

文章编号 1005-0388(2007)05-0751-04

## 超宽频带双极化对数周期单脉冲天线

张凤林<sup>1,2</sup> 丁晓磊<sup>2</sup> 吕善伟<sup>1</sup> 张媛<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, zhangfl704@163.com, 北京 100083;

2. 航天科技集团第704研究所, 北京 100076)

**摘要** 六个单极对数周期天线单元组成的轴对称圆形阵列天线, 能在超宽频带内产生正交双极化的和、差方向图。首先从理论上分析了任意极化方向的点源天线组成的非相似圆形阵列的方向图, 结果表明: 圆形阵的直径满足  $0.25\lambda \sim 0.5\lambda$  时, 和方向图的  $E_\theta$  分量  $-10$  dB 波束宽度约为  $130^\circ \sim 100^\circ$ , 可作为超宽频带抛物面单脉冲天线的照射器。以点源阵的分析结果为指导, 设计了工作频率为  $1 \sim 8$  GHz 的单脉冲天线, 并结合 HFSS 软件的仿真结果对阵列参数进行了优化。给出了圆形天线阵的驻波以及方向图的实测结果, 在  $0.85 \sim 8.5$  GHz 范围内, 照射器的驻波比小于 2.5。

**关键词** 超宽带天线, 单脉冲, 单极对数周期天线

**中图分类号** TN82 **文献标识码** A

### Ultra-wideband dual-polarization monopulse tracking antenna

ZHANG Feng-lin<sup>1,2</sup> DING Xiao-lei<sup>2</sup> LU Shan-wei<sup>1</sup> ZHANG Yuan<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, BUAA, zhangfl704@163.com,

Beijing 100083, China; 2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract** An ultra-wideband tracking antenna array constructed by six log-periodic monopole antennas (LPMA) is designed, it can generate dual-polarized sum-and-difference-patterns. The pattern of a circular array of six current elements with arbitrary directions of polarization is analyzed. The result reveals that when the diameter of the circular array is in the range of  $0.25\lambda \sim 0.5\lambda$ , the  $-10$  dB  $E_\theta$  beam width of the sum-pattern of the array is in the range of  $130^\circ \sim 100^\circ$ , so, the array can be used as an illuminator of an ultra wideband monopulse reflector antenna. A monopulse antenna array printed on PCB covering frequencies from 1 GHz to 8 GHz is designed in the help of software of HFSS. VSWR and dual CP polarization sum-and-difference-patterns of the antenna are tested, VSWR of the illuminator is less than 2.5 in the range of  $0.85 \sim 8.5$  GHz.

**Key words** ultra-wideband antenna, monopulse, log-periodic monopole antenna

## 1 引言

抛物面天线的性能很大程度上取决于照射器的性能。一些传统跟踪天线的照射器, 如五单元十字

交叉振子阵、多喇叭天线阵、多模喇叭等, 工作带宽为  $5\% \sim 30\%$ <sup>[1~3]</sup>, 各单元的形式、放置的方向一样, 各单元方向图与经过波束形成网络后形成的和差方向图具有相同的极化, 称为相似单元。由单极

对数周期天线<sup>[4~7]</sup>沿圆周对称分布组成的单脉冲圆形阵列照射器,虽然各单元的极化都为线极化,结构形式一样,但是相邻单元的放置方向相差60°,极化方向彼此相差60°,因此,称为非相似阵列。当六个单元的初始相位分别以60°递增或递减时照射器产生左旋或右旋圆极化信号,当以120°递增或递减时照射器产生左旋或右旋圆极化差信号,这种照射器具有在超宽频带内形成左、右旋圆极化和差信号的优点。

能实现超宽频带工作的天线有对数周期天线、螺旋天线、Vivaldi天线、双脊喇叭等多种形式,单独设计一个超宽频带天线相对容易,技术成熟,而超宽频带单脉冲照射器的研制难度很大。选用单极对数周期天线作为照射器的单元,成功研制了一个1~8GHz的左右旋圆极化单脉冲照射器。

## 2 六单元非相似圆形阵列天线的分析与设计

### 2.1 单极对数周期天线的设计

在单极对数周期天线单元设计中,为保证相邻振子之间具有180°的附加相移,采用延长相邻单极振子间馈线长度的方法。在辐射区天线的单极振子与馈电电路相匹配。图1所示为具有阻抗匹配和相位匹配的单极对数周期天线示意图。单极振子被印制在单面敷铜板上,馈电电路用微带线实现。在每个振子附近,馈线阻抗升高,且其高阻抗线的长度也是按对数周期方式变化的。单极天线的长度为210mm,高度为90mm,地板尺寸为25×90mm<sup>2</sup>。

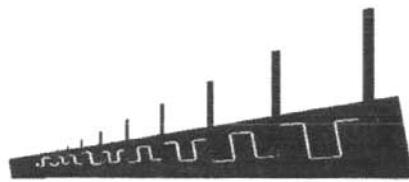


图1 单极对数周期天线

### 2.2 六单元非相似点源圆形阵的方向图函数

图2所示为超宽频带对数周期圆形天线阵的实物图,它是由六个单极对数周期天线单元组成的锥形阵,相邻的两个天线单元之间的夹角为60°。

尽管各个单元天线的形状相同,但是,由于指向不同,该照射器为非相似源组成的锥形阵列,在计算方向图时无法应用方向图乘法。由于照射器的结构非常复杂,应用理论公式精确计算照射器的方向图

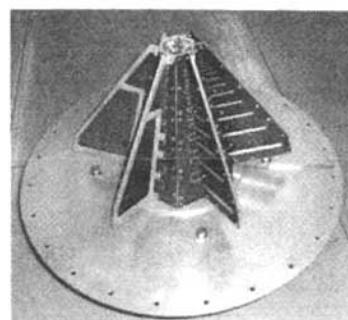


图2 六单元超宽频带对数周期照射器照片

是非常困难的,而采用HFSS软件进行仿真时,在工作站上只计算单个频点就要十几个小时,如果只依靠HFSS软件的仿真结果进行阵列参数的设计,将是很费时间的。为简化分析,讨论基本特性,假设辐射振子位于xoy平面,通过计算分析圆形阵的波束宽度与点源所在圆半径之间的关系,推导与单元天线极化相同的点源组成的圆形阵的方向图函数。

对于相似单元组成的圆形阵列,其方向图的计算比较成熟<sup>[8]</sup>,而对于非相似单元组成的圆形阵列,方向图的计算较复杂。设第n个电流元位于xoy平面上半径为a的圆周上,其坐标为(x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>, z<sub>n</sub>),电流为J<sub>n</sub>,且

$$J_n = e^{-j\phi_n} [\hat{x} \cos \beta_n \sin y_n + \hat{y} \sin \beta_n \sin y_n + \hat{z} \cos y_n], \quad n = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

式中,φ<sub>n</sub>为第n个电流元的初始相位;β<sub>n</sub>、y<sub>n</sub>分别为第n个电流元的极化方向和x、z轴的夹角。

第n个电流元的磁矢位A<sub>n</sub>可表示为

$$A_n = \frac{\mu e^{-j\phi_n}}{4\pi r_n} J_n \quad (2)$$

第n个电流元的远区电场E<sub>n</sub>可表示为

$$E_n = -j\omega A_n = C_0 \frac{e^{-j\phi_n}}{r_n} J_n \quad (3)$$

式中,r<sub>n</sub>=R-(x<sub>n</sub>sinθcosφ+y<sub>n</sub>sinθsinφ+z<sub>n</sub>cosθ)是第n个电流元到远区场点P的距离,R为坐标原点到场点P的距离,x<sub>n</sub>=acosφ<sub>n</sub>,y<sub>n</sub>=asinφ<sub>n</sub>,在图3所示的坐标系下φ<sub>n</sub>=60°×(n-1),n=1,2,……,6,由于z<sub>n</sub>=0,故r<sub>n</sub>=R-asinθcos(θ-φ<sub>n</sub>);C<sub>0</sub>=-jωμ/4π。

根据场的叠加原理,六个电流元的总电场E为

$$\begin{aligned} E &= \sum_{n=1}^N E_n = C_0 \frac{e^{-j\phi}}{R} \sum_{n=1}^N e^{j2\pi \sin \theta \cos(\theta - \phi_n)} J_n \\ &= C_0 \frac{e^{-j\phi}}{R} [\hat{x} f_x(\theta, \phi) + \hat{y} f_y(\theta, \phi) + \end{aligned}$$

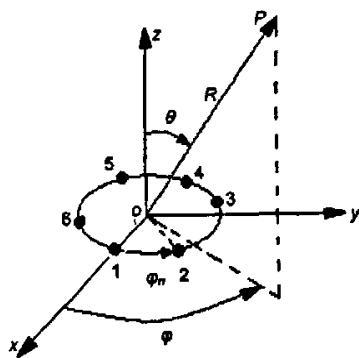


图3 电流元的坐标示意图

$$\hat{z} f_z(\theta, \phi) \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} f_x(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N e^{j[\beta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \alpha_n]} \cos \beta_n \sin \gamma_n, \\ f_y(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N e^{j[\beta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \alpha_n]} \sin \beta_n \sin \gamma_n, \\ f_z(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N e^{j[\beta_n \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \alpha_n]} \cos \gamma_n. \end{aligned}$$

远场的两个分量的方向图函数为

$$f_\theta(\theta, \phi) = \cos \theta [f_x(\theta, \phi) \cos \phi + f_y(\theta, \phi) \sin \phi] - f_z(\theta, \phi) \sin \theta \quad (5a)$$

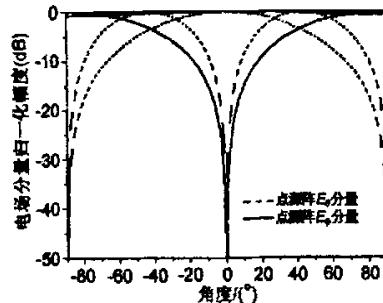
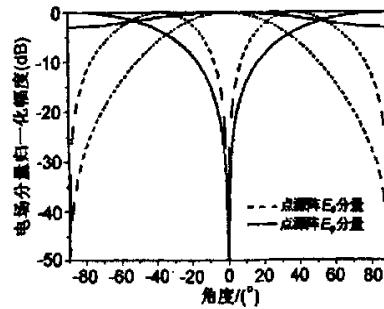
$$f_\phi(\theta, \phi) = -f_x(\theta, \phi) \sin \phi + f_y(\theta, \phi) \cos \phi \quad (5b)$$

当六个单元的初始相位  $\alpha_n$  分别以  $60^\circ$  和  $120^\circ$  递增或递减时, 将分别形成左、右旋圆极化和信号与差信号, 具体的微波网络参见文献[9]。

### 2.3 单元间距对阵列波束宽度的影响

根据式(5a)和式(5b)可以计算得到六单元圆形阵圆极化信号和、差幅度方向图, 结果表明, 圆形阵的波束宽度随圆半径的增大而变窄。假设第一个电流元的极化方向和  $x$  轴的正向一致,  $\beta_n = 60^\circ \times (n-1)$ ,  $n = 1, 2, \dots, 6$ ,  $\gamma_n = 90^\circ$ , 圆形阵的直径  $2a$  等于  $0.25\lambda$  和  $0.5\lambda$  时, 和方向图的  $E_\theta$  分量  $-10\text{dB}$  波束宽度分别约为  $130^\circ$  和  $100^\circ$ , 如图4所示。实际照射器的单元方向图比点源天线窄, 照射器的方向图会比图4更窄。因此, 作为照射器使用时, 单元天线应该组成锥形阵列, 在较低频率, 工作在锥形的底部, 在频率的高端, 工作在锥形的顶部。单元间距与方向图宽度的关系正是大多数超宽频带天线不适宜作为

单脉冲照射器的原因, 也是超宽频带单脉冲抛物面天线比非反射面的超宽频带单脉冲天线更难设计的主要原因。

(a)  $\alpha = 0.125\lambda$ (b)  $\alpha = 0.25\lambda$ 图4 六单元点源阵  $E_\theta$  和  $E_\phi$  分量的归一化和、差方向图

### 3 六单元对数周期照射器的性能测试

六个单元天线组成锥形天线阵后, 对单元的驻波比和阵列的方向图进行了测试。图5和图6为照射器实际测试得到的驻波特性和方向图。驻波比的测试是用Agilent公司的矢量网络分析仪N5230A测量的, 方向图是用NSI公司的球面近场天线测试系统测量的。由图5可知, 在  $0.85 \sim 8.5\text{GHz}$  频率范围内天线的驻波比均小于2.5。测试照射器的方向图时, 为得到形成圆极化和、差信号的相位, 将照射器联上馈电网络<sup>[9]</sup>后对整体馈源进行测试。由于频点很多, 加上又分为和、差方向图, 左、右旋方向图, 数据很多, 不便一一列出, 图6仅列出了  $2.2\text{GHz}$ 、 $5.5\text{GHz}$  频点处的左旋和、差幅度方向图, 波束宽度和零深都符合作为抛物面天线照射器的要求。

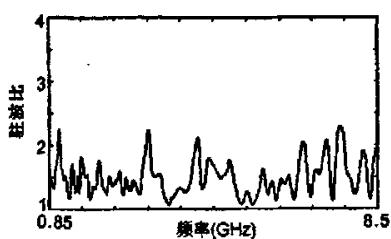
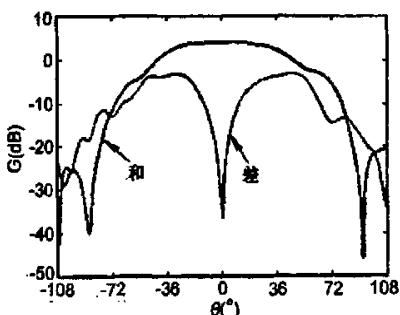
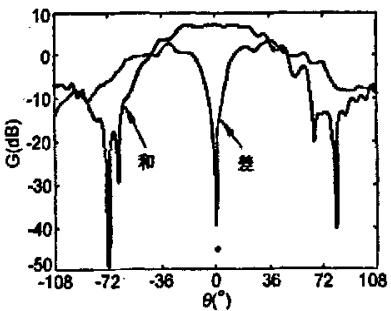


图5 照射器驻波比测试曲线  
(0.85~8.5GHz)



(a) 2.2GHz 和差方向图



(b) 5.5GHz 和差方向图

图6 左旋圆极化和、差幅度方向图测试曲线

## 4 结论

研制了一种由六个单极对数周期天线单元组成的单脉冲圆形天线阵。由于阵列中的单元天线为非相似源,在计算方向图时无法应用方向图乘法。为此,在设计时,首先理论分析了任意极化的非相似点源天线组成的圆形天线阵的辐射特性,以点源阵的分析结果为指导,设计了圆锥形天线阵的初始参数,结合HFSS软件的仿真结果对阵列参数进行了优化。由图5和图6对圆形天线阵的驻波特性和辐射方向图的实测结果表明,各项技术指标符合前馈抛物面天线的照射器要求,该天线阵还可单独作为超宽带电子侦察天线使用。

## 参考文献

- [1] 张凤林,李鹏程. S波段5米遥测自跟踪天线[R]. 航天国防科学技术报告,HT-19980791.
- [2] A Sullivan. QUADRASCAN a state-of-the-art monopulse antenna feed [C]. ITC, 1987;537-541
- [3] Lee Kuan Min. Design and Analysis of a Multimode Feed Horn for a monopulse Feed [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1988, 36(2):105-106.
- [4] 肖开奇. 单极对数周期天线阵[J]. 电子对抗技术, 1991, 6(2):21-27.
- [5] 丁晓磊. 超宽带单极对数周期天线的研制[J]. 遥测遥控, 2005, 26(增刊):1-4.
- [6] T J Athanasas, P G Ingerson. Log-periodic arrays with split delay-line feedes [J]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1986, (Ap-S. Digest). Vol. 2:765-768
- [7] R C Johnson. Antenna Engineering Handbook, Third Edition[M]. 1993, Chapter 40, pp13-14
- [8] 李平,卜安涛,史小卫. 利用寄生振子降低振子阵中方向图的不圆度[J]. 电波科学学报, 2003, 18(6):668-672.  
Li P, Bu A T, Shi X W. The decrease of the un-roundness of an array's element pattern with parasitic elements[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(6):668-672.
- [9] 张凤林,孙向珍. 超宽频带单脉冲跟踪天线系统的研究[C]. 2005全国微波毫米波会议,深圳:1589-1592.



张凤林 (1964—),男,湖南人,航天科技集团704所研究员,从事卫星导航、遥测遥控等天线的研制工作。



丁晓磊 (1971—),女,河南人,高级工程师,2002年毕业于电子科技大学,获电磁场与微波技术专业博士学位。主要研究方向为超宽带天线、波导缝隙阵等天线设计和测量技术。

E-mail: dxiaolei@163.com



吕善伟 (1937—),男,辽宁人,北京航空航天大学教授,博士生导师,主要从事微波天线方面的研究

E-mail: lueshw@buaa.edu.cn

## 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](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>