

低旁瓣毫米波衍射天线的设计*

于立民 卢振武

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

摘要 介绍了将设计衍射光学元件的方法用于设计低旁瓣毫米波衍射天线的基本设计思想, 设计结果和应用前景. 计算机模拟结果达到了低旁瓣, 尤其是第一旁瓣的效果. 给出了实际应用的进一步优化方法.
关键词 衍射光学, 毫米波天线, 低旁瓣

THE DESIGN FOR SIDELOBE-DEPRESSED MILLIMETER-WAVE DIELECTRIC DIFFRACTION ANTENNA*

YU LiMin LU ZhenWu

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

Abstract The basic idea, the result and the application prospects of the design of sidelobe-depressed dielectric diffraction antenna using the diffraction optics elements designing method were introduced. The simulated result indicated that the sidelobe especially the first sidelobe is depressed. Some optimized methods were given for practical applications.

Key words diffraction optics, millimeterwave antenna, low sidelobe

引言

基于折射和反射原理的传统光学元件, 如棱镜、透镜等不仅制作工艺复杂, 而且元件体积庞大. 因此研制小型、高效、阵列化光学元件变得非常重要. 近年来, 衍射光学元件以其灵活的形式、较小的体积、较轻的重量和独特的性能得到广泛的应用, 受到人们的关注.

在毫米波段人们一直希望毫米波天线能具有较理想的性能, 较小的体积和重量, 而且具有更灵活的形式. 平面衍射天线是可以满足上述要求的平面天线之一. 平面透镜具有衍射效率低的缺点, 通常的透镜天线虽然衍射效率较高, 但方向图旁瓣电平仍然较高, 尤其是第一旁瓣. 所以降低第一旁瓣是我们设计的目的, 这是一个光束整形的过程.

光束整形是根据衍射光学元件上的位相分布直接影响其光场的衍射分布, 根据衍射场的分布要求,

通过一定的位相恢复算法理论上可以得到满足这种衍射分布的位相分布, 因此衍射光学元件是一种非常灵活的光学元件.

在可见光波段光波波长短, 连续位相结构很难进行加工, 而在毫米波段, 连续位相加工不存在困难, 实际制作是可行的. 从已制作的衍射天线样品的实测结果来看天线的电性能良好.

1 衍射光学元件的基本设计理论和设计方案

国外在平面天线方面的研究很多, 一般的平面天线位相结构是离散的, 例如 60 年代早期 Sobel^[1] 等人设计出了位相反转型的透射式 Fresnel 波带板和完全平面化的平面透镜. 从衍射光学角度来看, 这两种天线都只不过是具有 $(0, \pi)$ 位相结构的衍射透镜, 其衍射效率比较低; 从其远场方向图来看, 旁瓣所占能量比较大, 增益不高, 这种形式的天线总体性能并不好, 因此需要设计制作具有连续位相结构的

* 国家 863 基金(编号: 409- 3 3)资助项目
稿件收到日期 2000-03-20, 修改稿收到日期 2000-06-14

* The project supported by the High-Techonology Foundation of China (No. 409- 3 3)
Received 2000-03-20, revised 2000-06-14

衍射天线提高衍射效率 更重要的是利用衍射光学设计方法制作平面化衍射天线可以控制衍射波的波前, 达到降低旁瓣的目的

衍射光学元件的设计通常采用一定算法, 按照理想结构方向进行优化, 可以采用的模型及优化方法很多, 但基本的原理大都如图 1 所示^[2].

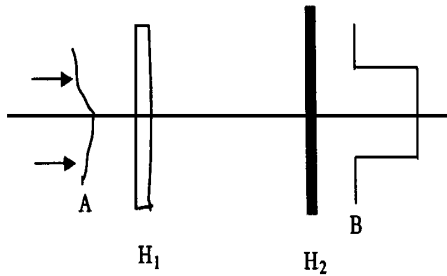


图 1 基本原理图

Fig 1 Schematic diagram of the basic principle

图 1 中 A 为输入光波波前, B 为理想输出光强分布, H₁ 为衍射光学元件, H₂ 为接收面 H₁ 可以是位相型的, 也可以是振幅型的 设计过程是利用一定的算法, 根据一定的衍射规律, 按所要求的强度分布, 通过改变 H₁ 面上的位相分布来改变衍射光强分布, 再根据系统的逆变换来求解衍射光学元件的位相分布, 直到找到满足要求的位相分布, 所以这种问题属于位相恢复问题

设计衍射光学元件的基本算法很多, 自 G-S 算法提出以来, 不少学者又提出了有效的修正 G-S 算法 它们主要有: 几何光学法、模拟退火算法、误差减少算法、最速下降算法、输入输出算法、钟摆迭代算法、ST 算法、杨顾算法、稳相法、遗传算法等^[3].

在这些算法中 G-S 算法是最基本的算法, 其它算法是在此基础上演变而来的 这些算法大都是在

输入、输出面上施加限制条件, 通过反复迭代促使整个过程收敛于最优情况 每一次循环都由四个基本步骤组成^[4], 可以用数学表达式表示为:

$$G_k = |G_k| \cdot \exp(i\varphi_k) = FT\{\tilde{g}_k\} \quad (1)$$

$$\tilde{G}_k = |G| \cdot \exp(i\varphi), \quad (2)$$

$$g_k = |g_k| \cdot \exp(i\phi_k) = FT^{-1}\{\tilde{G}_k\}, \quad (3)$$

$$\tilde{g}_{k+1} = |g| \cdot \exp(i\phi_{k+1}) = |g| \cdot \exp(i\phi_k), \quad (4)$$

式中 g, G 分别为物面和谱面的光振幅分布:

$$g = |g| \cdot \exp(i\phi), \quad (5)$$

$$G = |G| \cdot \exp(i\varphi), \quad (6)$$

$|g|$ 和 $|G|$ 分别为已知的所要求的物面和谱面实振幅, φ 和 ϕ 分别为物面和谱面待定的相位, \tilde{G} 和 \tilde{g} 为重新组合产生的谱面和物面复振幅分布 对于圆对称光学系统, 两函数满足汉克尔变换关系

2 天线设计过程

毫米波衍射天线的设计, 其实就是通过光束整形对位相元件进行恢复 根据降低旁瓣的要求, 给出了要求的光振幅分布, 比较不同的理想分布对应的位相恢复结果 在给出的所要求的分布时, 应考虑到不违背衍射规律, 即中心(主瓣)能量不能超过爱里斑所占的能量 因此, 在要求第一旁瓣电平低的同时, 其它旁瓣(远离第一旁瓣的部分)的电平必须加以提升, 使总能量百分比不变 根据上述要求, 选取以下几种要求的能量分布作为理想的衍射分布(见图 2).

另外, 为满足天线具有良好的方向性, 需要对天线方向图的半功率宽度加以限制, 以相同口径透镜

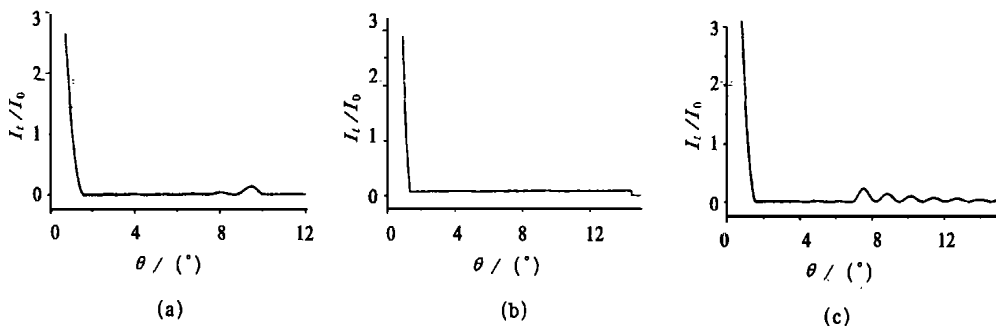


图 2 根据降低第一旁瓣电平要求所采用的 3 种目标衍射分布
(a) 逆旁瓣分布 (b) 平坦分布 (c) 近旁瓣抑制远旁瓣提升分布

Fig 2 The three kinds of object diffraction distribution according to the low side lobe requirement
(a) reverse side lobe distribution (b) flat distribution
(c) near-side lobe restraint and far-side lobe lifting distribution

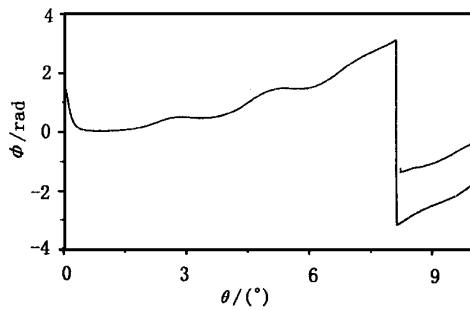


图3 初始位相

Fig. 3 The initial phase

天线能达到的衍射分辨率的半功率宽度作为标准,设计的衍射天线波束宽度要求在此基础上略有加宽,保持半功率宽度不变,而在低于半功率宽度的波束范围外使其波束有所加宽。这样,放宽了限制条件会降低计算量,当然增益会有所下降。

在设计过程中,从理想衍射分布的谱面作为设计过程的开始,根据迭代过程能自动优化的特点,将均匀波前的圆孔衍射作为初始位相分布,其位相如图3所示,将谱面的理想分布和初始相分布结合起来作为初始条件,这个初始分布就作为迭代过程的开始。

根据上述的初始条件利用计算机模拟运算,在进行迭代计算时引入判断条件,即评价函数,作为迭代过程的终止标志。评价函数定义为:

$$D_k = \frac{\sum (|G_i| - |G_i|)^2}{\sum |G_i|^2}, \quad (7)$$

式(7)中 G_i 和 G_i 分别为实际谱面上的衍射振幅分布和目标衍射的振幅分布,给定一个数值 Δ ,当 D_k 趋近于 Δ 时可以作为判断迭代过程停止的条件。迭代过程中根据 ST 算法引入了限制条件^[5]:

$$G_k(i) = G_k(i) \cdot \left[\frac{P(i)}{P_k(i)} \right], \quad (8)$$

式(8)中 $P_k(i)$ 为第 k 次循环时面形, $P(i)$ 为期望的目标衍射分布

$$P(i) = \frac{|G(i)|}{\sum_i |G(i)|}, \quad P_k(i) = \frac{|G_k(i)|}{\sum_i |G_k(i)|}.$$

在实际应用过程中,考虑标量衍射的情况下,根据 Huygens-Fresnel 原理,对于任一光孔,在孔后 z 处的衍射分布为^[6,7]:

$$U(p) = \frac{1}{j2\lambda} \iint (1 + \cos\theta) G_f(q) \times \frac{\exp(jkr_0)}{r_0} ds, \quad (9)$$

式(9)中 q 为光孔上任意一点, $G_f(q)$ 为光孔上的初始位相分布, ds 为 q 点处的面元,同样,从接收屏向光孔的逆运算也满足这一衍射规律。在衍射天线的分析中, $G_f(q)$ 则作为天线馈源的初级辐射在天线面处的分布。

3 模拟计算结果

利用这样的衍射关系进行焦点与天线面间的迭代运算,以图2所示的几种衍射分布和初始位相作为初始条件,经若干次运算分别得到如图4所示的几种位相结构和相应的衍射分布。

图4中所示的各图是在假设均匀入射波波前的情况下,并且假设接收屏为无方向性时进行模拟计算的结果。其中,以逆旁瓣分布作为目标衍射分布可以将近旁瓣,尤其是第一旁瓣的电平大大降低。但是,远旁瓣电平提升很快,甚至可以达到十几 dB。在适当选择馈源的情况下,仍可以达到普遍降低旁瓣的目的。以近旁瓣抑制远旁瓣提升作为目标衍射分布的迭代运算在第一旁瓣的压制效果非常好,从第二旁瓣以后的部分电平普遍提升,但各旁瓣电平基本保持平稳。对于平坦分布的衍射分布,其设计结果基本符合要求,主要是近轴旁瓣电平没有下降,远旁瓣电平也有所提高。

从图4中可以看出,各种位相结构的衍射方向图在第一旁瓣电平降低的同时,其它远旁瓣电平普遍提升,这种情况下是我们所不希望的。由于次级方向图是口面场与初级方向图的迭加结果,可以通过馈源的方向特性加以改善。

通常馈源的选取是力图使其能量的主要部分直接照射到天线面上,如果使口面中心区域照射强度增大,振幅分布向口面边缘逐渐减小,这样会使旁瓣电平下降,尤其是远旁瓣。当然这会增加波束的宽度和降低天线增益。只要增益降低在一定范围内就可以容许。

在选取馈源满足以下方程时我们模拟得到天线的次级方向图如图5所示。

$$G_f(\Psi) = \begin{cases} 2(n+1)\cos^n\Psi, & 0 \leq \Psi \leq \frac{\pi}{2} \\ = 0 & \Psi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (10)$$

从图5中可以看出,旁瓣电平明显降低,图5中三种情况第一旁瓣电平分别达到 -18dB 和 -20dB,达到了压低旁瓣的目的。方向图主瓣有所加宽,3dB

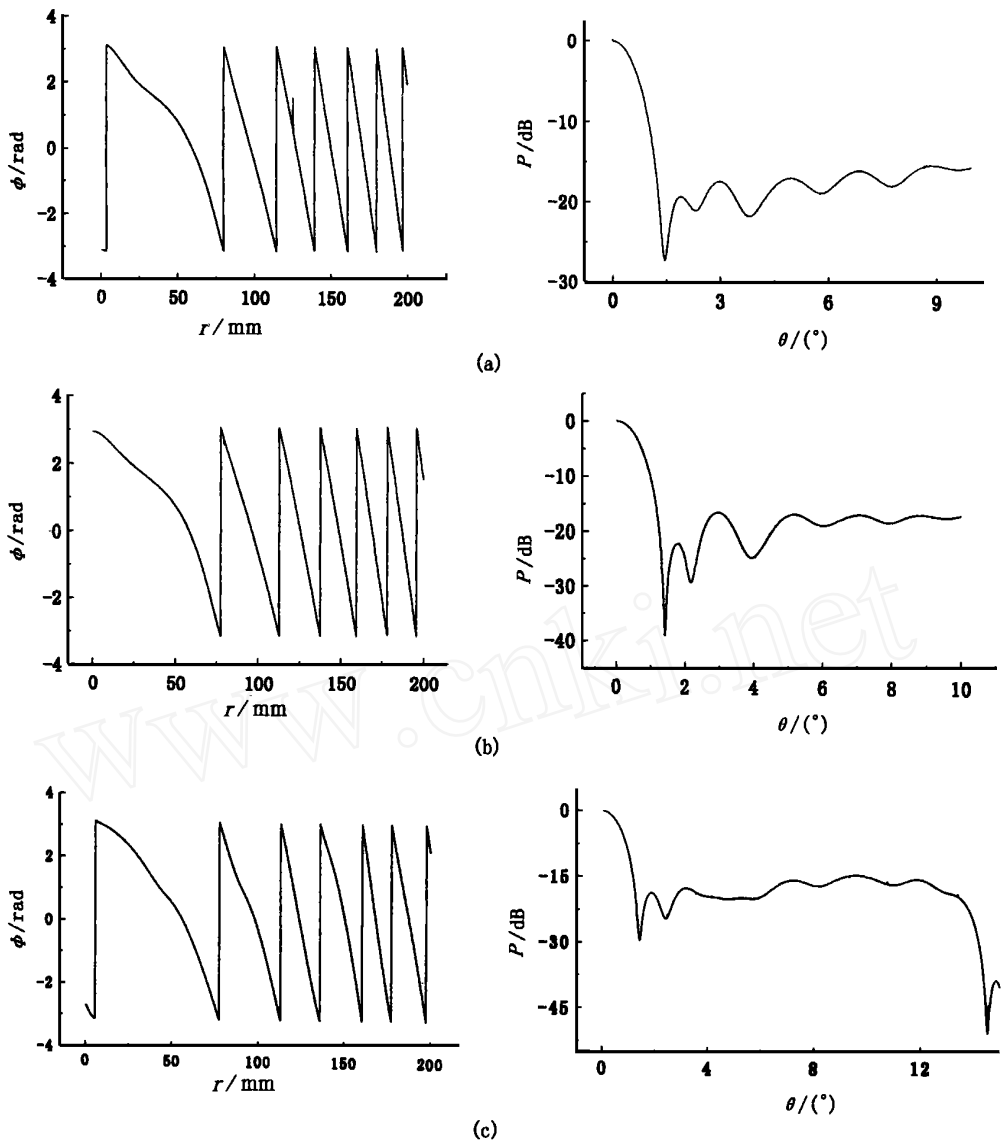


图4 经迭代计算得到的几种位相分布和衍射方向图
 (a) 逆旁瓣分布的计算结果 (b) 平坦旁瓣分布 (c) 近旁瓣抑制远旁瓣提升分布
 Fig. 4 The calculated phase distribution and diffraction pattern after iteration
 (a) reverse side lobe distribution (b) flat side lobe distribution
 (c) near-side lobe restraint and far-side lobe lifting distribution

波束宽度大约加宽 0.2° 这是由于设计过程中未考虑馈源的方向图, 加入馈源后方向图的主瓣加宽, 造成主瓣和第一旁瓣重叠, 如果在设计过程中加入馈源则天线的方向图会有所改善

从得的位相分布来看, 各环带的半径从几 mm 到几十 mm 分布, 这一尺寸范围内是很容易加工的, 因此以上设计结果在实践中是可行的 当然以上的设计工作还只是试探性的, 在今后的实践中还需要进一步完善, 主要包括以下两个方面

首先在设计的迭代算法上需要作进一步工作, 由于只是对旁瓣的高低进行设计和处理, 因此精度

上要求更高 而且由于时间的限制要求有更好的收敛效果和更快的收敛速度

其次, 要求在理论上给出更精确的衍射规律, 因为在设计过程中元件的尺寸达到一定程度时原有的衍射规律表现出很大的误差^[8], 因此利用正确的衍射规律是设计衍射元件的必不可少的条件.

4 结论

利用衍射光学原理设计毫米波衍射天线在原理上是可行的, 在实际设计过程中, 它的形式可以更灵活, 而且由于采用平面结构, 它在其它方面的优越性

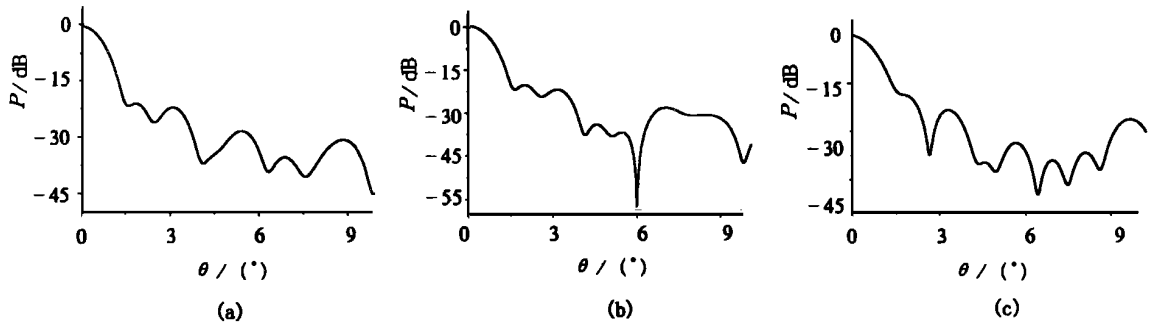


图5 加入馈源后天线的远场方向图

Fig. 5 The far field diffraction pattern of the antenna after adding feed

也值得考虑。从设计的几种结果来看,它们都能够满足性能要求,达到了设计目的。虽然它不是最令人满意的,但是这种方法还是值得肯定的。

这种方法还有值得进一步考虑的地方,例如,需要消除或降低表面反射,透镜天线的表面反射容易引起增益下降和旁瓣提高,可以采用表面匹配的方法,制作表面抗反射模来降低反射。

另外,由于衍射光学元件每个环带的尺寸相对于波长不是非常大,因此在模拟计算上采用标量衍射理论有一些误差,需要进一步采用矢量理论方法进行分析才能够达到精确分析,但目前这种分析方法还不很完备和成熟,仅有有限的一些理论方法,还需要仔细研究。

当然本文得到的仅仅是一些试探性结果,从设计方法、基本算法到采用的初始位相和理想分布等都还有待于在今后的理论和实践中进行选取和优化。

REFERENCES

- [1] Wiltse James C. The Fresnel zone-plate lens, *SPIE*, 1985, **554**: 41—47
- [2] JN Guo-Fan, YAN Ying-Bai, WU M in-Xian. *Binary Optics*. Beijing: National Defence Industry Publishing House (金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学. 北京: 国防工业出版社), 1998, 25, 95
- [3] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures, *Optik*, 1972, **35**(2): 237—246
- [4] Fienup J R. Phase retrieval algorithm: a comparison, *Appl Opt*, 1982, **21**(15): 2758—2766
- [5] Sang Tao, Liao Jiang-Hong, Lu Zhen-Wu, et al. A new Fourier iterative algorithm for the design of phase-only diffractive optical element used in laser beam shaping. *Chinese Journal of Laser*, 1996, **5**(5): 451—460
- [6] HAN Chang-Yuan. *Fundamental Theory and Application of Information Optics*. Changchun: Changchun Publishing House (韩昌元. 信息光学基础理论及其应用. 长春: 长春出版社), 1989: 25—65
- [7] LU Zhen-Wu, YU Li-Min, FAN Zhong-Wei, et al. The design and fabrication of millimeter wave dielectric diffraction antenna, *J. Infrared Millim. Waves* (卢振武, 于立民, 樊仲维, 等. 毫米波介质衍射天线的设计和制作, *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(2): 93—97
- [8] FU Ke-Xiang, WANG Zhi-Heng, WEN Jun, et al. Diffraction order of phase grating, *Acta Optica Sinica* (傅克祥, 王植恒, 文军, 等. 位相光栅的衍射级次, *光学学报*), 1998, **18**(7): 870—876