



·高功率微波技术·

高功率内置弧形折线栅式极化转换 天线罩的设计与实验研究*

黄贵春, 李相强, 孔歌星, 王庆峰, 张健穹

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了实现天线罩的轻量化, 同时满足高功率的应用, 提出了一种高功率内置弧形折线栅式极化转换天线罩。该天线罩将弧形折线栅式极化转换板放置于介质密封罩内部, 通过对弧形折线栅单元结构及介质密封罩结构的联合设计, 在实现轻量化的同时降低了金属栅上的电场, 使其更加有利于在高功率微波领域的工程应用。针对 C 波段高功率线极化螺旋阵列天线的应用需求, 优化设计了一个中心频率为 4.3 GHz 的高功率极化转换天线罩, 将其加载至某高功率径向线螺旋阵列天线上开展了辐射特性和功率容量的仿真和测试, 仿真和实验结果吻合, 该天线罩可实现圆极化波到线极化波的转换, 其中心频率下的插入损耗为 0.2 dB, 主射方向轴比为 20 dB, 功率容量达到 48 MW。

关键词: 高功率微波; 极化转换; 天线罩; 内置弧形折线栅

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210420

Design and experimental study of high-power built-in curved meander-line polarization conversion radome

Huang Guichun, Li Xiangqiang, Kong Gexing, Wang Qingfeng, Zhang Jianqiong

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To reduce the weight of the radome and meet the high-power application requirement, a high-power built-in curved meander-line polarization conversion radome is proposed. The radome has the curved meander-line polarization conversion plate inside the dielectric sealing cover, and through joint optimization of the arc-shaped broken wire grid unit structure and the dielectric sealing cover structure, the weight is reduced while the electric field on the metal grid is reduced, which is more conducive to engineering applications in the high-power field. In response to the application requirements of the C-band high-power linear polarization helical array antenna, a high-power polarization conversion radome with a center frequency of 4.3 GHz was optimized and loaded on the high-power helical array antenna. And the radiation characteristics and power capacity were tested. The simulation and experimental results are consistent. The radome can convert circularly polarized waves to linearly polarized waves. Its insertion loss is 0.2 dB, its axial ratio is 20 dB, and its power capacity reaches 48 MW.

Key words: high power microwave; polarization conversion; radome; built-in curved meander-line

在高功率微波技术快速发展的过程中, 高功率径向线螺旋阵列天线成为了一种重要的高功率微波辐射天线形式^[1-3]。高功率径向线螺旋阵列天线具有许多独特的优点, 但其为圆极化辐射天线, 本身只能辐射圆极化波, 然而在某些特定的应用场合中, 需要实现高功率微波的线极化辐射, 因此研究高功率状态下的极化转换是很有必要的。目前已有研究证明通过外置极化转换器是可以实现极化转换的, 包括栅条型极化转换器^[4]、折线栅型极化转换器^[5-7]、基于超材料或者超表面的极化转换器^[8], 其中在高功率性能较好的有介质埋藏折线栅式极化转换器^[9],

* 收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2021-11-29

基金项目: 四川省科技计划项目(22ZDYF3070); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682021GF016)

联系方式: 黄贵春, 651527908@qq.com。

通信作者: 张健穹, qilixing@163.com。

但是介质埋藏将会增加介质厚度,同时因为埋藏工艺对材料有限制导致天线罩质量较大,且极化转换器件分离安装在密封罩外部,受环境因素影响较大,不利于实际应用。本文在此基础上将折线栅置于密封罩内,把折线栅与密封罩结合考虑,进行分析。同时对折线栅进行优化,将其中的金属尖角结构转换为弧形,使折线栅上电场下降;去掉介质埋藏以减轻质量,采用密封罩内部填充惰性气体的方式提升击穿阈值,保证其高功率容量。通过仿真对天线罩整体的单元参数进行优化,然后组成天线罩加载至高功率螺旋阵列天线上,分析其性能并进行实验验证。

1 内置折线栅式极化转换天线罩设计原理分析

本文将折线栅放置于密封罩内部,天线罩整体的结构如图1所示,入射波从折线栅侧入射通过金属栅级联叠加。在入射波 E_{in} 与金属栅成 45° 时,入射波 E_{in} 可以分解为等幅同相的两个正交分量 E_x 和 E_y ,金属栅对于 E_x 分量会等效为电感,对于 E_y 分量会等效为电容,使得两分量透过金属栅后会产生相位差,其等效电路图如图2所示。

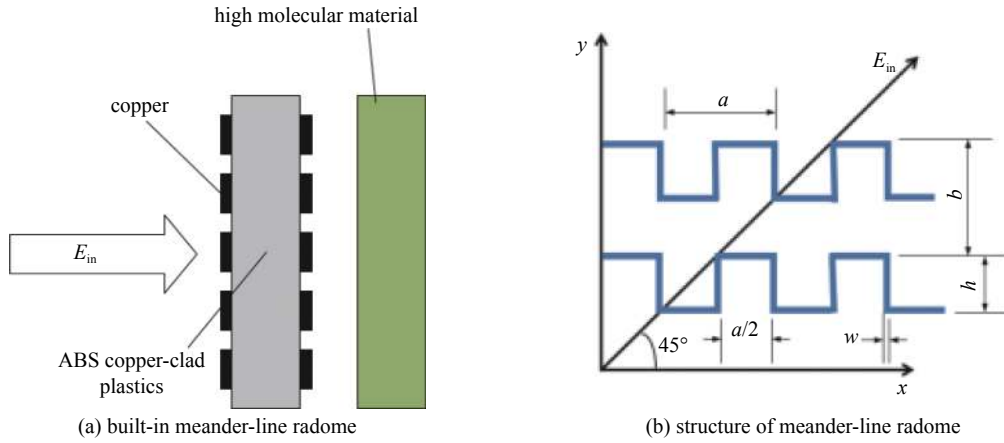


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the built-in meander-line radome

图 1 内置折线栅式天线罩结构原理图

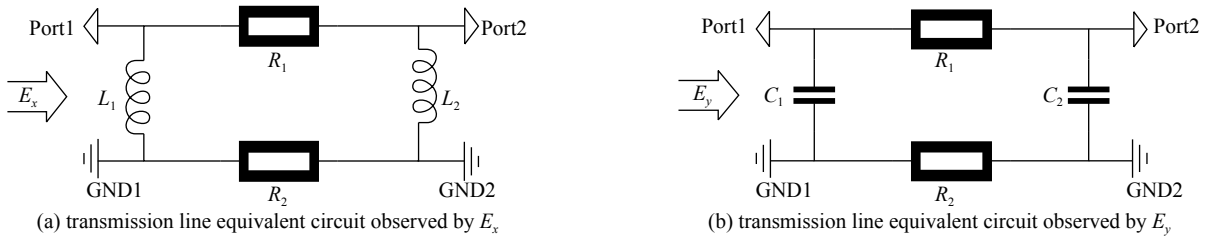


Fig. 2 Transmission line equivalent circuit for the meander line polarizer observed by E_x and E_y

图 2 折线栅对于 E_x 分量和 E_y 分量的等效电路

根据传输线理论,折线栅极化转换器的中间介质层可以视为传输线,但是此时忽略了高次模,根据高次模衰减,需要中间介质层足够厚使得高次模尽量衰减,然后以传输线考虑在 E_y 和 E_x 分量上等效电纳分别表示为

$$Y = 1/a + 2\pi d(\epsilon_r - 1)/\lambda \quad (1)$$

$$X = 1/b + 2\pi d(\epsilon_r - 1)/\lambda \quad (2)$$

式中: a 和 b 为折线在 x 和 y 方向的周期, d 为介质厚度, ϵ_r 为介质板介电常数, λ 为波长。2层折线栅视为2单元的网络级联,那么其第 i 层单元的 T 矩阵为

$$T_i = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

等效散射矩阵 S 为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{11}} \begin{bmatrix} T_{21} & T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} \\ 1 & -T_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

设水平极化分量 E_x 和垂直极化分量 E_y 的 S 参数分别为 S_{21}^x 和 S_{21}^y , 可利用 S 参数在各频点计算出波的

轴比

$$\delta_{AR} = \frac{\sqrt{1+k^2+2k\sin\varphi} - \sqrt{1+k^2-2k\sin\varphi}}{\sqrt{1+k^2+2k\sin\varphi} + \sqrt{1+k^2-2k\sin\varphi}} \quad (5)$$

式中： $k = |S_{21}^x/S_{21}^y|$ ， $\varphi = \arg[S_{21}^x/S_{21}^y]$ 。线极化转换圆极化的条件为： $|\arg S_{21}^x - \arg S_{21}^y| = \pi/2$ ，匹配条件为： $S_{11}^x < \delta$ ； $S_{11}^y < \delta$ ， δ 为驻波系数容限值，该条件下计算出轴比为 0，实现波的极化转换^[10-14]。以此理论为基础反演给出周期性金属折线单元的初始尺寸： $a=0.36\lambda$ ，垂直周期 $b=0.53\lambda$ ，折线高度 $h=0.3\lambda$ ，折线宽度 $w=0.06\lambda$ ，后续优化在此基础上展开。

2 内置弧形折线栅式极化转换天线罩仿真设计

极化转换器件在高功率领域中的一个应用难点是其复杂的金属结构使得在极化转换器件上存在电场集中，形成较大的场强容易造成击穿^[15-17]。在文献[9]中，作者通过将金属埋入介质提升了金属处的击穿阈值，本文通过将极化转换器件封入介质密封罩内，并对子阵抽取真空或者充入惰性气体提升其击穿阈值，同时其圆弧的特性使得不容易出现尖锐的电场集中，可降低电场，既保留了极化转换的性能，又保证了功率容量。

为了实现天线罩的轻量化，主要进行了以下两点考虑：

- (1) 覆铜介质层厚度要在满足极化转换的情况下尽量薄；
- (2) 覆铜介质层密度要低。所以选用了电镀级 ABS 塑料作为极化转换器的介质基板。在确定选材后，对图 3 所示的主要参数进行优化，主要参数有折线栅外部圆弧半径为 r_1 ，内部圆弧半径为 r_2 ，折线图案水平周期 a ，折线垂直周期 b ，折线高度 h ，折线宽度 w ，覆铜介质层厚度 d_2 ，密封介质层厚度 d_1 等。

在上述选定折线栅初始值的情况下，对 r_1 与 r_2 两个参数进行分析，如图 4 所示，当取 $r_1=5.5$ mm、 $r_2=0.5$ mm 时单元电场最优。由于引入折线栅外部圆弧半径为 r_1 ，内部圆弧半径为 r_2 等参数，折线的等效长度会有变化，需经过软件扫参优化，扫参分析如图 5 所示，在保证相移量在 90° 的情况下，选取透射最优的单元参数，天线罩单元参数如

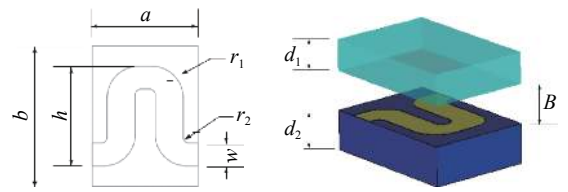
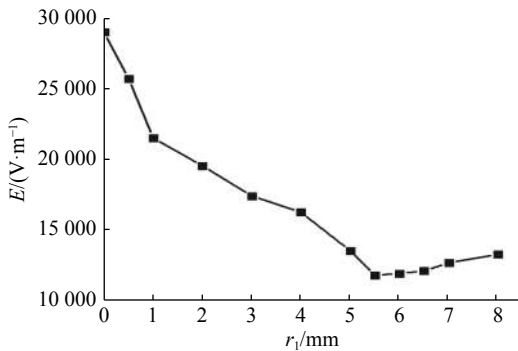
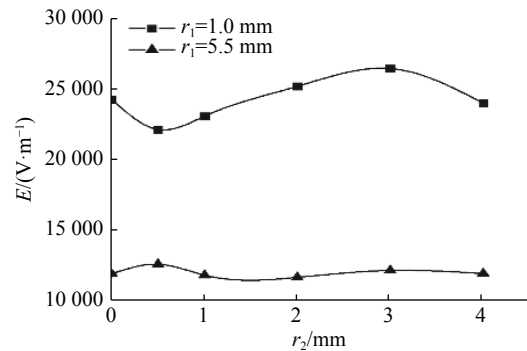


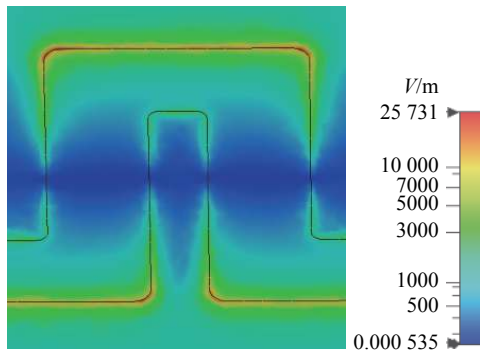
Fig. 3 The model of element and the electric field distribution
图 3 弧形折线栅及内置折线栅式天线罩结构原理图



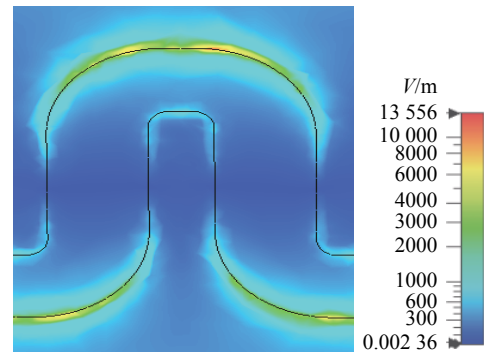
(a) influence of the outer arc radius r_1 on the electric field



(b) influence of the inner arc radius of r_2 on the electric field



(c) electric field of meander-line radome



(d) electric field of curved line radome

Fig. 4 Electric field analysis of different meander-line radome units

图 4 不同折线栅单元电场分析

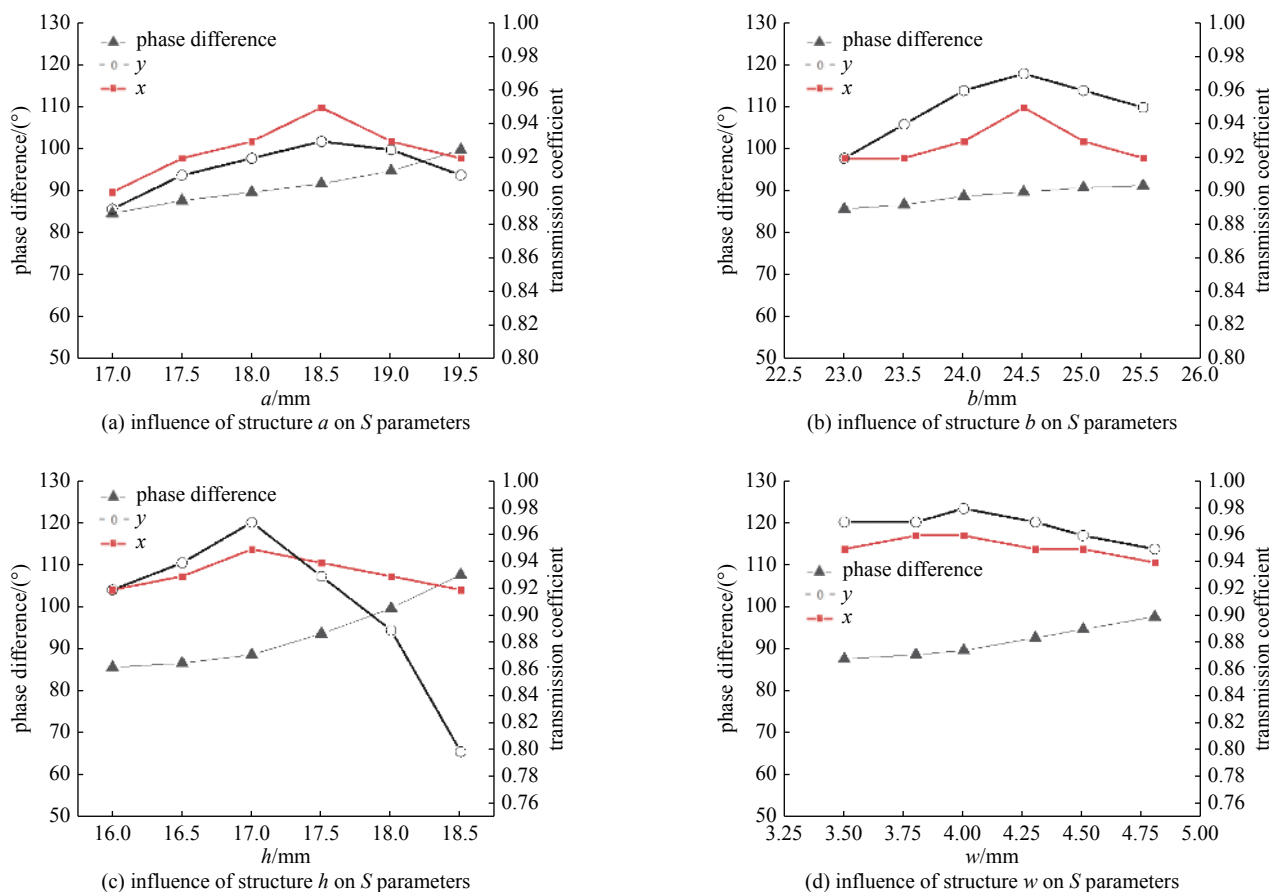


Fig. 5 Parametric analysis

图 5 参数扫描分析

表 1 所示。该弧形折线栅单元与原折线栅形式的单元对比，其电场如图 4 所示，单元电场由 25 731 V/m 下降至 13 556 V/m，电场明显降低。

以优化后的弧形折线栅组成天线罩，该天线罩的介质基板厚度 d_2 为 5 mm，密度为 1.01 g/cm³，整块折线栅的介质基板约 724 g，对比文献 [9] 中介质埋藏折线栅式天线罩质量得到了极大的减轻。将内置弧形折线栅式天线罩加载于 C 波段高功率径向线螺旋阵列天线上，其剖面结构如图 6 所示，其中极化板到螺旋反射腔的距离 $A=45$ mm，密封罩与极化板的距离 $B=5$ mm。

加载天线罩后天线性能仿真如图 7 所示，在 4.2~4.4 GHz 下，天线阵面满足反射幅度低于 -13 dB，全频带内增益无明显下降，都实现主射方向轴比由 1 dB 转换为 20 dB 以上，其中心频点处反射为 -20 dB，增益为 24.1 dB，轴比由 1 dB 转换为 22 dB，实现了线极化辐射。

天线罩加载于高功率径向线螺旋阵列上后，此天线罩功率容量的薄弱点在于金属栅上以及密封罩与空气接触的外表面，仿真输入功率为 0.5 W，天线子阵电场分布如图 8 所示，金属栅上的最大电场为 836 V/m，密封罩外表面的最大电场为 111 V/m，整个天线阵列最大电场为 1113 V/m，位于径向线馈电入口锥体处，充入 SF₆ 气体的击穿阈值为 11 MV/m，功率系统微波功率

$$P_{\max} = \frac{P_{\text{in}} E_{\max}^2}{E_{\text{in}}^2} \quad (6)$$

式中： P_{\max} 为系统功率容量， P_{in} 为仿真输入功率 0.5 W， E_{in} 为输入为 P_{in} 对应的场强 1113 V/m， E_{\max} 为击穿场强 11 MW/m，

表 1 单元参数

Table 1 Parameters of the radome unit

a/mm	b/mm	h/mm	w/mm	r_1/mm	r_2/mm
18.5	24.5	17	4.5	5.5	0.5

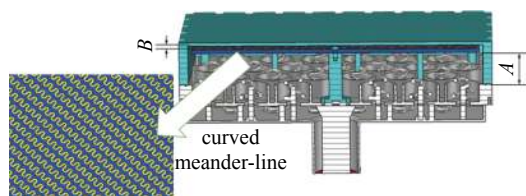


Fig. 6 Antenna loaded with built-in curved meander-line polarization conversion radome

图 6 加载内置弧形折线栅式极化转换天线罩的天线

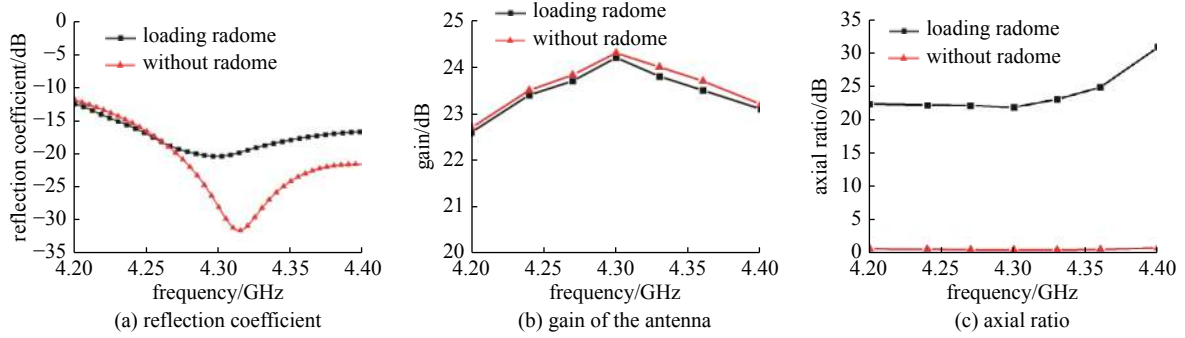


Fig. 7 Antenna performance

图 7 天线基本特性对比

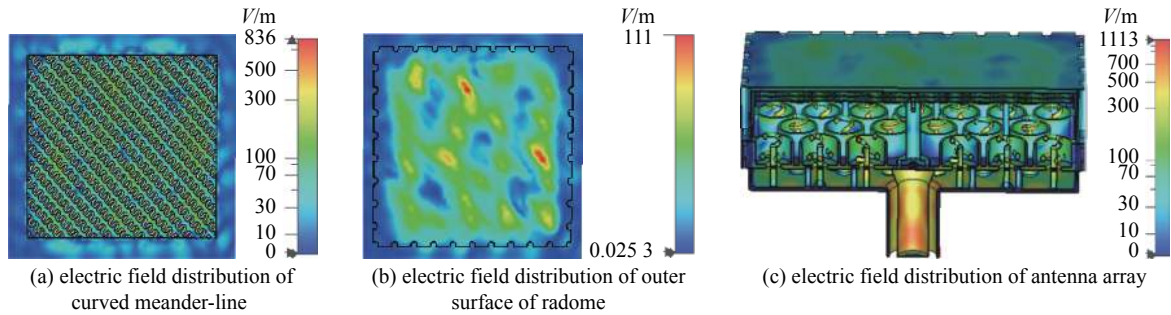


Fig. 8 Electric field distribution of antenna array

图 8 天线阵列的电场分布

根据计算 P_{\max} 为 48.8 MW, 保守近似为 48 MW^[18]。

3 实验方法及实验结果

根据上述的优化结果加工出了内置弧形折线栅式极化转换天线罩, 并加工了与之对应的高功率径向线螺旋子阵。天线罩加载于子阵上后测量内容有辐射特性实验和功率容量实验。

3.1 辐射特性实验

辐射特性实验包括天线子阵的反射系数, 天线增益与方向图的测量。测试需要使用阻抗变换器, 设计并标定好阻抗变换器^[19], 之后使用标准喇叭对比测量增益。

根据优化设计方案加工出内置弧形折线栅式极化转换天线罩、高功率径向线螺旋子阵以及所需的测试辅助器件, 通过上述实验方法进行实验测试。加载天线罩后的子阵在常规暗室进行子阵方向图和反射的测试, 测试场景如图 9 所示。将天线子阵与其配套的阻抗变换器相连接后测试, 得到子阵反射测量结果和子阵的水平方向图如图 10 所示, 在 4.2~4.4 GHz 频率范围内子阵反射系数均低于 -10 dB, 在中心频点 4.3 GHz 处反射系数为 -15 dB。通过标定对比标准喇叭, 天线增益如表 2 所示, 子阵增益在中心频点处为 24.04 dB。

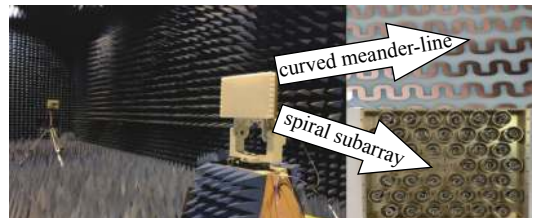


Fig. 9 Scenario for testing antenna radiation characteristics

图 9 天线阵列辐射特性实验场景图

3.2 功率容量实验

高功率容量实验使用高功率微波源作为能量馈入, 通过耦合器将微波源的输出功率分出一路作为待测子阵的输入, 其余能量通过喇叭辐射到暗室, 其中耦合器结构示意图如图 11 所示。耦合器耦合量约为输入功率的 1%, 输出 S_{21} 为 -40 dB。通过设定高功率微波源的输出功率, 改变待测子阵的输入功率, 测量待测天线子阵辐射出的脉冲与辐射喇叭出来的脉冲。

测试场景如图 12 所示, 左侧微波源输出能量, 通过耦合器分出 48 MW 的能量进入子阵, 待测子阵将能量辐射到暗室中, 通过衰减器后接入示波器, 图 13 中通道 C_1 为微波源监测电压, 通道 C_3 与通道 C_4 为子阵输出波形与右

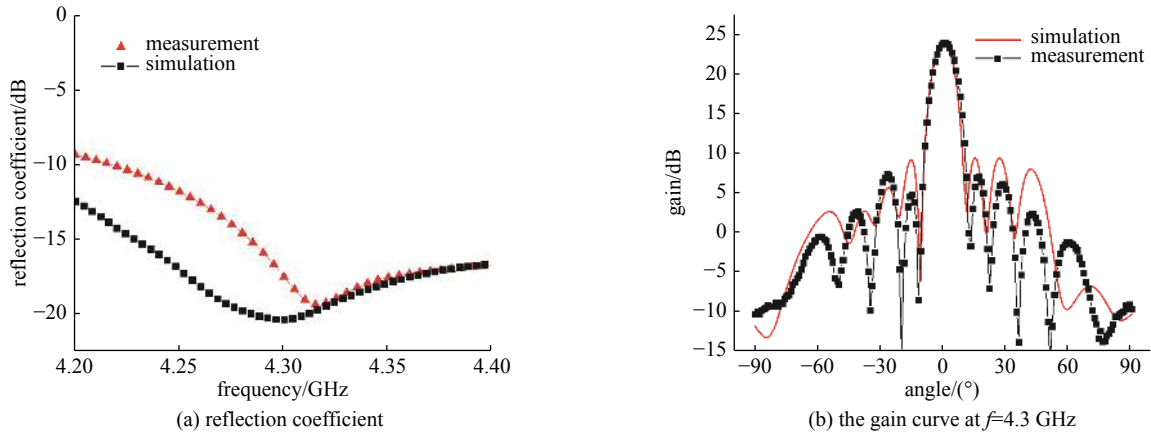


Fig. 10 Results of the antenna array experiment

图 10 天线阵列实验结果图

表 2 实验结果

Table 2 Results of experiments

frequency/GHz	test level of standard antenna horn/dB	gain of standard antenna horn/dB	test level of antenna to be measured/dB	gain of antenna to be measured/dB
4.25	-30.5	19.35	-26.35	23.5
4.3	-30.58	19.42	-25.96	24.04
4.35	-30.9	19.50	-26.76	23.64

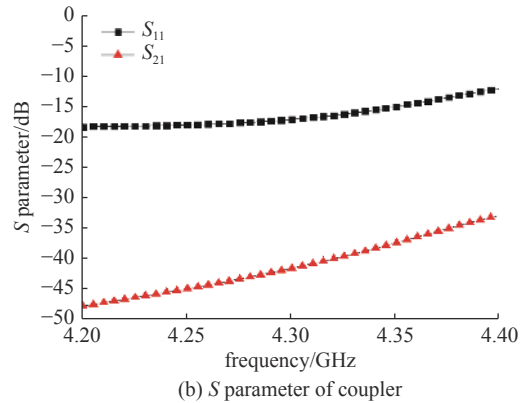
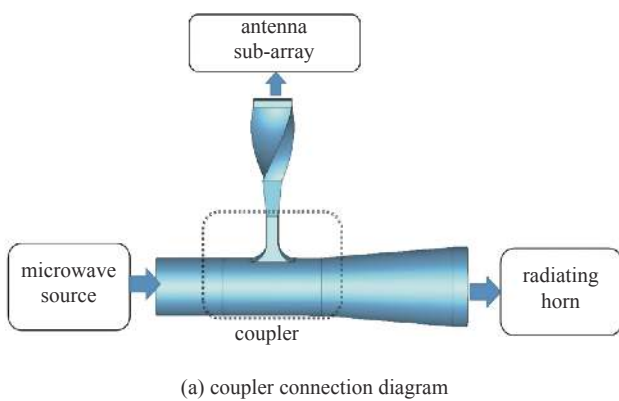


Fig. 11 The structure and simulation results of the coupler

图 11 耦合器结构及仿真结果

侧辐射喇叭输出波形,对比 C_3 与 C_4 输出的波形发现未出现脉宽缩减,表明子阵未发生击穿现象,子阵功率容量能够达到 48 MW。

4 结 论

本文主要对折线栅的金属结构优化,并与密封罩结合考虑,应用于高功率领域,构成高功率内置弧形折线栅极化转换天线罩。经过实验测试,加载该天线罩的高功率螺旋阵列天线,在中心频点下反射系数为 -17 dB,增益 24 dB,轴比高于 20 dB,在子阵内部充入一个大气压的 SF_6 时功率容量达到了 48 MW,实现了高功率状态下的线极化辐射,与仿真计算基本吻合。研究验证了该天线罩不仅结构紧凑,质量小,而且能够很好地在高功率状态下实现圆极化到线极化的转换。

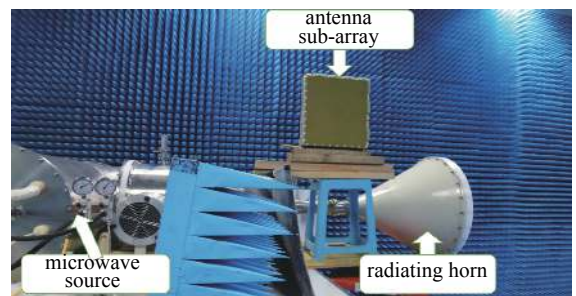


Fig. 12 Antenna power capacity test scenario

图 12 天线功率容量实验场景

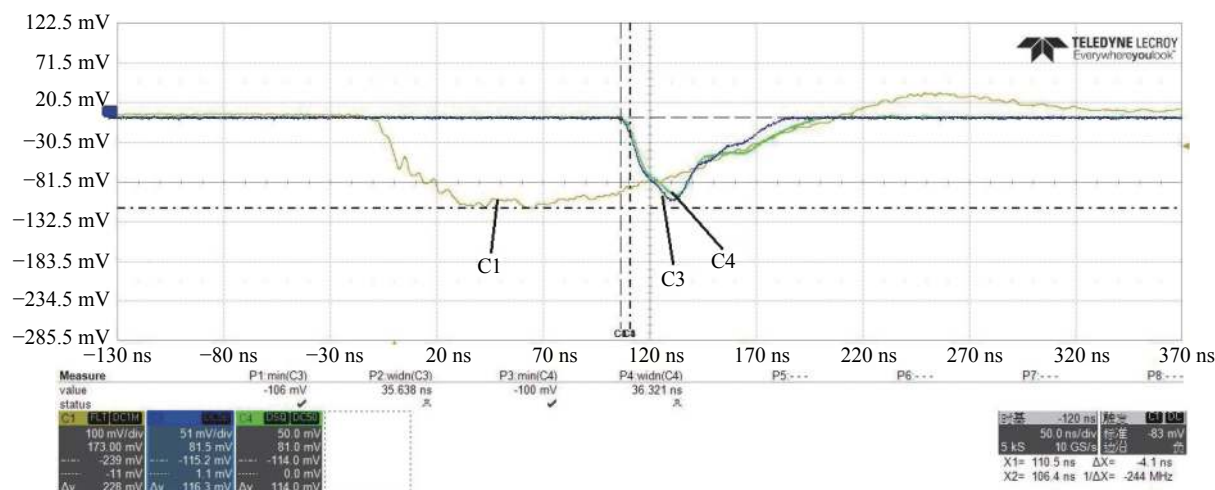


Fig. 13 Schematic diagram of output waveform of antenna array and radiating horn

图 13 子阵与辐射喇叭输出波形示意图

参考文献:

- [1] Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Wu Xiaojiang, et al. A GW level high-power radial line helical array antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(9): 2943-2948.
- [2] 孔歌星, 李相强, 张健穹, 等. X波段高功率宽频带双螺旋反射阵列天线的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 093001. (Kong Gexing, Li Xiangqiang, Zhang Jianqiong, et al. Design of X-band high-power wide-band double helix reflect array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 093001)
- [3] Kong Gexing, Li Xiangqiang, Wang Qingfeng, et al. A wideband reconfigurable dual-branch helical reflectarray antenna for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(2): 825-833.
- [4] 徐刚, 李才阳, 张现福, 等. X波段极化可重构高功率微波辐射器仿真设计[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 103221. (Xu Gang, Li Caiyang, Zhang Xianfu, et al. Simulation design of X-band polarization reconfigurable high-power microwave radiator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 103221)
- [5] Nakajima H, Tanaka T, Takikawa M, et al. A study of meander line polarizer based on equivalent circuits[C]//IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, 2018.
- [6] Abdouni-Abdallah W, Khan M S, Konstantinidis A. Design of a wideband multilayer meander-line polarizer (6–18 GHz) using a semi-analytical method[C]//48th European Microwave Conference. 2018: 137-140.
- [7] Marino RA. Accurate and efficient modeling of meander line polarizers[J]. *Microwave Journal*, 1998, 41(11): 22.
- [8] Ni C, Chen M S, Zhang Z X, et al. Design of frequency-and polarization-reconfigurable antenna based on the polarization conversion metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 78-81.
- [9] 周哲, 李相强, 刘庆想, 等. 一种高功率折线栅极化转换天线罩的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 053005. (Zhou Zhe, Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, et al. Design of a high-power polyline grid conversion radome[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 053005)
- [10] Arnaud E, Chantalat R, Koubeissi M, et al. Global design of an EBG antenna and meander-line polarizer for circular polarization[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010(9): 215-218.
- [11] 史赛群, 伍捍东, 任宇辉, 等. 单片微带双面折线栅圆极化天线罩[J]. *微波学报*, 2014, 30(S1): 267-270. (Shi Saiqun, Wu Handong, Ren Yuhui, et al. Single-chip microstrip double-sided polyline grid circularly polarized radome[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(S1): 267-270)
- [12] Chreim H, Arnaud E, Thevenot M, et al. Circularly polarized EBG antenna using meander lines polarizer as a reflector focal feed for Ka-band space applications[C]//15 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. 2012: 1-5.
- [13] Stankovsky A V, Polenga S V, Nemshon A D, et al. Meander-line polarizer for omnidirectional antenna[C]//2016 International Siberian Conference on Control and Communications. 2016: 1-4.
- [14] 简荣华, 李彪. 基于模式搜索法的折线栅圆极化器的优化设计[J]. *信息与电子工程*, 2006(2): 116-120. (Jian Ronghua, Li Biao. Optimum design of polyline grid circular polarizer based on pattern search method[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2006(2): 116-120)
- [15] 黄惠军, 常超, 侯青, 等. 真空条件下介质窗表面微波击穿实验[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 845-848. (Huang Huijun, Chang Chao, Hou Qing, et al. Microwave breakdown experiment on dielectric window surface under vacuum condition[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 845-848)
- [16] Vincenti Gatti R, Rossi R. A novel meander-line polarizer modeling procedure and broadband equivalent circuit[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(11): 6179-6184.
- [17] 秦洪才, 袁成卫, 宁辉, 等. 高功率平板波导螺旋阵列天线设计[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 023002. (Qin Hongcai, Yuan Chengwei, Ning Hui, et al. Design of high-power slab waveguide spiral array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 023002)
- [18] Zhao P, Liao C, Lin W. Propagation of high-power microwave pulses in air-SF₆ mixtures at high pressure[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2013, 43(3): 257-269.
- [19] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(2): 265-268. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, et al. Experimental research on high-power double-layer radial line helical array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 265-268)