

K 波段平顶波束赋形反射面天线设计

潘昱旭, 王梓丞, 郭庆功
(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为了获得照射均匀的平顶波束,使用反射面赋形的方法,设计了一款工作在 19~22 GHz 的单偏置反射面天线. 结合 Zernike 多项式展开法与遗传算法优化反射面形面,采用天线远场照射面特定区域照射电平差值作为目标函数以实现平顶波束. 仿真结果表明,赋形后天线方位面方向图在 $\pm 8^\circ$ 范围内,照射电平波动小于 0.6 dB,电平幅度大于 20 dBi.
关键词: 反射面天线; 波束赋形; Zernike 多项式; 遗传算法
中图分类号: TN823+.27 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.043004

Design of a K-band flat-top contoured-beam reflector antenna

PAN Yu-Xu, WANG Zi-Cheng, GUO Qing-Gong
(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to obtain the flat-top beam, an offset reflector antenna that works at 19GHz-22GHz is designed with reflector shaping method, Which using Zernike polynomial expansion method and the genetic algorithm to optimize reflector shape. The difference between actual and ideal value of the irradiation intensity of a specific area on the far-field radiation surface of the antenna is selected as the objective function to achieve flat-top beam. The simulation results show that irradiation intensity ripple of the antenna is less than 0.6dB and the amplitude is greater than 20 dBi within $\pm 8^\circ$ in the azimuth pattern.
Keywords: Reflector antenna; Beamforming; Zernike polynomial; Genetic algorithm

1 引言

反射面天线作为一种典型的大口径天线,在卫星通信、跟踪雷达、气象雷达等领域获得广泛的应用,传统反射面天线的特点是结构简单,易于设计,且具有高增益、低副瓣等优良的性能. 近年来随着应用的扩展,各种新的需求对天线设计提出了更高的要求,在一些应用中要求天线具有平顶波束、余割平方波束等特定的赋形波束^[1-3]. 传统的反射面天线,不能满足要求,在此基础上发展起来的反射面天线赋形技术成为了研究热点^[4-7].

反射面天线赋形设计方法大致可分为直接方法^[4-6]和间接方法^[7]两类. 由于间接方法赋形过程复杂,耗时长,且赋形出的反射面可能出现不连续等情况,所以当前多采用直接方法进行赋形设计. 采用直接方法进行反射面赋形需要为赋形过程合理地设计目标函数,其目标函数的选取将直接影响赋形的收敛速度以及赋形效果的优劣. 文献[8]中采用阶跃函数为理想方向图对反射面赋形优化,实现了平顶波束,区域内照射电平幅度大于 21 dBi,浮动小于 1 dB,但是平顶波束宽度较小,仅 $\pm 2.7^\circ$. 为了获得平顶波束及拓宽平顶波束宽度,近年

收稿日期: 2020-12-04
基金项目: 国家自然科学基金(61701326)
作者简介: 潘昱旭(1996—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为反射面天线赋形. E-mail: 1173608558@qq.com
通讯作者: 郭庆功. E-mail: guoqingong@scu.edu.cn

有部分学者通过引入了阵列天线、超表面覆加天线等方式来实现平顶波束赋形^[9-12]. 文献[9]设计了一个 10 单元对偶馈结天线线阵及其馈电网络实现了俯仰面±12°的平顶波束,区域内照射电平波动小于 1 dB,幅度小于 13 dBi. 文献[10]设计了一款双层超表面天线,通过旋转上层超表面可以实现从-48°~ 48°的平顶波束,但是超表面旋转时照射电平波动高达 5 dB,且照射电平幅度最大也仅为 15 dBi. 文献[11]设计了一款波导缝隙阵列天线,实现了 H 面±37°的平顶波束,照射电平波动超过 3 dB. 上述方法虽然实现了更大角度的平顶波束,但是同时也存在平顶区域内照射电平波动较大,电平幅度偏小以及天线结构复杂等问题,仍然无法满足许多应用的要求.

为了解决上述不足,本文采用一种基于 Zernike 多项式展开曲面函数结合遗传算法的反射面赋形方法实现平顶波束,且在目标函数设计中采用天线远场照射面中一个窄长矩形区域替代常规的二维切面方向图中门函数作为平顶波束约束条件,以此方法优化后的反射面天线最终实现了方位面±8°的平顶波束,平顶区域内照射电平波动小于 0.6 dB,电平幅度大于 20 dBi.

2 初始单偏置反射面天线设计

在进行赋形设计之前,首先需要确定初始反射面天线的结构. 典型的单馈源单偏置反射面天线几何结构如图 1 所示.

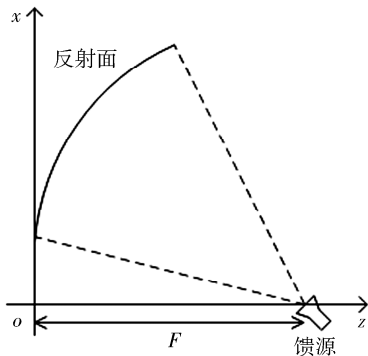


图 1 单偏置反射面天线结构图

Fig. 1 Single offset reflector antenna structure

它由一个偏置的抛物面和一个馈源组成,其中的抛物面定义如下式.

$$z=\frac{x^2+y^2}{4F} \tag{1}$$

为了能使用 Zernike 多项式进行展开,需要将该式变换到单位圆域上,即

$$\begin{cases} x(\rho,\varphi)=x_0+a\rho\cos(\varphi) \\ y(\rho,\varphi)=y_0+b\rho\sin(\varphi) \end{cases},\rho\leqslant 1,0\leqslant \varphi\leqslant 2\pi \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)中得到

$$z=\frac{(x_0+a\rho\cos(\varphi))^2+(y_0+b\rho\cos(\varphi))^2}{4F} \tag{3}$$

其中, x_0,y_0 分别是反射面于 X 轴, Y 轴的偏移量; a 为 XOY 面上投影口径沿 X 轴的半轴长; b 为 XOY 面上投影口径沿 Y 轴方向的半轴长.

设计抛物面天线的步骤一般如下:(1) 确定直径 D ,一般根据给定的增益或者方向图来确定;(2) 选择焦径比 F/D ,确定焦径比之后,馈源的照射角度也就随之确定;(3) 馈源选择与设计.

本设计中,天线的工作频率为 19~22 GHz,初始参数选取为:半轴长 $a=b=75$ mm,焦距 $F=112.5$ mm,反射面沿 X 轴偏置,偏置高度 $x_0=90$ mm. 根据几何关系及天线的焦径比,可计算出馈源的半照射角为: 32.43°,依据该半照射角,设计了一个矩形喇叭天线作为反射面天线的馈源,其宽边长 33 mm,窄边长 22 mm,初始单偏置反射面天线结构如图 2 所示.

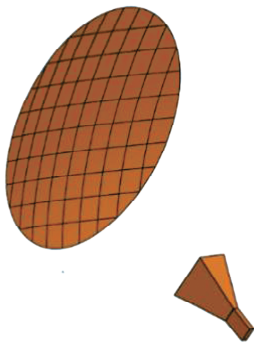


图 2 初始天线结构图
Fig. 2 Initial antenna structure

3 反射面的 Zernike 展开

为了灵活的改变反射面形状,使用了 Zernike 多项展开反射面函数,将展开得到的表示反射面形状的 Zernike 系数作为赋形优化设计的初始变量. Zernike 函数是一组在单位圆域内正交、完备的基函数,通过坐标变换可以对椭圆域内的曲面函数进行展开. 使用 Zernike 多项式拟合的单位圆域内的曲面函数可表示为下式.

$$z(\rho,\varphi)=\sum_{n=0}^N\sum_{m=0}^M[C_{nm}\cos(m\varphi)+D_{nm}\sin(m\varphi)]R_n^m(\rho) \tag{4}$$

其中

$$R_n^m(\rho) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{(n-m)/2} (-1)^k \frac{(n-k)!}{[\frac{n+m-2k}{2}]! [\frac{n-m-2k}{2}]!} \frac{\rho^{n-2k}}{k!}, \\ r \leq 1, m \geq 0, \text{mod}(n-m) = 0 \\ 0, \text{others} \end{cases}$$

(5)

其中, N, M 是展开的阶数; C_{nm} 和 D_{nm} 是展开之后的 Zernike 系数, 可由下式求出:

$$C_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \epsilon_m \iint_{\rho \leq 1} z(\rho, \varphi) \cos(m\varphi) R_n^m(\rho) \rho d\rho d\varphi$$

(6)

$$D_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \epsilon_m \iint_{\rho \leq 1} z(\rho, \varphi) \sin(m\varphi) R_n^m(\rho) \rho d\rho d\varphi$$

(7)

对初始设计的单偏置抛物面使用 Zernike 多项式展开, 取展开阶数 $N=M=6$, 得到 Zernike 系数如表 1 所示.

表 1 初始 Zernike 系数

Tab. 1 Initial Zernike coefficients

C_{00}	C_{11}	C_{02}	Other C_{nm}	D_{nm}
24.25	30	6.25	0	0

4 反射面赋形优化

在完成反射面天线初始设计及 Zernike 展开之后, 对反射面进行赋形优化, 改变反射面天线波束形状, 达到设计目标. 本设计赋形优化的目标为: 天线波束在方位面 $\pm 8^\circ$ 内, 照射电平浮动小于 1 dB, 为了达到这一目标需要合理地设计目标函数. 在设计中选取了天线远场照射面的二维坐标来描述天线的远场, 形式为 (AZ, EL) , 其定义如下.

$$\begin{cases} AZ = -\theta \cos \varphi \\ EL = \theta \sin \theta \end{cases}$$

(8)

表 2 优化得到的 Zernike 系数

Tab. 2 Zernike coefficient obtained by optimization

C_{00}	C_{02}	C_{04}	C_{06}	C_{11}	C_{13}	C_{15}	C_{22}	C_{24}	C_{26}	C_{33}	C_{35}	C_{44}	C_{46}	C_{55}	C_{66}
27.49	3.01	0.07	-0.03	31.29	0.01	0.11	1.99	-0.24	0.03	0.04	0.6	-0.89	-1.19	1.23	0.04

优化前后天线在 20.5 GHz 频率下赋形区域内照射电平对比如图 4 所示, 方位面方向图对比如图 5 所示, 照射平坦度对比如表 3 所示. 可以看出, 经过赋形优化, 天线的波束从原来的点波束变成了

我们选取赋形优化区域为一窄矩形区域, 范围为: $-1^\circ \leq EL \leq 1^\circ, -8.5^\circ \leq AZ \leq 8.5^\circ$, 使这一区域内天线照射电平均匀, 则天线在方位面就具有平顶波束, 赋形区域如图 3 所示.

在该区域内选取若干个采样点来监控区域内的方向系数, 设置优化算法的目标函数如下所示.

$$fitness = \sum_{i=1}^N |D_i - D_{\text{desired}}|$$

(9)

其中, D_i 为第 i 个点处的方向系数; D_{desired} 为目标区域内期望的方向系数. 在本研究中, 我们使用基于物理光学与物理绕射理论的仿真软件 GRASP 计算反射面天线远场方向图, 结合 MATLAB 编程遗传算法对上述目标函数进行优化, 使其值逼近 0, 从而完成赋形优化. 由于赋形区域关于 X 轴对称, 可以预见赋形之后的抛物面也是关于 X 轴对称, 所以在 Zernike 展开系数中, 包含 X 轴奇对称部分 $\sin(m\varphi)R_n^m(\rho)$ 的系数 D_{nm} 等于零, 只需优化 C_{nm} 即可, 大大降低了优化变量个数. 优化之后的系数 C_{nm} 如表 2 所示.

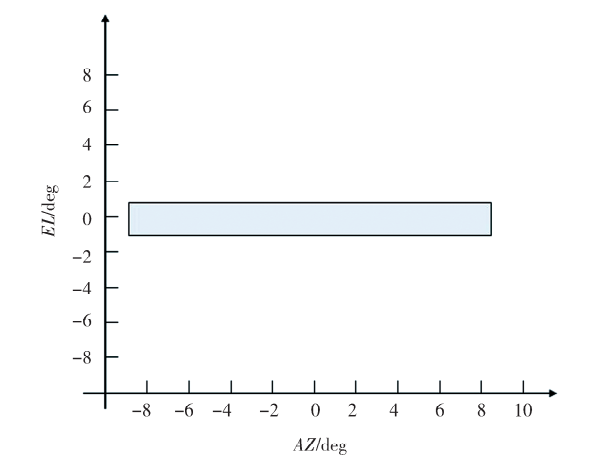


图 3 选取的赋形区域
Fig. 3 Selected region

在方位面上的平顶波束, 其照射平坦度对比优化前有明显提升. 同时在扩宽照射面积的情况下保持了较高的照射强度, 优化后照射强度在平顶区域内大于 20 dBi.

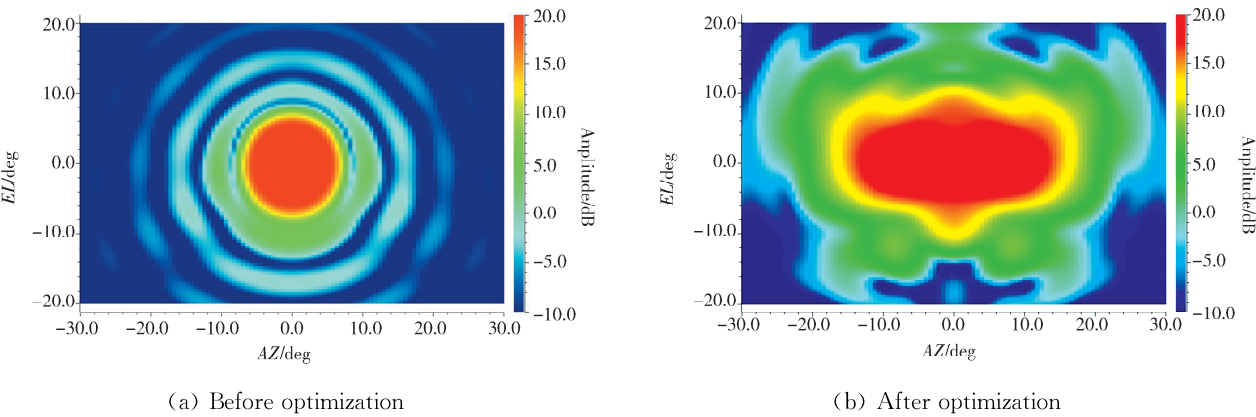


图 4 优化前后照射电平图对比
Fig. 4 Comparison of illumination intensity before and after optimization

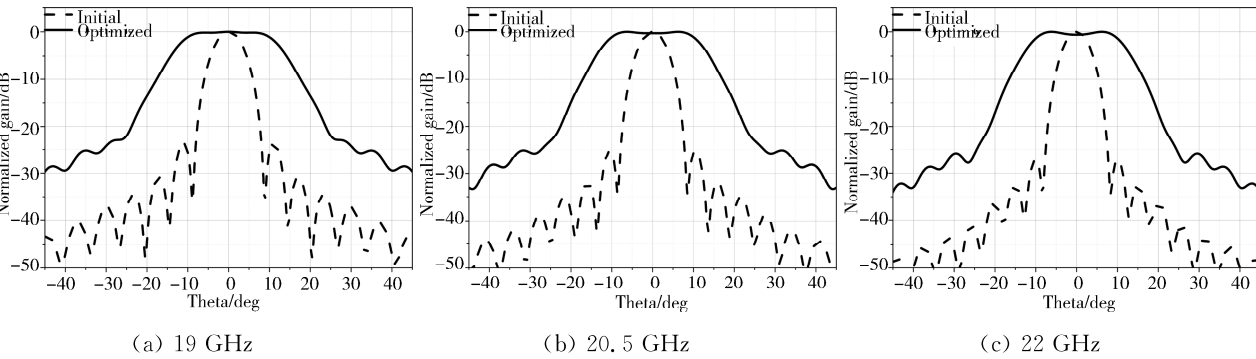


图 5 天线方位面远场方向图对比
Fig. 5 Comparison of radiation pattern in azimuth plane

表 3 优化前后方位面 $\pm 8^\circ$ 照射电平波动对比		
Tab. 3 Ripple contrast before and after optimization within $\pm 8^\circ$ in azimuth plane		
频率/GHz	优化前电平波动/dB	优化后电平波动/dB
19	23.37	0.35
20.5	27.08	0.31
22	30.7	0.59

5 结 论

本文结合 Zernike 多项式表征反射面形面的方法与遗传算法优化技术,设计了一款波束赋形的反射面天线,该天线采用单馈源单偏置反射面的基本结构,通过赋形优化实现了平顶波束。仿真结果表明,该天线在方位面 $\pm 8^\circ$ 范围内,照射电平达到 21 dBi,同时照射电平波动小于 0.6 dB,具有良好的平顶波束特性,能够应用于卫星通信,无线能量传输领域等。

参考文献:

[1] Galindo-Israel V, Mittra R, Cha A. Aperture amplitude and phase control of offset dual reflectors[J]

IEEE T Antenn Propag, 1979, 27: 154.
[2] Meana J G, Martinez-Lorenzo J A, Arias M A, *et al.* A shaped and reconfigurable reflector antenna with low sidelobe level for cellular wireless communications [J]. IEEE Antenn Wirel Pr, 2007, 6: 627.
[3] 徐永佳, 杨存顺, 孙雨婷, 等. C 波段小型化宽带双圆极化微带阵列天线设计[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2020, 57: 719.
[4] Lee K I, Oh H S, Jung S H, *et al.* Moving least square-based hybrid genetic algorithm for optimal design of W-band dual-reflector antenna [J]. IEEE T Magn, 2019, 55: 1.
[5] Dastranj A, Abiri H, Mallahzadeh A. Design of a broadband cosecant squared pattern reflector antenna using IWO algorithm [J]. IEEE T Antenn Propag, 2013, 61: 3895.
[6] Zhang T L, Yan Z H, Li B, *et al.* The optimization of contoured beam reflector antenna based on DEGL [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Guangzhou, China: IEEE, 2010.
[7] Galindo V. Design of dual-reflector antennas with

arbitrary phase and amplitude distributions [J]. IEEE T Antenn Propag, 1964, 12: 403.

[8] 于新华, 王俊, 王鑫, 等. 均匀照射赋形反射面天线设计[J]. 电波科学学报, 2020, 35: 358.

[9] Zhang Z, Liu N, Zuo S, *et al.* Wideband circularly polarised array antenna with flat-top beam pattern [J]. IET Microw Antenna P, 2015, 9: 755.

[10] Singh A K, Abegaonkar M P, Koul S K. Wide angle beam steerable high gain flat top beam antenna using graded index metasurface lens [J]. IEEE T Antenn Propag, 2019, 67: 6334.

[11] Cheng Y J, Xu H, Ma D, *et al.* Millimeter-wave shaped-beam substrate integrated conformal array antenna [J]. IEEE T Antenn Propag, 2013, 61: 4558.

[12] Nguyen N T, Sauleau R, Le C L. Reduced-size double-shell lens antenna with flat-top radiation pattern for indoor communications at millimeter waves [J]. IEEE T Antenn Propag, 2011, 59: 2424.

引用本文格式:

中 文: 潘昱旭, 王梓丞, 郭庆功. K 波段平顶波束赋形反射面天线设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 043004.

英 文: Yu X P, Zi C W, Guo Q G. Design of a K-band flat-top contoured-beam reflector antenna [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 043004.