

文章编号: 1001-4322(2012)03-0739-04

## 连续相位变化毫米波衍射天线\*

陈 鑫, 潘文武, 薛长江, 余 川, 屈 劲, 陈世韬, 施美友

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 高功率微波技术实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 基于菲涅尔原理及卡塞格伦天线设计方法, 设计了一种口面直径为 200 mm 的卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线。天线采用连续相位修正方式, 由一组同心菲涅耳相位修正圆环组成, 与传统卡塞格伦抛物面天线相比, 该天线具有平面化结构, 大大减小了天线自身重量, 天线辐射性能较离散相位衍射天线有大幅度提高。在 95 GHz 频率下, 采用物理光学法进行仿真计算, 并采用近场扫描系统进行了天线性能测试, 天线 3 dB 波束宽度分别为 0.95° 及 1.05°, 天线实测增益为 44.1 dB, 天线口面效率为 65%。

**关键词:** 菲涅耳相位修正平面天线; 抛物面; 物理光学; 毫米波; 衍射天线

**中图分类号:** TN820      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3788/HPLPB20122403.0739

国外在平面衍射天线方面的研究起步较早, 在 20 世纪 60 年代早期, Sobel 等人就设计了相位反转型透射式 Fresnel 波带板平面天线和相位反转型完全平面化的透镜天线<sup>[1]</sup>。但从衍射光学角度来看, 这两种天线都只不过是具有  $(0, \pi)$  相位结构的衍射透镜天线, 其衍射效率比较低。近年来, 国内在平面衍射天线方面开展了深入研究, 大都是在国外一些菲涅耳离散相位平面天线研究工作的基础上的改进, 以期提高口面辐射效率及拓展其应用范围等, 研制出了无副面遮挡的偏馈平面衍射天线、用于多馈源多波束扫描平面衍射天线等<sup>[2-3]</sup>。由于二元光学中不能制作连续相位结构, 因此多采用相反转型透射式 Fresnel 波带板或多层板微带圆环阵列构成离散相位变换的菲涅耳平面天线<sup>[4-10]</sup>。这种离散相位变化类型的平面天线口面效率较低, 难以广泛应用。随着近年来毫米波及太赫兹技术研究的升温, 研制相关毫米波及太赫兹频段天线迫在眉睫。反射型毫米波衍射平面结构天线具有轴向尺寸小、重量轻和易于收装等优点, 容易与载体共形, 可以满足毫米波相关项目应用需求, 具有广泛应用前景。由于光学频段波长太短, 连续相位结构很难进行加工, 但随着机械加工能力的增强, 可以保证 3 mm 频段高精度大口径天线的加工制作。本文将光学设计方法应用于毫米波天线设计中, 通过优化天线结构, 选择良好馈电方式及照射馈源等, 设计了具有连续相位变化的高口面效率的卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线, 并实验测试了天线的电性能。

### 1 设计原理

如图 1 所示, 设抛物面焦距为  $F$ , 口面半径为  $a$ , 焦点到等相位面的距离为  $Z_f$ , 光线经抛物面反射后到达等相位面 PA 光程为  $L_1$ , 光线到达等相位面的光程为  $L_2$ , 相对应每个菲涅耳相位修正圆环半径为  $r_n$ , 则有

$$\begin{cases} L_1 = F/\cos^2(\theta/2) + [F/\cos^2(\theta/2) - Z_f/\cos\theta]\cos\theta \\ L_2 = Z_f/\cos\theta \\ r_n = Z_f\tan\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$Z_f = F - a^2/4F \quad (2)$$

光程差为

$$|L_1 - L_2| = [F/\cos(\theta/2) - F - (a^2/4F)\cos\theta](1 + \cos\theta) \quad (3)$$

依据光程差计算得到菲涅耳相位修正圆环所要修正的相位, 使得从焦点  $F$  发出的光线经天线反射后到达等相位面的相位差为  $2n\pi (n=0, 1, 2, \dots)$ 。假设抛物面上任意

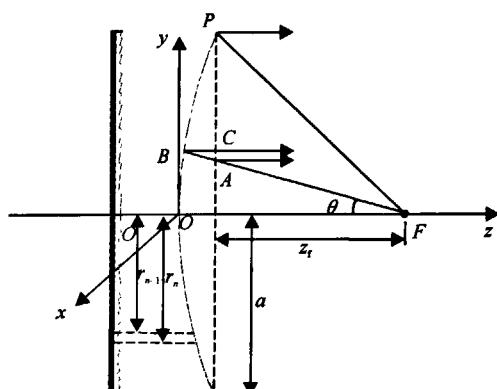


Fig. 1 Design of Fresnel zone plate(FZP) antenna

图 1 天线设计原理图

\* 收稿日期: 2011-03-30; 修订日期: 2011-10-14

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 陈鑫(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事微波传输与发射技术研究; chenx\_frank@sohu.com.

点  $B(x, y, z)$  经过相位修正后的坐标为  $A(x - p\Delta x, y - p\Delta y, z - p\Delta z)$ , 其中  $p @ (\lfloor L_1 - L_2 \rfloor / \lambda)$ , “@”表示向坐标原点方向取整。

$$\begin{cases} \Delta x = [\lambda / (1/\tan\theta + \csc\theta)] / \tan\varphi \\ \Delta y = \lambda / (1/\tan\theta + \csc\theta) \\ \Delta z = -\lambda / (1 + \sec\theta) \end{cases} \quad (4)$$

## 2 天线设计

考虑到最终测试时候所需的倍频器及矩圆转换波导都为刚性连接, 若采用正馈馈电方式, 则倍频器及波导连接器件都会产生严重的遮挡及连接问题, 从而影响天线电性能测试结果。若采用偏置馈电形式, 由于倍频器体积及自身质量较大, 给天线支架的结构设计带来一定的难度, 采用偏置方式馈电对于最终的近场测试也有很多不便之处, 例如近场数据采集时接收天线口面及近场测试架与天线出射波束如何保持垂直等问题。因此, 菲涅耳相位修正平面天线采用后馈双反射面的卡塞格伦式较为合理。

以 95 GHz 做为中心频率, 设计了焦径比为 0.6、口径为 200 mm 的卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线, 其实物结构如图 2 所示。采用口面半径  $r = 6.0345$  mm、长度  $L = 67.9175$  mm 的波纹喇叭作为馈源。选择副反射面边缘照射锥削为  $-17$  dB, 曲率半径为 2.71, 副反射面直径为 40 mm, 此时天线副面对正面的遮挡引起天线增益的损耗约 0.6 dB。相心距离喇叭口面距离及喇叭束腰半径为

$$\begin{cases} l = \frac{L}{1 + 0.838(L\lambda/r^2)^2} \\ w \approx L \frac{0.54\lambda/r}{\sqrt{1 + 0.838(L\lambda/r^2)^2}} \end{cases} \quad (5)$$

副反射面在  $yOz$  轴上投影形成的双曲线方程为<sup>[11]</sup>

$$\frac{(z - 85)^2}{(12.915)^2} - \frac{y^2}{(32.530)^2} = 1 \quad (-20 \text{ mm} \leq y \leq 20 \text{ mm}, 85 \text{ mm} < z) \quad (6)$$

根据以上设计参数, 编程得到卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线几何数据, 建立的天线 3D 模型如图 3 所示。

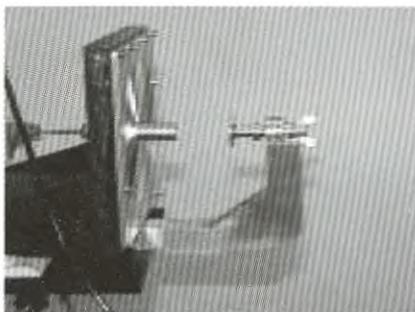


Fig. 2 Physical structure of Cassegrain FZP antenna

图 2 天线实物结构

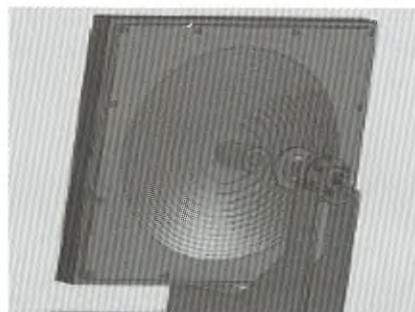


Fig. 3 Design of Fresnel zone phase correcting rings

图 3 菲涅耳相位修正圆环设计图

## 3 电性能数值仿真和实验测试

在 95 GHz 频率下, 此天线属于电大尺寸天线, 可采用高频算法中的物理光学法计算天线远场方向图及增益等电性能指标, 经软件仿真得到天线远场方向图如图 4 所示。天线增益达到 44.2 dB, 天线效率为 65%, 与传统抛物面天线辐射效率接近; 天线的轴向深度为 1.6 mm, 远远小于同等指标参数下传统抛物面 50 mm 的轴向深度。在更大口径天线应用方面, 卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线的优势将会更加明显。

以 95 GHz 作为中心频率, 利用高精度天线近场扫描系统对毫米波卡塞格伦菲涅耳相位修正平面天线进行测试。天线近场扫描所得的幅度、相位分布如图 5 所示, 天线 E 面、H 面方向图

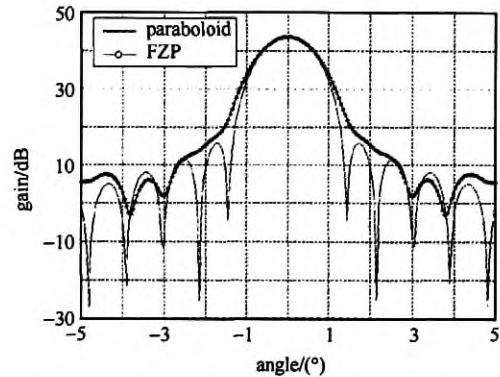


Fig. 4 Simulated far-field pattern of Cassegrain FZP antenna (compared with paraboloid antenna)

图 4 天线远场方向图(与抛物面天线比较)

如图6所示,天线3 dB波束宽度分别为 $0.95^\circ$ 及 $1.05^\circ$ ,天线实测增益为44.1 dB,天线口径效率为65%,与仿真结果一致。与同口径大小的传统抛物面天线相比,卡赛格伦菲涅耳相位修正平面天线在轴向深度大幅降低的同时其口面辐射效率没有明显降低。

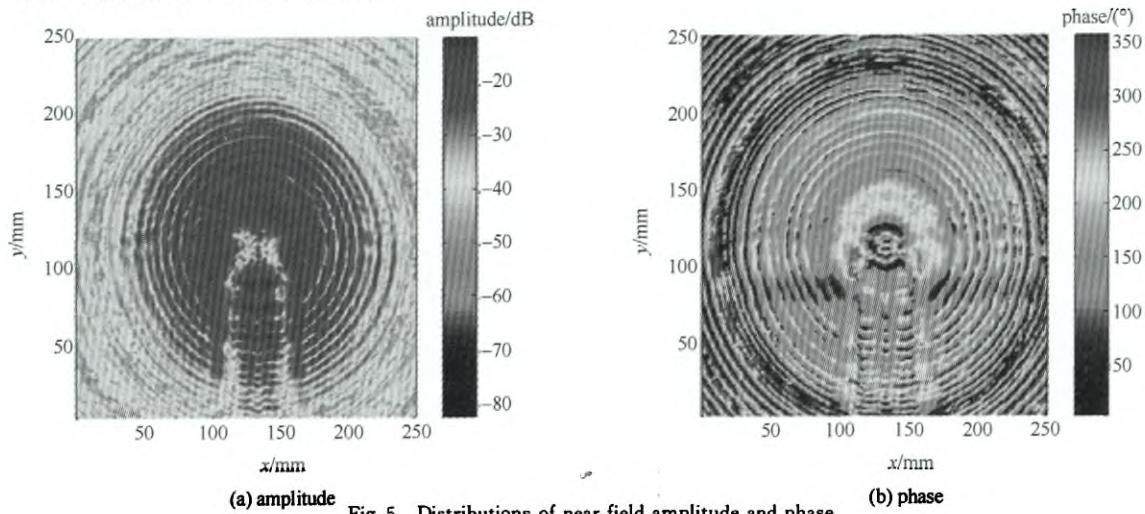


Fig. 5 Distributions of near-field amplitude and phase

图5 天线近场幅度和相位分布

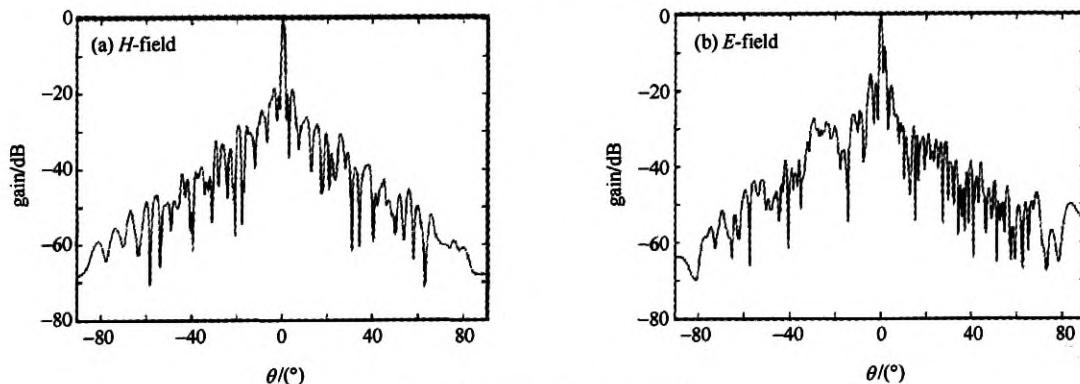


Fig. 6 Tested antenna radiation patterns

图6 天线实测方向图

#### 4 结 论

本文基于菲涅耳原理及卡赛格伦天线设计方法,设计了一种口面直径为200 mm的卡赛格伦菲涅耳相位修正平面天线。与传统卡赛格伦抛物面天线相比,卡赛格伦菲涅耳相位修正平面天线具有平面化结构,大大减小了天线自身重量;天线性能优于离散相位衍射天线性能,口面效率与同口径大小的理想抛物面天线相当。在95 GHz频率下,采用物理光学法进行仿真计算,并采用近场扫描系统进行了天线性能测试,天线3 dB波束宽度分别为 $0.95^\circ$ 及 $1.05^\circ$ ,天线实测增益为44.1 dB,副瓣电平-20 dB,工作带宽约为中心频率的15%,天线口面效率为65%,与仿真结果一致。同口径大小的卡赛格伦抛物面天线轴向深度约50 mm,而卡赛格伦菲涅耳相位修正平面天线轴向深度只有1.6 mm,具有明显的优势。与同口径大小的传统抛物面天线相比,该天线在轴向深度大幅降低的同时,其口面辐射效率没有明显降低。

#### 参考文献:

- [1] Wiltse J C. The Fresnel zone plate lens[C]//Proc of SPIE. 1985,554: 41-47.
- [2] 李校林,杜惠平. 偏馈FZP天线的远场辐射特性[J]. 电波科学学报,2002,17(1):38-41. (Li Xiaolin, Du Huiping. The radiation field characteristics of the offset FZP antenna. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(1):38-41)
- [3] 杜惠平. 基于菲涅耳区修正结构的多波束自适应天线[J]. 电波科学学报,1999,14(1):116-120. (Du Huiping. A new multibeam adaptive antenna based on the Fresnel zone phase correcting antenna. *Chinese Journal of Radio Science*, 1999, 14(1):116-120)
- [4] Gouker M A, Smith G S. A millimeter wave integrated-circuit antenna based on the Fresnel zone plate[J]. *IEEE MTT-S Digest*, 1991, 40(5):968-977.

- [5] Wiltse J C. Gain and far-field patterns for phase-correcting Fresnel zone plate antennas at millimeter-wave and terahertz frequencies[C]// Proc of SPIE. 2007, **65490T**.
- [6] Huder B, Menzel W. Flat printed reflector antenna for mm-wave applications[J]. *Electronics Lett*, 1988, **24**(6): 318-319.
- [7] Guo Y J, Barton S K. Fresnel zone plate reflector incorporating rings[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Lett*, 1993, **3**(11): 417-419.
- [8] Wiltse J C. Zone plate designs for terahertz frequencies[C]// Proc of SPIE. 2005, **5790**: 167-179.
- [9] Hristov H D, Herben M H A J. Millimeter-wave Fresnel zone plate lens and antenna[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**(12): 2779-2785.
- [10] Van Houten J M, Herben M H A J. Analysis of a phase-correcting Fresnel-zone plate antenna with dielectric/transparent zones[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1994, **8**(7): 847-858.
- [11] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (Ye Qixiao, Shen Yonghuan. Practical mathematics handbook. Beijing: Science Press, 2006)
- [12] 杨可忠, 杨智文. 现代面天线新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993. (Yang Kezhong, Yang Zhiwen. New technologies of modern reflector antenna. Beijing: Posts and Telecom Press, 1993)
- [13] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. (Lin Changlu. Antenna engineering handbook. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002)

## Millimeter wave diffraction antenna based on continuous phase correction

Chen Xin, Pan Wenwu, Xue Changjiang, Yu Chuan, Qu Jin, Chen Shitao, Shi Meiyu  
*(Laboratory of High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics,  
 CAEP, P. O. Box 919-1016, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** A Cassegrain phase-correcting Fresnel zone plate antenna has been designed based on the Fresnel principle and the Cassegrain antenna design method. It consists of a suite of Fresnel zone continuous phase correcting concentric rings, and its diameter of aperture is 200 mm. Compared with the traditional paraboloid antenna, the Cassegrain Fresnel zone plate antenna has a flat and light structure. It precedes the discrete phase diffraction antenna in radiation performance. The simulation has been performed based on the physical optics method, and the test has been performed with the near-field scanning system. The test shows that, at 95 GHz the antenna has an efficiency of 65%. Its 3 dB beam widths are 0.95° and 1.05°, and its gain is 44.1 dB.

**Key words:** phase-correcting Fresnel zone plate antennas; paraboloid; physical optics; millimeter wave; diffraction antenna

## 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>