

毫米波介质衍射天线的设计和制作*

卢振武 于立民 樊仲维 廖江红 肖志河** 宋立维

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 吉林, 长春, 130022)

TN822.1

摘要 利用衍射光学原理设计制作连续位相结构的 Fresnel 波带片式的透射毫米波天线. 该天线具有重量轻、体积小、增益高、成本低等优点. 对该天线进行了实际测量, 并对天线进行远场模拟计算与分析, 计算结果与实测值吻合较好.

关键词 毫米波, 透射, 衍射天线.

THE DESIGN AND FABRICATION OF MILLIMETER WAVE DIELECTRIC DIFFRACTION ANTENNA*

LU Zhen-Wu YU Li-Min FAN Zhong-Wei LIAO Jiang-Hong XIAO Zhi-He** SONG Li-Wei

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A kind of transmission millimeter-wave antenna of Fresnel zone plates with continuous phase structure was designed and fabricated with the principle of diffraction optics. This kind of antenna has the features of light weight, small volume, high gain and low cost. Measurements and simulation calculation and analysis were carried out on the antenna. The result of calculation agrees well with the measurement.

Key words millimeter-wave, transmission, diffraction antenna.

引言

在毫米波段, 人们一直期待能制作出性能优良的平面天线. 国内外大多采用 Fresnel 波带片的形式来进行平面化. 传统的 Fresnel 波带板式天线是一种平面天线, 由于是采用离散化的台阶结构的位相, 其衍射效率不高, 电性能不理想. 采用离散化位相的天线一般制作成 2 个或 4 个台阶. 2 个台阶天线设计参数为^[1] $D/f=1.6$ (D 为天线直径, f 为天线焦距), $f=80\text{mm}$, 工作频率 $\nu=94\text{GHz}$. 当边缘照射为 -10dB 时, 增益为 35dB ; 4 个台阶的平面天线参数为^[2] $D/f=1.5$, $f=400\text{mm}$, $\nu=11.8\text{GHz}$. 当边缘照射为 -10.8dB 时, 增益也不超过 35dB . 由此可见离散的位相结构使能量的损失太大.

36GHz. 当边缘照射电平为 -6.6dB 时, 天线增益可达 40.9dB ^[3]. 在系统进一步优化情况下, 天线的性能还会得到提高, 是较理想的平面天线. 根据同样道理我们又设计并制作了与反射式平面天线参数基本相同的透射介质衍射天线. 根据测量获得的数据表明, 该天线的电性能优于反射天线, 可达到实用水平.

1 天线的参数及设计

为便于比较, 采用了与反射平面天线基本相同的设计参数: 设计频率 $\nu_0=36\text{GHz}$; 焦距为 $f=400\text{mm}$; 相对孔径 $D/f=1$; 选用材料为光学塑料 PMMA, 材料折射率为 $n=1.6$.

整周期的 Fresnel 波带板定义为同心圆环, 各圆环之间相差波长的整数倍, 即第 k 个波带边缘距离聚焦点的光程为 $f+k\lambda$ (见图 1). 相邻环带间光程差为 1 个 λ (见图 2), 其中 λ 为设计波长, f 为天线的焦距, 则每个环带的半径由下式给出:

鉴于此, 我们曾用衍射光学理论设计和制作了连续位相的反射式毫米波平面衍射天线, 理论分析和实验均已证明该类天线的电性能可以与抛物面天线媲美. 该天线的基本参数为 $D/f=1$, $f=400\text{mm}$, $\nu=$

* 国家 863 基金(编号 409-3.3)资助项目

** 中国航天工业总公司 207 所

稿件收到日期 1999-05-12, 修改稿收到日期 1999-09-29

* The project supported by the High-Technology Foundation of China (NO. 409-3.3)

** Mailing address: Institute No. 207, Chinese Space Aeronautics Industry Co. Ltd.

Received 1999-05-12, revised 1999-09-29

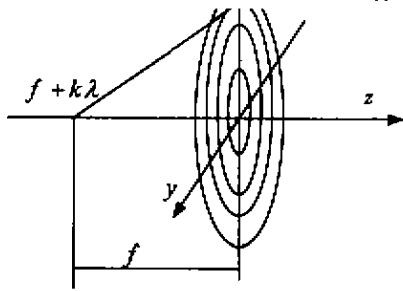


图1 Fresnel 波带片的环带

Fig. 1 Fresnel zone plates

$$r_n = \sqrt{kf\lambda + (k\lambda)^2} \quad (1)$$

一般来说 Fresnel 波带板有多个焦点,我们只考虑小于无穷远范围内距离最大的一个.我们使用与处理反射式平面衍射天线相同的方法,通过计算机辅助设计在口径 $D=400\text{mm}$, $\nu_0=36\text{GHz}$ 的情况下,天线被分成 6 个环带.经过计算,未平面化前的天线厚度约为 146.7mm ,平面化后的厚度仅为 32.6mm ,可见经过平面化后天线所占的空间体积明显减小.

2 透射天线的分析

评价天线性能的一个重要指标是天线对电磁波的定向辐射能力,一般用远场功率方向图来表示,即用功率表示的远场衍射强度分布图.在只考虑远距离处的场时,天线可以作为点源看待,它在单位立体角内辐射的功率只是方向的函数,归一化的功率方向图定义为^[1]:

$$P(\varphi, \theta) = \frac{P'(\varphi, \theta)}{P'_M} \quad (2)$$

式(2)中 $P'(\varphi, \theta)$ 为 φ, θ 方向的功率通量密度, P'_M 为功率通量密度的最大值.根据互易原理可以证明接收天线的电参数与发射天线的电参数是一致的,因此通过计算天线的发射性能可以得到天线接收性能.

透射天线是以 Fresnel 波带片的形式出现并发挥作用,所处理的毫米波具有准光学特性,所以可以采用衍射光学中的菲涅尔-基尔霍夫衍射理论进行分析.我们采用口面场法分析具有连续位相结构的透射式衍射天线,同时兼顾不同环带之间的位相关系,采用的坐标系如图 3 所示^[4].

以天线面中心为坐标原点的直角坐标系为 (x, y, z) ;以馈源中心为原点的球坐标系为 (ρ, φ, ξ) ;以天线中心为坐标原点的球坐标系为 (r, θ, φ) ^[3-5].馈源置于

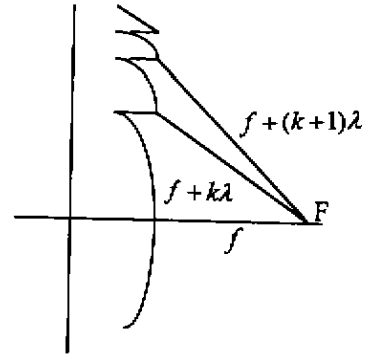


图2 波带片的基本结构

Fig. 2 The basic structure of zone plates

天线焦点处.根据衍射公式经过衍射屏衍射,远场上一一点 P 的衍射强度分布为:

$$U(p) = \frac{-j}{2\lambda} \iint (1 - \cos\theta) U_0(q) \frac{e^{jk r'}}{r'} ds \quad (3)$$

式(3)中 $U_0(q)$ 为天线孔径后面上一点的电场强度分布,由于天线的相对孔径较大 $(D/f=1)$, $(1 + \cos\theta)/2$ 为倾斜因子,假设馈源发出的入射波为点光源发出的球面波,则 $U_0(q)$ 可以表示为:

$$U_0(q) = U'(\rho, \varphi, \xi) \frac{e^{jk\rho}}{\rho} t(R) \quad (4)$$

式(4)中 $U'(\rho, \varphi, \xi)$ 表示馈源的辐射特性,即初级的振幅方向图, $t(R)$ 为透射天线的透过率函数,且:

$$t(R) = \sum_{i=0}^M \exp(-jk \frac{R^2}{f_i}), \quad i = (0, 1, 2, \dots, M) \quad (5)$$

式(5)中 $f_i = f_0 - \frac{i\lambda}{n-1}$, 为不同环带的焦距.

当计算天线的远场时,矢径 r' 可以近似用 r 来代替,将 r 对远场平面作近似展开,那么天线的远场衍射分布为(直角坐标系下):

$$U(p) = \frac{1}{j2\lambda} \exp[\frac{jk}{2z}(x_0^2 + y_0^2)]$$

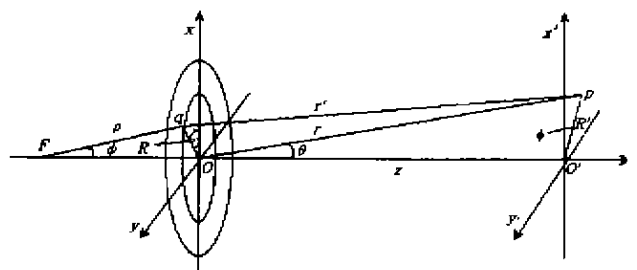


图3 衍射天线的几何坐标选取

Fig. 3 The geometrical reference frame of the diffraction antenna

$$(1 + \cos\theta) \iint_{\Sigma} U_0(q) \exp[jk(\frac{x^2 + y^2}{2z})] \exp[-jk(\frac{xx_0 + yy_0}{z})] dx dy, \quad (6)$$

式(6)中 x_0, y_0 为 p 点在远场平面上的直角坐标, 将式(3)和式(4)代入式(6)并化成极坐标得:

$$U(p) = \frac{\pi}{j\lambda} \exp[-jk\frac{R^2}{2z}(1 + \cos\theta)] \sum_{i=0}^M \int_0^{2\pi} \int_{\xi_i}^{R_i} \frac{U'(R)}{\rho} \exp[jk(\rho - \frac{R^2}{2f_i})] \exp(jk\frac{R^2}{2z}) \exp[-jkR(\text{tg}\theta\sin\varphi - \text{tg}\theta\cos\zeta\cos\varphi)] RdRd\xi, \quad (7)$$

式(7)中 $U'(R)$ 为馈源发射电磁波 $U'(\rho, \varphi, \zeta)$ 在天线平面上的口面场振幅分布, 其中将坐标 (ρ, φ, ζ) 变换为坐标 (R, ξ) 分布, 当馈源的辐射特性为线极化时该分布与 ζ 有关, 我们仅考虑某一个面(E-面或H-面)时, 可以仅考虑随 R 的变化, 考虑到远场分布时 $z \gg R$, 式(7)中 $\exp(jk\frac{R^2}{2z})$ 项可忽略不计, 经过计算机模拟计算得到天线的方向图, 其坐标的转化可由下式完成.

$$\rho = \frac{(n-1)f_0 - i\lambda}{n\cos\varphi - 1}, \quad (8)$$

$$\cos\varphi = \frac{f_0 + h}{\sqrt{(f_0 + h)^2 + R^2}}, \quad (9)$$

式(9)中 h 为天线表面浮雕高度, 可由式(10)的面形方程决定:

$$h = \sqrt{\frac{[(n-1)f_0 + in\lambda]^2}{(n^2 - 1)^2} - \frac{i^2\lambda^2 + 2if_0\lambda + R^2}{n-1}} - \frac{(n-1)f_0 + in\lambda}{n^2 - 1}, \quad i = (1, 2, \dots, M). \quad (10)$$

3 天线的测量与分析

该天线的测量是在北京航天总公司第二研究院 207 所微波暗室中进行的, 增益的测量采用比较法, 用紧缩场产生平行电磁波代替远场作为照射源, 被测天线作为扫描接收天线, 馈源采用圆锥喇叭, 将天线与馈源喇叭置于方位转台上, 照射源发出功率稳定的毫米波, 天线将接收到的信号经计算机处理后得到响应结果.

在设计频率为 36GHz 时对天线的主要电性能进行测量, 其结果见表 1.

从测量结果看该天线的半功率宽度较小, 天线的

表 1 衍射天线的主要性能

Table 1 Measured main performances of diffraction antenna

电性能	E-面	H-面
半功率宽度/(°)	1.35°	1.6°
第一旁瓣电平/dB	-13.9	-23.9
交叉极化电平/dB	<-22	<-22
增益/dB	40.7	

方向性较好. 天线的实测增益比较高, 达 40.7 (dB). 图 4 给出了该天线模拟计算与实测结果的比较. 从图 4 中可以看出理论计算的结果要比实测的结果略大一些, 理论计算可以达到 42.5dB. 在理论计算时我们假设到达天线口面的能量全部透射过去, 没有反射和吸收的损失, 而实际并非如此, 这是二者之间存在差别的主要原因.

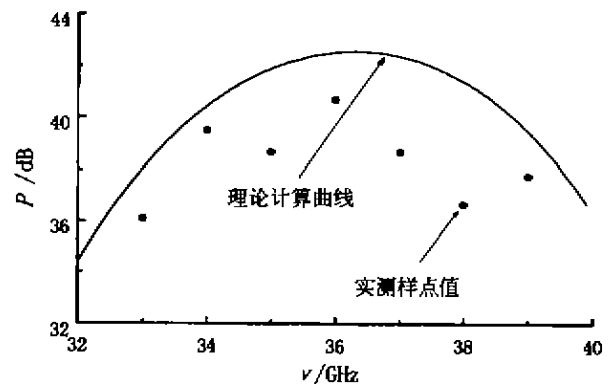


图 4 实测衍射天线的频率特性与模拟计算值的比较

Fig. 4 The comparison between calculated and measured frequency feature result of the diffraction antenna

该衍射天线相对于传统天线有一定带宽限制, 这是因为透射介质天线对色差比较敏感, 而且采用了离散环带结构形式, 各环带之间的位相补偿关系随工作波长偏离设计波长而逐渐减弱, 从而导致增益下降, 工作频带变窄. 实测该天线的带宽约为 6GHz, 为设计频率的 1/6.

图 5 为实测得到的设计频率下的 E-面和 H-面的方向图. 模拟计算得出的 E-面和 H-面方向图差别不大, 而从图中可以看出实测的 E-面和 H-面的方向图差别较大, 造成这种情况的主要原因是我们在计算过程中我们假设天线馈源辐射的方向图为圆对称, 而实际测量使用的圆锥喇叭 E-面和 H-面差别较大. 将模拟计算值与实测值比较(见图 6), 由图 6 可以看出在一定范围内二者符合较好.

从图 6 中可以看出在主瓣范围内二者符合较好,

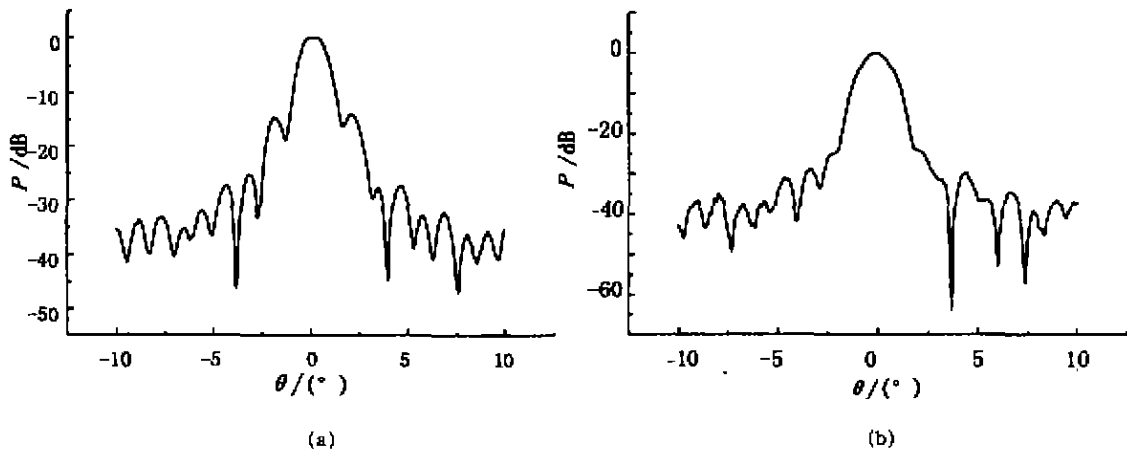


图5 实测衍射天线方向图

(a) E-面 (b) H-面

Fig. 5 Measured radiation patterns of the diffraction antenna.

(a) E-plane (b) H-plane

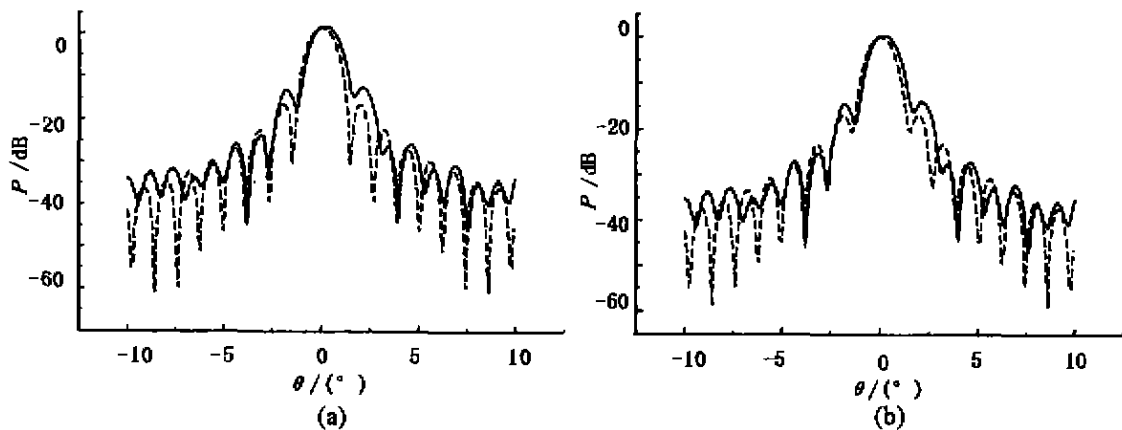


图6 天线E-面方向图模拟结果与实测结果的比较

(a) 忽略天线尺寸 (b) 计入天线尺寸

Fig. 6 The comparison between measured pattern and calculated pattern of E-plane of the antenna

(a) the size of antenna ignored (b) the size of antenna considered

旁瓣位置比较接近,第一旁瓣实测结果比计算结果略高一些,整体与我们模拟计算结果基本一致。

图6中主瓣电平的位置差异主要是由于位置调节误差造成的,测量过程中天线和馈源是分开放置的,安装过程中需要进行手工调节,天线与馈源之间的实际相对位置不可能调整到最佳,无论在轴向还是在垂轴方向上,当馈源偏离天线焦点,从衍射光学角度看都将影响成像质量,即衍射图样外环能量增加,内环能量减少,即旁瓣电平提高。另一方面,馈源的初级方向图对天线的方向图也有影响,主面上的旁瓣电平决定于衍射面上的边缘照射程度,通常边缘照射电平越小,旁瓣电平也就越小,本天线所使用的馈源边缘照射程度比较大,尤其在E面。如果改进天线馈源设计并改进天

线结构将得到更好的测试结果。

从测量结果来看,天线的E-面方向图和H-面方向图差别越大,尤其体现在旁瓣上,其主要原因是初级馈源的方向图不对称造成的。我们采用的馈源的方向图3dB宽度分别为:E-面为 43.8° ,H-面为 23.0° ;边缘照射电平:E-面为 -6.6dB ,H-面为 -8.7dB 。如果采用方向图对称性较好的馈源则可以得到解决。

4 结语

通过对天线的各方面的考虑可以看出根据衍射光学原理设计的平面化毫米波介质衍射天线具有方向性好,增益高,体积小,重量轻等一系列优点。理论计算能比较准确的反映出该天线的远场衍射分布,另外该透

射式衍射天线的设计灵活性比较大,在形式和用途方面可以根据不同需要进行设计.在性能的改善和优化设计方面值得进一步深入研究.

REFERENCES

- [1] Black D N, Wiltse J C. Millimeter-wave characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, **35** (12): 1122-1128
- [2] Guo Y J, Barton S K. Multilayer phase correcting Fresnel zone plate reflector antennas, *International Journal of Satellite Communications*, 1993, **11**: 75-80
- [3] LU Zhen-Wu, FAN Zhong-Wei, LIAO Jiang-Hong, et al. The Design and manufacture for millimeter-wave diffraction antenna, *Chinese Science Bulletin* (卢振武,樊仲维,廖江红等.毫米波衍射天线的设计与制作,科学通报), 1997, **42**(9): 921-925
- [4] Silver S. *Microwave Antenna Theory and Design*. New York: McGraw Hill Book Company, Inc, 1949 (江贤祚等译.微波天线理论与设计.北京:北京航空航天大学出版社), 1989, 101, 195-197, 478
- [5] FAN Zhong-Wei. Calculation of far-field diffractive pattern for quasi-optical diffraction millimeter reflector with continuous phase structure, *Optics and Precision Engineering* (樊仲维.准光学衍射反射式毫米波天线远场衍射图的计算,光学精密工程), 1997, **5**(1): 84-89
- [6] FAN Zhong-Wei. Studies of millimeter-wave plate diffraction antenna. Ph. D. Dissertation of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences (樊仲维.毫米波平面衍射天线的研究,长春光机所博士研究生学位论文), 1997
- [7] XIE Zong-Hao, LIU Xue-Qiao. *Antenna*. Beijing: Beijing Institute of Post and Telecommunication Publishing House (谢宗浩,刘雪樵.天线.北京:北京邮电学院出版社), 1992