



·高功率微波技术·

适用于高强度辐射场构建的多模反射面天线^{*}

刘迎喜¹, 伍捍东¹, 任宇辉²

(1. 西安恒达微波技术开发公司, 西安 710100; 2. 西北大学信息科学与技术学院, 西安 710127)

摘要: 高强度辐射场构建系统是对多种武器进行电磁辐照效应试验的关键装备, 其要求在距天线一定距离的区域内产生高强度且尽量均匀分布的电磁场。本文设计了一款适用于该系统的X波段偏置卡塞格伦多模反射面天线。用反射面天线是为了获得尽可能高的增益, 使期望区域内的场强尽可能大; 用多模反射面理论实现了窄波束的平顶赋形, 使期望区域内的场趋于均匀分布, 区域外的场迅速减小。实测结果表明天线增益大于29.8 dB, 3 dB波束宽度不小于4.6°, 在此范围内方向图幅度起伏小于2 dB, 平顶特性明显。此外, 偏置的反射面天线还有馈源遮挡小、馈线损耗低和易于折叠收藏等优点, 可以很好的应用于电磁环境模拟试验设备中。

关键词: 多模反射面; 卡塞格伦天线; 高强度辐射场; 热静区; 平顶波束赋形

中图分类号: TN823

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220341

Multimode reflector antenna suitable for construction of a high intensity radiated field

Liu Yingxi¹, Wu Handong¹, Ren Yuhui²

(1. Xi'an Hengda Microwave Technology Development Company, Xi'an 710100, China;

2. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: High intensity radiated field construction system is a key equipment for electromagnetic irradiation effect test of various weapon systems. It can excite high intensity and evenly distributed electromagnetic field in a certain distance from the antenna. In this paper, an X-band offset Cassegrain multimode reflector antenna is designed for this system. Reflector antennas are used to obtain high gain so that the field strength in the desired region is as large as possible. The flat top narrow beam is realized by using the theory of multimode reflector, which makes the field in the desired area tend to be evenly distributed, while the field outside the area decreases rapidly. The measured results show that the gain of the proposed antenna is greater than 29.8 dB, and the 3 dB beamwidth is not less than 4.6°. In this range, the amplitude fluctuation of the pattern is less than 2 dB, and the flat top characteristic is obvious. In addition, the dual-bias reflector antenna has the advantages of small feed occlusion, low feeder loss and easy folding, which can be well applied to electromagnetic environment simulation test equipment.

Key words: multimode reflector, Cassegrain antenna, high intensity radiated field, broiling static zone, flat top beam shaped

随着现代电子技术的飞速发展, 我国信息化建设的步伐飞速前进。尤其是大型武器装备的设计越来越趋向于高频、高速以及高度集成化, 所以武器系统与电磁环境之间的兼容性问题愈发突出。可以说电磁兼容性已成为直接影响武器装备作战能力的重要因素, 也是制约武器装备战斗力发挥的关键技术^[1-5]。因此, 在研制和使用大型武器装备系统时, 需要完成大量的电磁兼容性实验, 这就使系统级电磁环境模拟试验设备的研制具有非常重大的意义和实用价值。典型电磁环境模拟试验系统最主要的功能之一就是要模拟实际战场的电磁环境, 对武器系统进行高强度辐射场(High Intensity Radiated Fields, HIRF)辐照效应试验^[6-8]。构建HIRF是指在辐射天线的近场或远场指定区域构建一个电磁场分布相对均匀的高场强测试区域, 我们团队将这个区域定义为“热静区”。“静”是要求该

* 收稿日期:2022-10-14; 修订日期:2023-01-09

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022GY-096)

联系方式:刘迎喜, liuyingxi@hdmicrowave.com;

伍捍东, whd@hdmicrowave.com;

通信作者:任宇辉, ryhui@nwu.edu.cn。

区域内电磁场场强的变化小, 即要尽量均匀分布; “热”指区域内的场强或功率要尽可能大。

设计 HIRF 辐射天线的主要难点包括: (1)如何在不同距离、不同辐射区域内获得尽可能强的电磁场, 这要求天线一般要有高增益的特性; (2)热静区内的场强尽可能均匀分布, 而区域外的场强要尽可能小, 即要对天线的辐射方向图进行赋形, 最好能实现矩形“平顶”的波束。为了满足上述要求, 本文中采用偏置的卡塞格伦天线实现了热静区内的高强度辐射, 同时基于多模反射面的原理实现了天线辐射方向图的“平顶”赋形。实验结果表明, 本文设计的天线可以很好地应用于 HIRF 构建系统中。

1 天线的理论方案

1.1 多模反射面理论

2021 年, 在文献 [9] 中伍捍东提出了多模反射面天线的概念。如图 1(a) 所示, 多模反射面天线是指将反射面分为 1 个中间区域和 $N-1$ 个边缘区域。中间区域激励基础模式(主模), 边缘区域激励起多个新的不同模式。通过改变每个区域的反射系数 Γ_i (含幅度和相位), 使多个不同模式的信号在辐射方向上叠加, 进而形成期望的具有特殊形状的高增益赋形方向图, 这里 $i=1, 2, \dots, N$ 。

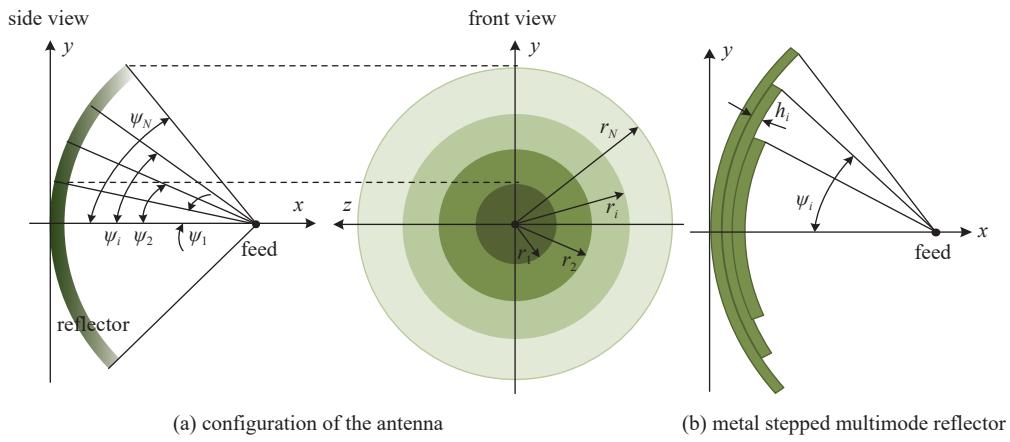


Fig. 1 Multimode reflector antenna

图 1 多模反射面天线

多模反射面天线的一般方向图函数可表示为

$$\begin{aligned} F(\theta) = & \Gamma_1 \int_0^{\psi_1} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi + \Gamma_2 \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi + \cdots + \Gamma_N \int_{\psi_{N-1}}^{\psi_N} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi = \\ & |\Gamma_1| \int_0^{\psi_1} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi + |\Gamma_2| e^{2\alpha_i h_i} e^{-j(4\pi h_i / \lambda_{gi})} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi + \cdots + \\ & |\Gamma_N| e^{2\alpha_N h_N} e^{-j(4\pi h_N / \lambda_{gi})} \int_{\psi_{N-1}}^{\psi_N} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $G_f(\psi)$ 表示馈源的方向图函数, α_i 和 λ_{gi} 分别表示各个区域的衰减常数和介质波长, 且有

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{kD}{2} \cot \frac{\psi_{\max}}{2} \tan \frac{\psi}{2} \sin \theta \\ J_0(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{ju \cos \xi} d\xi \end{array} \right. \quad (2)$$

为了实现不同的 Γ_i , 常用的方法有: ①在每个区域填充不同的介质材料或电阻薄膜; ②在每个区域加载不同特性的超表面结构; ③将金属反射面加工成具有不同高度(h_i)的阶梯状结构。本文设计的天线采用方法③来实现多模反射面。如图 1(b) 所示, 金属反射面上反射波的相位由 h_i 来控制, 即通过调整每一个“台阶”(凸起或凹下)的高度可以调控相应反射波电磁场的相位。这时, $\Gamma_i=-1$, $\alpha_i=0$, $\lambda_{gi}=\lambda_0$, 公式(1)简化为

$$F(\theta) = - \int_0^{\psi_1} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi - e^{-j(4\pi h_1 / \lambda_0)} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi - \cdots - e^{-j(4\pi h_{N-1} / \lambda_0)} \int_{\psi_{N-1}}^{\psi_N} \sqrt{G_f(\psi)} \tan \frac{\psi}{2} J_0(u) d\psi \quad (3)$$

式中: λ_0 表示自由空间波长。

这里还需要强调两点: (1)本文设计多模反射面天线并不等同于阶梯反射面天线^[10-11], 将金属反射设计成阶梯状只是激励多模的一种方式; (2)本设计中的多模并不是指传统意义上的多模馈源^[12-13], 而是将反射面激励的具有不同相位状态的反射波称为不同的模式, 这是对波导、喇叭天线等有界空间中根据场分布定义的模式概念的补充与扩展。

1.2 偏置反射面天线

为了在期望的热静区内构建 HIRF，一般要求辐射天线的增益要尽可能地高，这样可以减小发射机设计的压力。综合考虑辐射效率、馈源遮挡、折叠收藏等因素后，本设计中拟采用偏置后馈形式的反射面天线。一般而言，偏置后馈形式的反射面天线包含卡塞格伦(Cassegrain)天线和格里高利(Gregorian)天线两种主要形式^[14-15]。其中图 2(a)所示的偏置卡塞格伦天线主反射面为抛物面，副反射面为双曲面；图 2(b)所示的偏置格里高利天线主反射面也是抛物面，但副反射面为椭球面。由图可知，对于高功率辐射系统而言，格里高利天线馈源辐射的电磁波在空间传播时都将会汇聚于主反射面的焦点位置上形成“实焦点”，因此容易在此处产生击穿、打火现象。而卡塞格伦天线在电磁波传播过程中不存在实际焦点，主反射面的焦点位置为电磁波传播的“虚焦点”，可以巧妙地规避击穿打火的风险。所以本设计中基于多模反射面天线的理论，采用偏置卡塞格伦反射面天线的形式，设计了适用于 HIRF 构建的新型天线。

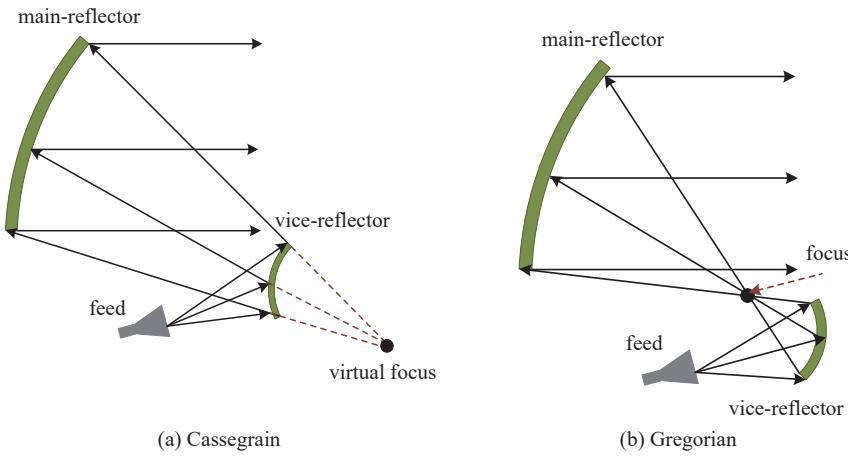


Fig. 2 Basic types of offset reflector antenna

图 2 偏置反射面天线的基本类型

2 天线设计与分析

2.1 天线的基本结构

本文设计的偏置卡塞格伦多模反射面天线基本结构如图 3(a)所示，其中包括多模主反射面、副反射面、馈源和转台等。如前所述，HIRF 系统中辐射天线的方向图应该是高增益、窄波束的平顶方向图，所以本设计中对标准型卡塞格伦天线的主反射面进行赋形设计。具体地，可以参考公式(3)在主反射面上设计一个中心区域和一个边缘区域，两个区域具有一定的高度差 h ，可以使边缘区域的辐射场相比于中心区域产生相位滞后为

$$\Delta\varphi = 2kh = \frac{4\pi}{\lambda_0}h \quad (4)$$

式中： k 表示自由空间中的相位常数。

当 $h=\lambda_0/4$ 时，两个区域反射的电磁波相位相差 180° ，即在边缘引入一个反相模式来抵消一部分最大方向上的

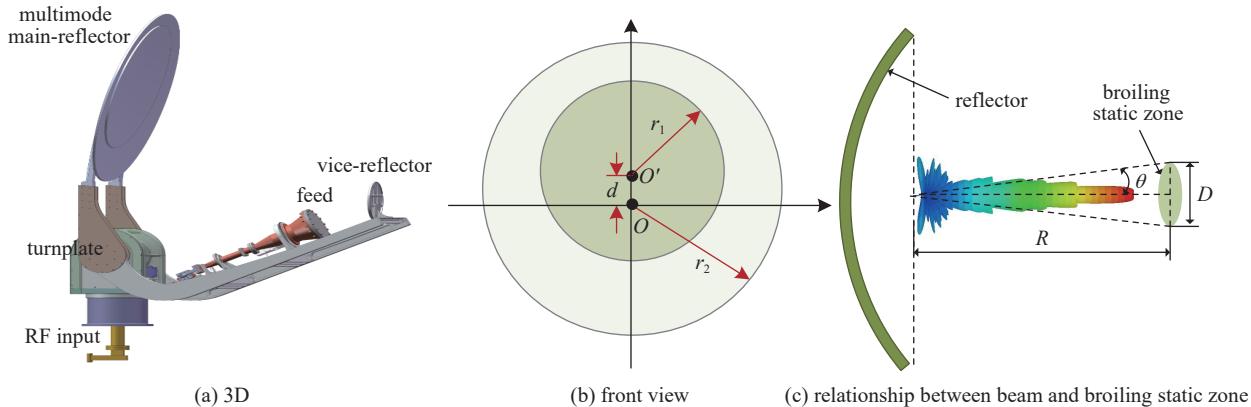


Fig. 3 Offset Cassegrain multimode reflector antenna

图 3 偏置卡塞格伦多模反射面天线

辐射,形成平顶波束。参考图3(b),本设计中多模反射面的中心区域半径 $r_1=23\lambda_0$,边缘区域半径 $r_2=31\lambda_0$,中心区域的中心(O)和边缘区域的中心(O')并不重合,相距为 $d=2\lambda_0$,这样可以解决偏馈时俯仰面结构上的不对称性带来的辐射方向图不对称问题。

设计过程中根据系统发射功率、辐射区域大小等因素综合考虑天线增益及波束宽度。如图3(c)所示,根据热静区的直径 D 和其距天线口面的距离 R ,可求得所设计天线的半功率波束宽度为

$$2\theta_{0.5} = 2 \arctan\left(\frac{D}{2R}\right) \quad (5)$$

进而在工作频率给定的前提下,可以由波束宽度确定天线增益。本设计中根据指标要求,需要在距天线口面20 m远处构建直径不小于1.6 m的圆形热静区,由公式(5)知 $2\theta_{0.5}\approx4.6^\circ$ 。天线的设计增益不小于30 dB,仿真验证时的输入功率为50 MW。

2.2 仿真分析与加工测试

为了验证多模反射面天线在HIRF构建中的优势,仿真对比两种反射面天线的性能。首先,偏置卡塞格伦天线的主反射面采用常规的抛物面。当其直径为0.45 m时,天线远场方向图及热静区中的场强分布如图4所示,天线在中心频率(f_0)处的增益为30.4 dB。其次,将偏置卡塞格伦天线的主反射面改为 $N=2$ 的多模反射面。为了保证天线波束宽度和增益不变,需要将主反射面的口径增大到1 m,此时仿真结果如图5所示。对比分析可知,多模反射面通过调整台阶的高度可以使反射面上两区域的反射波反相,进而远场赋形合成平顶波束,同时也可以大大改善场在热静区内分布不均匀的问题。

表1中将两种天线方案在中心频率处做了对比。分别读出热静区中心和边缘四个点处的场强值,可以看出两

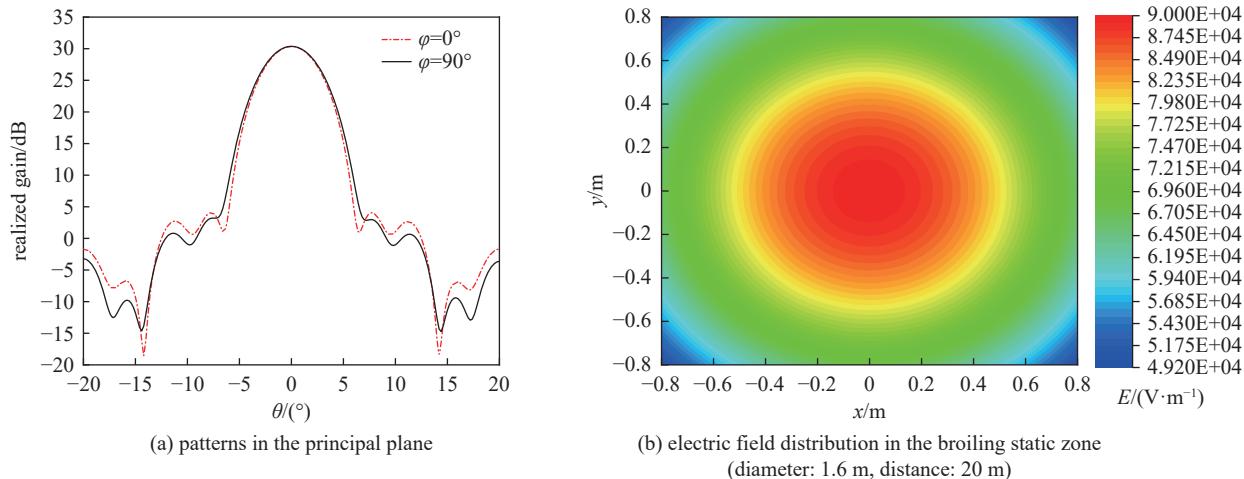


Fig. 4 Simulation results of conventional offset Cassegrain antenna with 0.45 m aperture

图4 口径0.45 m的常规偏置卡塞格伦天线仿真结果

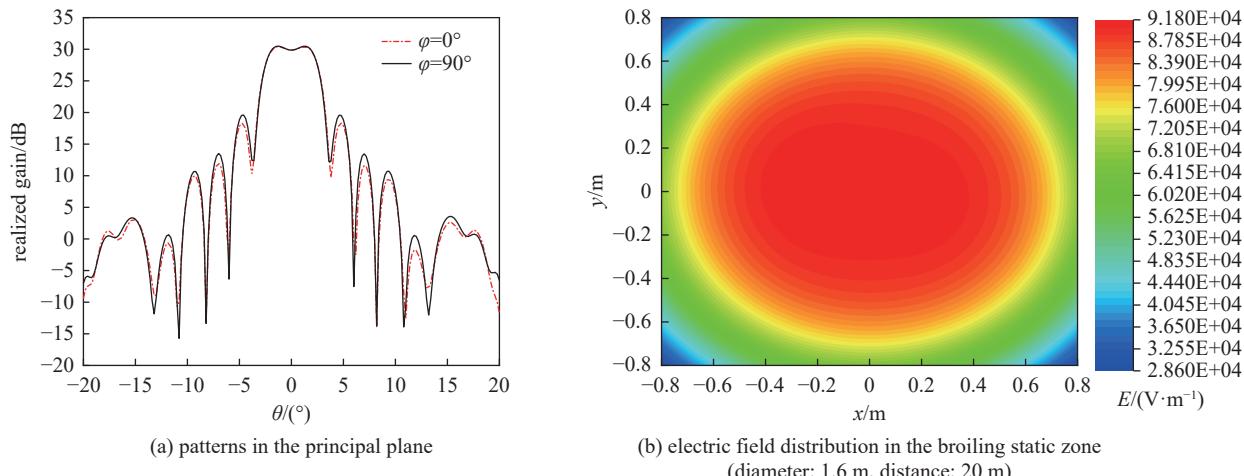


Fig. 5 Simulation results of multimode offset Cassegrain antenna with 1 m aperture

图5 口径1 m的偏置卡塞格伦多模反射面天线仿真结果

表 1 两种天线仿真性能比较
Table 1 Comparison of simulation performance of two antennas

	frequency	main reflector/m	broiling static zone/m	gain/dB	beam width/(°)	location (x, y)	field intensity/(V·m ⁻¹)
conventional Cassegrain antenna	f_0 X band	0.45	1.6	30.4	5.05×4.87	(-0.8,0)	66482
						(0.8,0)	66203
						(0,0)	89523
						(0,-0.8)	67847
						(0,0.8)	67884
multimode Cassegrain antenna	f_0 X band	1	1.6	30.5	5.06×5.02	(-0.8,0)	68598
						(0.8,0)	68338
						(0,0)	91413
						(0,-0.8)	66393
						(0,0.8)	66318

种天线边缘和中心处场强的差值相差不大, 约等于 23 kV/m, 但是对比图 4(b)和图 5(b)可知, 采用多模反射天线时热静区内的场分布明显更加均匀。

为了更进一步说明问题, 将口径均为 1 m 的多模反射面和常规反射面天线的方向图进行仿真比较, 结果如图 6 所示。可以看出常规反射面在±2.3°的范围内方向图幅度起伏达到 13 dB 以上。而采用多模反射面, 起伏仅 2 dB 左右, 即在高增益照射的情况下提高了热静区内的辐射平坦度。需要说明的是, 在以上将常规偏置卡塞格伦天线和偏置卡塞格伦多模反射面天线进行仿真对比时, 为了简单起见均采用正馈的形式, 所以天线在主平面上的方向图都是对称的。

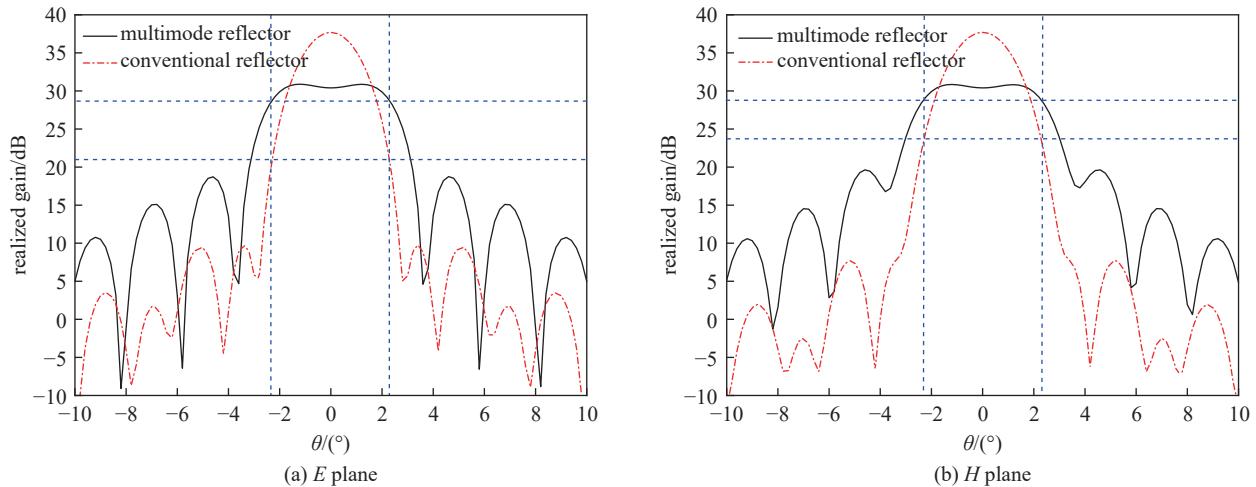


Fig. 6 Comparison of the pattern at the center frequency of antennas with 1m diameters

图 6 口径均为 1m 的天线中心频率处的方向图比较

最后, 根据仿真结果加工天线实物并测试方向图。图 7 所示为天线实物照片, 为了使天线能够承受大功率, 需要对馈源系统抽真空。图 8 为天线在不同频率处的实测方向图, 测试结果基本实现了设计目标, 但是俯仰面的方向图略显不对称, 主要是因为偏馈时馈源的照射本身在俯仰面不对称。天线的实测增益比仿真值略小, 后续需要改进设计。此外, 为了实现高功率微波能量的传输与辐射, 本设计馈线部分采用无氧铜波导来降低能量的损耗; 波导旋转关节采用 TM₀₁ 模式确保能够承受大功率; 馈源部分采用圆锥多模喇叭使天线的 E 面和 H 面波束宽度等化。详细的方向图参数如表 2 所示。



Fig. 7 Photo of the antenna

图 7 天线实物图片

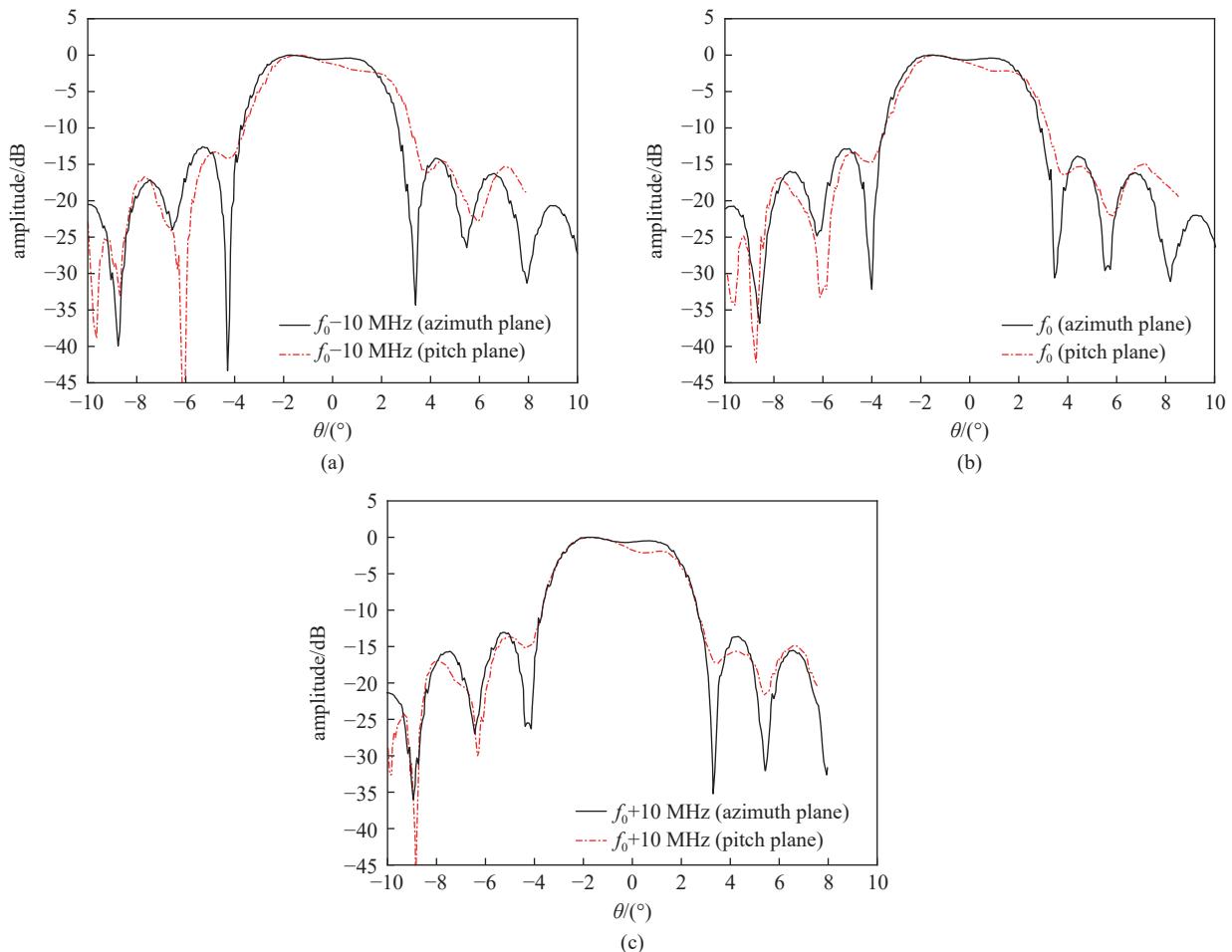


Fig. 8 Measured patterns of the antenna at different frequency

图 8 不同频点处天线的实测方向图

表 2 天线性能总结

Table 2 Summary of antenna performance

frequency	gain/dB	3 dB beam width/(°)	
		pitch plane	azimuth plane
$f_0 - 10\text{ MHz}$	29.80	4.67	4.76
f_0	29.97	4.6	4.89
$f_0 + 10\text{ MHz}$	30.25	4.80	4.96

3 结 论

本文设计了一款适用于高强度辐射场构建系统的 X 波段偏置卡塞格伦多模反射面天线，解决了此类系统所要求的大场强且均匀分布的需求。尤其是创新性地利用多模反射面理论实现了高增益、窄波束的平顶赋形，解决了热静区内场的均匀性和热静区的大小之间的矛盾问题。总之，该天线具有馈源遮挡小、馈线损耗低和易于折叠收藏等优点，可以很好地应用于高强度辐射场构建系统。

参考文献：

- [1] Bieth F, Delmotte P, Schneider M. Electromagnetic compatibility of a railgun implemented on a warship [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(6): 2987-2994.
- [2] 谭志良, 李亚南, 宋培姣. 射频前端强电磁脉冲防护研究进展 [J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(3): 231-242. (Tan Zhiliang, Li Yanan, Song Peijiao. Relevant research on electromagnetic pulse protection of RF front-end [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(3): 231-242)
- [3] 冀鑫炜, 田锦, 孙珊珊, 等. 地面雷达系统强电磁脉冲防护分析 [J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 23-26. (Ji Xinwei, Tian Jin, Sun Shanshan, et al. Analysis of high intensity electromagnetic pulse protection for ground radar system [J]. *Modern Radar*, 2018, 40(7): 23-26)
- [4] 吕英华. 信息时代电磁兼容领域的挑战与应对 [J]. 电波科学学报, 2019, 34(4): 393-402. (Lyu Yinghua. The challenge and reply to EMC fields in the times of

- information[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(4): 393-402)
- [5] Liu Wei, Yan Zhaowen, Wang Jianwei, et al. Ultrawideband real-time monitoring system based on electro-optical under-sampling and data acquisition for near-field measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 6603-6612.
- [6] 张黎军, 陈昌华, 滕雁, 等. 高功率微波辐射场远场测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 053002. (Zhang Lijun, Chen Changhua, Teng Yan, et al. Farfield measurement method of high power microwave in radiation field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 053002)
- [7] Shi Guochang, Liao Yi, Ying Xiaojun, et al. Methods of high intensity radiated field testing for civil aircraft[C]//Proceedings of 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2017.
- [8] Romero S F, Rodríguez P L, Bocanegra D E, et al. Comparing open area test site and resonant chamber for unmanned aerial vehicle's high-intensity radiated field testing[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(6): 1704-1711.
- [9] 伍捍东. 多模反射面天线理论与技术研究[J]. 微波学报, 2021, 37(6): 1-5. (Wu Handong. Research on the theory and technology of multimode reflector antenna[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(6): 1-5)
- [10] Rao S K, Tang M Q. Stepped-reflector antenna for dual-band multiple beam satellite communications payloads[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(3): 801-811.
- [11] Manohar V, Kovitz J M, Rahmat-Samii Y. Synthesis and analysis of low profile, metal-only stepped parabolic reflector antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(6): 2788-2798.
- [12] Janken J, English W, Difonzo D. Radiation from “multimode” reflector antennas[C]//Proceedings of 1973 Antennas and Propagation Society International Symposium. 1973: 306-309.
- [13] Shee K K, Smith W T. Optimizing multimode horn feed arrays for offset reflector antennas using a constrained minimization algorithm to reduce cross polarization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(12): 1883-1885.
- [14] Granet C. Designing classical offset Cassegrain or Gregorian dual-reflector antennas from combinations of prescribed geometric parameters[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(3): 114-123.
- [15] Rusch W V T, Prata A, Rahmat-Samii Y. Derivation and application of the equivalent paraboloid for classical offset Cassegrain and Gregorian antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, 38(8): 1141-1149.