中最短振子长度为 0.1976m, 最长振子长度为 0.8533m, 振子的长度直径比为 150, 集合线的特性阻抗和负载阻抗为 83 欧姆。

200-400MHz 不同频率点的 E 面和 H 面视在相位中心以及谐振振子到天线虚顶点的距离如表 1 所示。

表 1 不同频率点 E 面和 H 面视在相位中心及谐振振子到天线虚顶点距离

频率 (MHz)	200	250	300	350	400
E 面 (m)	1.355	1.118	0.936	0.836	0.786
H 面 (m)	1.370	1.142	0.971	0.879	0.814
谐振振子 (m)	1.450	1.232	1.048	0.890	0.757

由表 1 数据可见, 视在相位中心的位置随频率的变化而变化, 在所测试的五个频点处, 对于频率 200MHz、250MHz、300MHz 以及 350MHz, 视在相位中心分布在对应频率的谐振振子的左侧; 400MHz 时, 分布在谐振振子的右侧。说明视在相位中心的位置与谐振振子的位置关系并不是确定的偏左或偏右, 它可能分布于谐振振子的两侧附近, 并且 E 面和 H 面视在相位中心的位置略有差异。但从总体上来看, 表 1 数据明显表现出随着频率的升高, 视在相位中心的位置从长振子处向短振子处移动。

200-400MHz 不同频率点的 E 面和 H 面主瓣宽度内, 不同角度上的相位与主瓣最大方向上相位之差的波动情况如图 4 和图 5 所示, x 轴为扫描的角度范围 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , y 轴为不同角度上的相位与主瓣最大方向上的相位差。

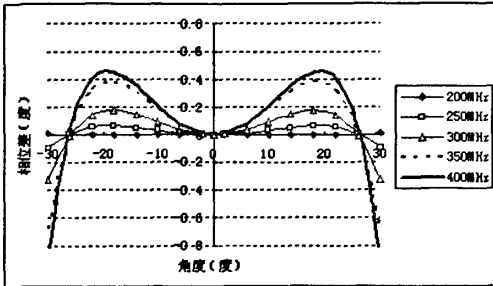


图 4 E 面的相位差

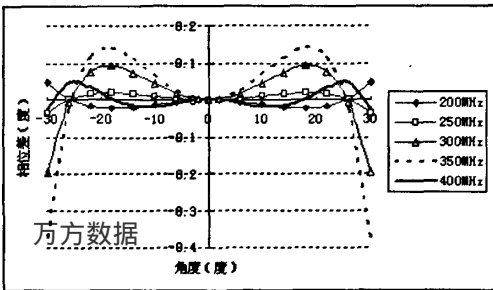


图 5 H 面的相位差

由图 4 和图 5 可见, 相位差随频率的增大略有增加。200-400MHz 频率范围内, 采用模拟退火算法搜索得到的视在相位中心可以使主平面上的最大相差小于 0.8 度, 特别是在 200MHz 时, E 面的最大相差仅为 0.01 度, 说明采用本文的方法得到的

相位中心已很理想, 可满足工程需要。

### 3 结论

本文基于矩量法求得 LPDA 的远区场, 采用模拟退火算法搜索得到 LPDA 的 E 面和 H 面视在相位中心, 并对相位中心的分布情况进行了分析。该方法可以进一步推广到天线整体的视在相位中心的计算, 并可用于对数周期天线阵的视在相位中心的计算, 对于相位测向应用、干涉仪阵单元的使用方面均具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 金元松, 董明玉, 何绍林等. 对数周期偶极子天线的可变相位中心. 电波科学学报, 2001, 16 (3): 323~328
- [2] 丁晓磊, 王建, 林昌禄. 对数周期偶极子天线相位中心的分析和计算. 电子学报, 2003, 31 (9): 1375~1377
- [3] 林昌禄. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990
- [4] R.F.哈林登. 计算电磁场的矩量法. 国防工业出版社, 1981
- [5] 康立山, 谢云, 尤矢勇等. 非数值并行算法——模拟退火算法. 北京: 科技出版社, 1994

**姜铁华** 1980 年生, 女, 博士研究生, 主要研究方向为天线设计, 电磁兼容等。

## 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>