



·高功率微波技术专辑·

## 基于空间馈电的高功率波束扫描螺旋透射阵列天线设计\*

刘东琪, 袁成卫, 孙云飞, 张强, 许亮

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘要:** 传统的透射式空馈阵列存在功率容量低的缺点, 不能直接应用于高功率微波领域。现有的高功率空馈阵列布局不够灵活, 波束扫描速度较慢, 不能充分发挥空馈阵列在系统集成方面的优势。提出并设计了一种新型的采用空间馈电的螺旋辐射单元, 并构建了一种透射式空馈螺旋阵列天线, 通过控制单个螺旋旋转可以实现二维波束扫描, 在设计上更加灵活, 可根据实际应用需求调整阵列布局, 符合高功率微波天线紧凑化、模块化的发展趋势。仿真设计了包含 324 个单元的透镜阵列, 数值模拟结果表明, 单元反射系数  $S_{11} \leq -20$  dB, 功率容量 0.35 MW, 阵列口径效率 0.68, 可在  $\pm 45^\circ$  范围内扫描, 最大增益下降 3 dB。

**关键词:** 高功率微波; 空间馈电螺旋阵列; 波束扫描; 圆极化; 高功率容量

中图分类号: TN45

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230330

## Investigation on transmission array antenna with high power beam scanning based on spiral antenna

Liu Dongqi, Yuan Chengwei, Sun Yunfei, Zhang Qiang, Xu Liang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The traditional transmissive air-fed array suffers from the drawback of low power capacity and cannot be directly applied in the high-power microwave field. The existing high-power air-fed array layouts are not flexible enough and have slow beam scanning speeds, which cannot fully exploit the advantages of phased arrays in system integration. This article proposes and designs a new type of spiral radiation unit using spatial feed, and constructs a transmissive air-fed spiral array antenna. By controlling the rotation of individual spirals, two-dimensional beam scanning can be achieved, making the design more flexible and adaptable to the actual application requirements, in line with the compact and modular development trend of high-power microwave antennas. An array consisting of 324 units was simulated and designed. The numerical simulation results show that the unit  $S_{11} \leq -20$  dB, power capacity is 0.35 MW, array aperture efficiency is 0.68, and it can scan within the range of  $\pm 45^\circ$ , with a maximum gain reduction of 3 dB.

**Key words:** high power microwave, space-fed spiral array, beam scanning, circular polarization, high power handling capacity

经过近数十年的发展, 多种类型的高功率微波 (HPM) 源的输出功率已经达到 GW 量级<sup>[1-2]</sup>, 高功率微波源的发展已经走过了“单一追求功率”的阶段, 研究重点已经转移到与高功率微波应用有关的更为细致的技术上。其中, 提高微波源的输出效率, 系统集成化, 小型化设计等是目前高功率微波系统发展的主要方向。发射天线作为 HPM 系统的终端, 在很大程度上影响着整个系统的性能、形态和应用方向。根据目前的高功率微波源的发展趋势和应用需求, 高功率微波天线的研制需要满足阵列集成、系统紧凑化设计、大范围波束扫描的要求。平面透射阵列天线是与平面反射阵天线相似的一种空馈阵列天线, 由于采用空间耦合馈电方式, 避免了复杂馈电网络设计, 在一些平台应用上有独特优势, 同时与平面反射阵列天线相比, 解决了馈源遮挡问题, 可降低由于偏馈要求带来的系

\* 收稿日期: 2023-09-22; 修订日期: 2023-11-07

联系方式: 刘东琪, 1009619092@qq.com。

通信作者: 孙云飞, sunyunfei\_gfkd@163.com。

统复杂度,在高功率微波领域有很好的应用前景。为实现平面透射阵列在 HPM 领域的应用,赵雪龙博士等人提出了一种全金属结构的传输阵列透镜,解决了常规微波领域所使用的透镜功率容量不高的问题<sup>[3-4]</sup>;孙云飞博士和赵旭浩博士先后提出和设计了一种新型的高功率微波复合介质透镜和一种新型全金属型超透镜结构,并通过与径向连续横向枝节(CTS)天线的组合<sup>[5-7]</sup>,进一步拓展了高功率微波辐射系统的波束扫描范围,且结构紧凑利于共形。上述高功率透镜阵列为 HPM 二维波束扫描提供了新的方案,具有结构紧凑、波束扫描范围大、扫描方式简单的优点。但这些天线均为圆形结构,扫描时需要两个透镜旋转配合使用,天线口面不能太大,在实现更大阵列、更高增益天线时有一定困难,无法充分发挥出透射阵列空间馈电时灵活布局的优点。基于此,本文参考螺旋阵列天线的优点<sup>[8-9]</sup>,拟基于螺旋阵列可灵活布阵、可高功率波束扫描的特点,研究和设计一种采用空间馈电的 X 波段波束扫描螺旋阵列天线,设计时充分考虑功率容量因素,有应用于高功率微波领域的潜力。

## 1 天线结构

图 1 为两个背靠背的空馈阵列天线单元,单元可分为接收部分、耦合部分和辐射部分 3 部分。接收部分采用常见且易于组阵的矩形腔结构,作用是接收馈源照射的电磁波;辐射部分为可以辐射圆极化且能通过绕轴旋转便可实现相位扫描的螺旋天线,螺旋旋转可通过步进电机实现;耦合部分起到模式转换和传输连接的功能,是将接收到的矩形波导 TE<sub>10</sub> 模转换到同轴波导的 TEM 模,给螺旋单元馈电。图 1 中将两个单元背靠背,在耦合部分的中间共用传输通道,只是为了加工和布局方便,在应用时也可以将两者分开。单元内部整体为全金属结构,在接收单元和辐射单元外侧有介质窗天线罩,内部填充 SF<sub>6</sub> 气体, SF<sub>6</sub> 是一种惰性气体,相较于空气,其电离阈值更高,可以一定程度上提高功率容量。综合考虑波束扫描范围、耦合部分方便布局等因素,辐射单元采用三角形栅格进行组阵,总体布局如图 2 所示,图中辐射单元截面为正方形,边长为 21 mm。

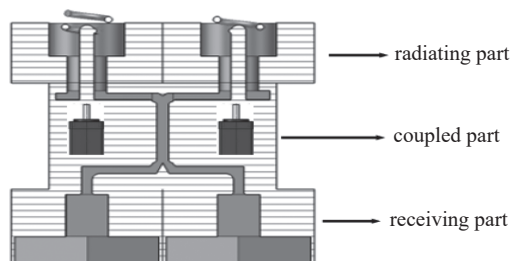


Fig. 1 Air-fed array unit antenna

图 1 空馈阵列天线单元结构图

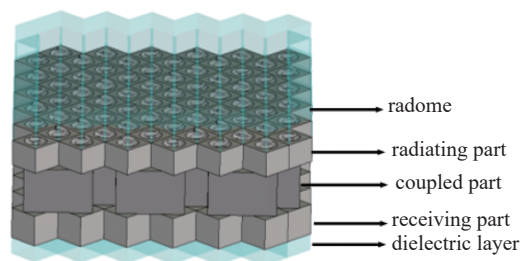
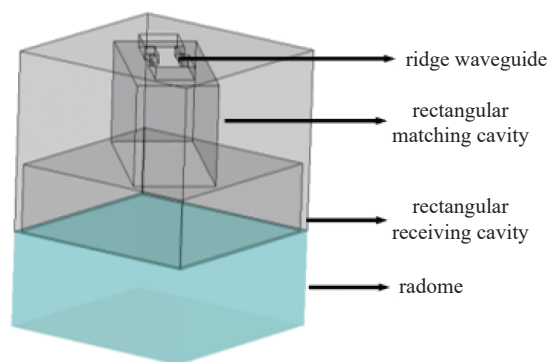


Fig. 2 Antenna array structure

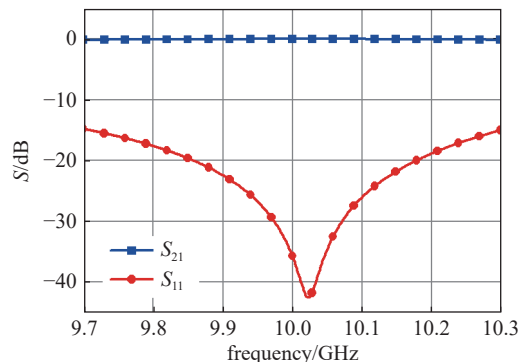
图 2 天线阵列结构图

## 2 单元设计仿真

接收传输部分作用是接收并高效传输空间馈电的电磁波,要求是接收效率高,反射较小,结构相对简单。为实现阻抗匹配,设计为三级阶梯矩形腔结构,如图 3(a)所示。第一级矩形接收腔的长宽高分别为 20 mm、20 mm、6.4 mm,第二级矩形匹配腔的长宽高分别为 17.9 mm、8.5 mm、11.5 mm。由于阵列工作在 X 波段,为了减小接收部分反射高阶模的影响,因此单元整体尺寸较小。接收部分为前面两部分用对角方式进行矩形腔连接,最上面矩形腔部分



(a) receiving and transmitting part structure



(b) S parameters of receiving and transmitting part

Fig. 3 Receiving and transmitting part

图 3 接收传输部分

采用脊波导结构, 以减小截止频率<sup>[10]</sup>, 确保电磁波正常传输。利用 CST 的 unit cell 边界条件对接收部分进行仿真, 得到的  $S$  参数如图 3(b) 所示, 在中心频点 10 GHz 反射为  $-35$  dB, 接收效率  $-0.003$  dB。

耦合部分前接矩形接收腔, 后接螺旋天线的同轴波导, 将矩形波导  $TE_{10}$  模转换成同轴波导的 TEM 模, 是整个透射单元最为复杂的部分。考虑后续组阵, 将两个接收单元按对角方式排布, 如图 1 所示, 因此螺旋单元也照此法排布, 此时耦合部分同时起到了功率合成与分配以及模式转换的作用, 其中功分结构截面为底边 3.3 mm、高 3.6 mm 的三角形, 矩形耦合腔的长宽高分别为 16.9 mm、4.2 mm、8.8 mm, 同轴结构内径 3.8 mm, 外径 1.5 mm。为使 10 GHz 的电磁波正常传输, 耦合部分中矩形波导也进行了加脊, 具体结构如图 4(a) 所示。

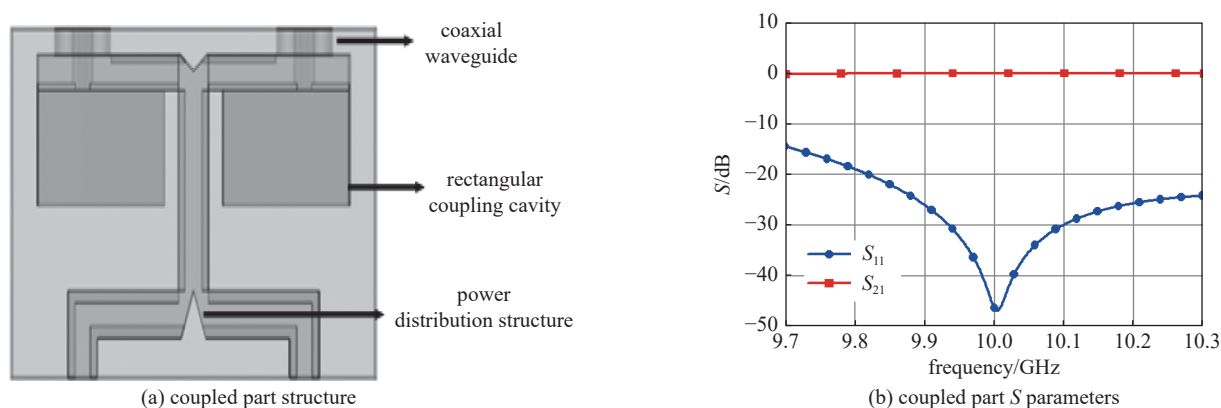


Fig. 4 Coupled part

图 4 耦合部分

辐射部分单元采用短螺旋天线, 这里短螺旋天线工作在轴向模式, 能产生方向性较强的圆极化辐射方向图<sup>[11-12]</sup>。根据螺旋天线的自身特点, 可通过绕轴向旋转螺旋即可改变辐射相位。所以辐射单元的设计要求是圆极化特性好, 轴向长度短, 反射较小。本文采用的螺旋辐射单元结构如图 5(a) 所示, 螺旋线半径 0.75 mm, 螺旋半径 4.2 mm, 螺距 3.7 mm, 螺旋周期数 1.2。天线罩为聚乙烯材质, 厚度 9.9 mm。同轴外导体设计为两层阶梯结构以实现良好的匹配阻抗, 从而减小反射, 上层圆形腔半径 7.4 mm, 深度 8.3 mm。

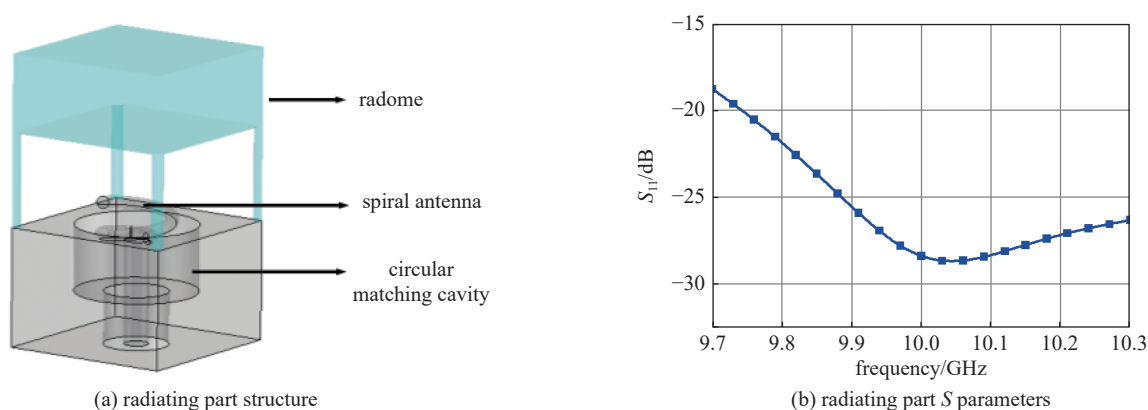
Fig. 5 Structure and  $S$  parameters of radiant part

图 5 辐射部分结构及仿真结果

对螺旋辐射单元进行仿真, 结果如图 5(b) 所示, 在 10 GHz 处, 反射系数为  $-28$  dB, 在 9.8 GHz 至 10.4 GHz 范围都维持在  $-22$  dB 以下。图 6(a) 可看出增益为 8.19 dBi。单元轴比方向图如图 6(b) 所示, 在  $\pm 50^\circ$  范围轴比小于 3 dB, 圆极化特性较好。

在分别完成上述三部分仿真之后, 对透射单元整体进行仿真研究, 仍然采用 unit cell 边界条件。从图 7(a) 可以看出在 10 GHz 处单元整体反射系数为  $-61$  dB, 传输系数为  $-0.1$  dB, 说明单元可以实现较好的空间接收和辐射。仿真得到的远场方向图如图 7(b), 辐射单元增益为 10.6 dBi。

仿真得到整体单元结构内部电场图如图 8 所示, 当由输入端口输入 0.5 W 的线极化微波后, 传输通道内电场最大值为 12000 V/m, 窗口上的电场远小于通道内电场, 按照短脉冲高功率微波在 101.325 kPa 下  $SF_6$  中击穿阈值为

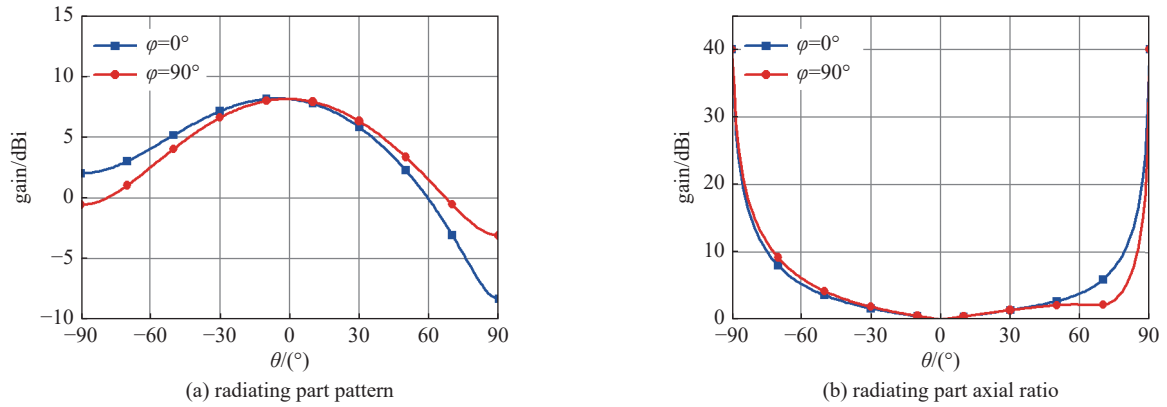


Fig. 6 Far-field parameters of the radiating part

图 6 辐射部分远场参数

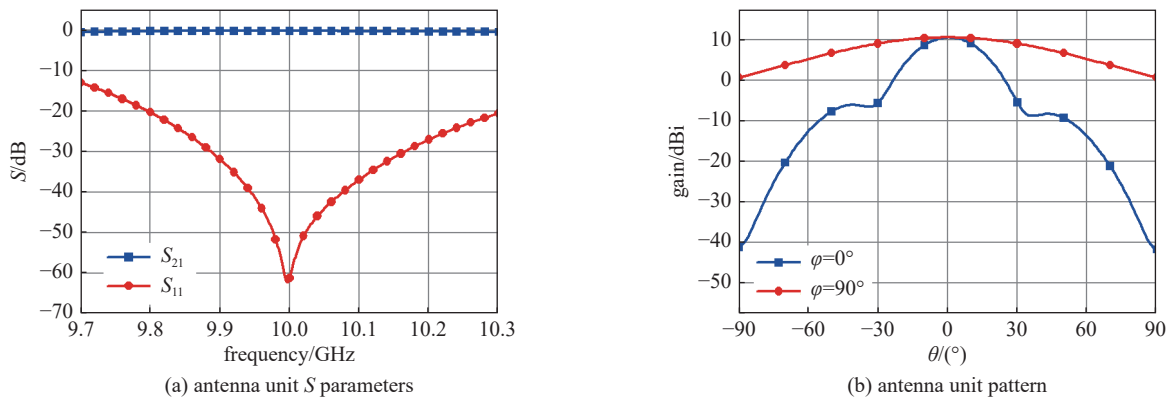


Fig. 7 S parameters and far field direction pattern of antenna unit

图 7 透镜单元的 S 参数及远场方向图

0.1 MV/cm 进行估算<sup>[13]</sup>, 单元平均功率容量在 0.35 MW 左右, 组阵后功率容量可在 0.78 GW/m<sup>2</sup>。应用中可根据需要, 通过增加传输通道波导高度进一步增加功率容量。

### 3 阵列设计仿真

设计的透射阵列如图 9 所示。阵列共有 324 个单元, 尺寸 500 mm×500 mm, 馈源为辐射柱面波的喇叭天线, 口面尺寸为 500 mm×80 mm, 馈源喇叭与阵列的几何中心在轴向重合, 距离为 500 mm, 满足远场辐射的条件。图 10 为喇叭天线方向图, 增益为 25.2 dBi。

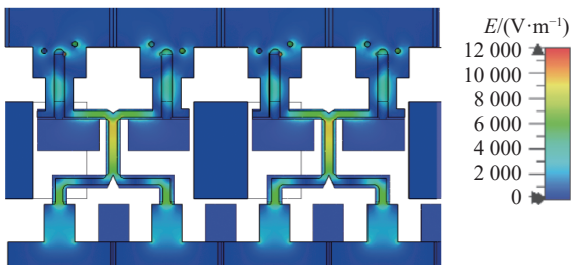


Fig. 8 Electric field distribution of antenna unit

图 8 透镜单元电场分布

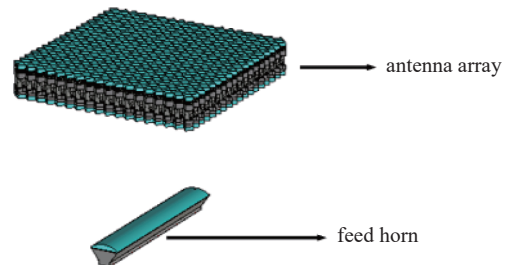


Fig. 9 Transmission array antenna

图 9 透射阵列天线

组阵后每个螺旋单元根据相位补偿原理, 求得单元所需的透射相移为

$$\phi_R = k_0[d_i - (x_i \cos \varphi_b + y_i \sin \varphi_b) \sin \theta_b] \quad (1)$$

式中:  $k_0$  为真空中的自由波数,  $d_i$  为馈源天线的相位中心到第  $i$  个单元的空间距离,  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个单元的坐标。

当平面空馈阵列的波束指向为  $(\theta_b, \varphi_b)$  时, 如果阵列上每个单元的透射相移被调整为  $\phi_R$  时, 由馈源发出的入射波到阵列上各个单元不同路径所造成的透射相位差就可以得到合理的补偿, 从而使得阵列在给定的  $(\theta_b, \varphi_b)$  方向形



成同相的高增益波束<sup>[14-15]</sup>。

当阵列不进行相位扫描时, 得到其反射系数如图 11 所示, 从图中可以看出, 在中心频点处的反射系数为  $-37$  dB, 辐射效率达到 99%。图 12 为此时阵列的二维方向图, 从图中可以看到波束没有偏转。此时阵列增益为 33.8 dBi, 副瓣电平为  $-14$  dB。

为验证阵列扫描情况, 分别对扫描  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  进行数值模拟。图 13 为该阵列在  $0^\circ$  方向波束扫描时的方向图, 扫描角以阵列  $\theta=0^\circ$  方向为起始, 方向图对应扫描角在图例中给出, 可以看出阵列扫描至  $45^\circ$  时, 增益下降了 3 dB。在  $60^\circ$  时方向图的形状并未出现恶化, 但增益下降了 6.5 dB, 也可以在某些满足需求的情况下应用。

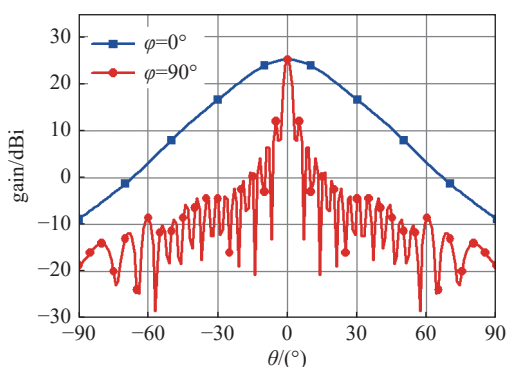


Fig. 10 Horn antenna pattern

图 10 喇叭天线方向图

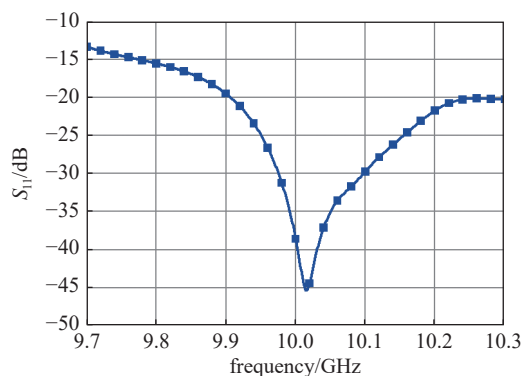


Fig. 11 Antenna array S parameter

图 11 透镜阵列 S 参数

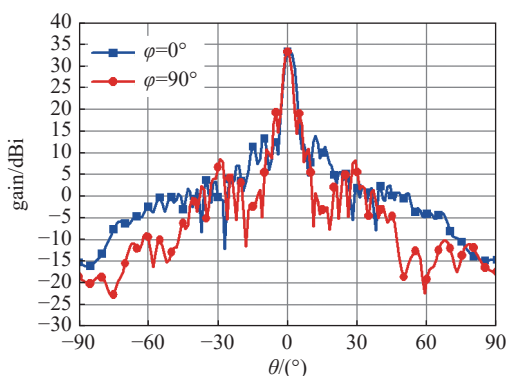


Fig. 12 Antenna array 2D pattern

图 12 透镜阵列二维方向图

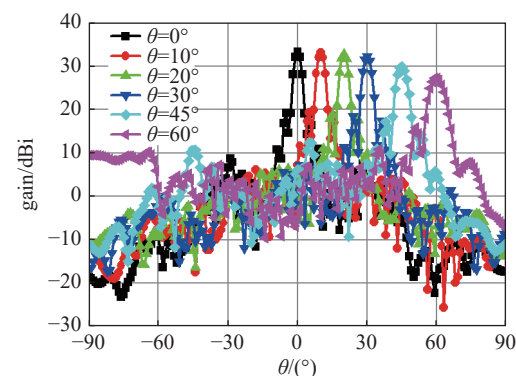


Fig. 13  $0^\circ$  beam scanning pattern

图 13  $0^\circ$  波束扫描方向图

与上文提到的全金属结构的传输阵列透镜和高功率微波复合介质透镜相比, 本文设计的透镜有以下几方面优势: (1) 波束扫描方式和扫描速度。全金属结构的传输阵列透镜和高功率微波复合介质透镜均采用整体旋转透镜的方式实现相位扫描, 相位调整所需时间约为 6 s, 而本文设计的螺旋阵列可通过旋转螺旋单元进行相位调整, 所需时间小于 1 s; (2) 工作带宽。这两种透镜工作带宽小于 200 MHz, 而本文设计的螺旋阵列可到 400 MHz; (3) 组阵方式。上文中两种透镜只能整体加工, 组阵受限, 而螺旋阵列可单元加工后集成, 组阵更加灵活。

## 4 结论

本文提出并设计了一种采用空间馈电的螺旋透射阵列天线, 为实现 HPM 波束扫描提供了新的解决方案, 可以实现馈源和透射阵列的分离, 降低了波束扫描系统馈电的复杂程度。数值模拟结果表明, 324 单元的阵列最大增益 33.8 dBi, 最大辐射效率 99%, 口径效率 0.68。可实现  $45^\circ$  范围的扫描, 增益下降了 3 dB。当天线内部工作在  $SF_6$  下时, 单元平均功率容量在 0.35 MW 左右, 组阵后功率容量可在  $0.78 \text{ GW/m}^2$ , 根据需要可通过优化传输通道设计, 进一步提高系统功率容量。该设计为高功率微波应用提供了一种新的天线形式。

## 参考文献:

- [1] Benford J. Space applications of high-power microwaves[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(3): 569-581.
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.

- [3] Zhao Xuelong, Yuan Chengwei, Liu Lie, et al. All-metal transmit-array for circular polarization design using rotated cross-slot elements for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3253-3256.
- [4] Zhao Xuelong, Yuan Chengwei, Liu Lie, et al. All-metal beam steering lens antenna for high power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(12): 7340-7344.
- [5] Sun Yunfei, He Juntao, Yuan Chengwei, et al. *Ku*-band radial-line continuous transverse stub antenna with transmit-array lens for high-power microwave application[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 2050-2059.
- [6] Sun Yunfei, Dang Fangchao, Yuan Chengwei, et al. A beam-steerable lens antenna for *Ku*-band high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7580-7583.
- [7] Zhao Xuhao, Yuan Chengwei, Zhang Jiande, et al. Design of a beam scanning metamaterial antenna with polarization transform for high-power microwave application[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(10): 3255-3265.
- [8] 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.
- [9] 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 helical array antenna fed from planar waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 023002)
- [10] 王萍. 脊波导各种参数的计算[J]. *火控雷达技术*, 2004, 33(3): 50-55. (Wang Ping. The parameter calculation for ridge waveguide[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2004, 33(3): 50-55)
- [11] Wheeler H A. A helical antenna for circular polarization[J]. *Proceedings of the IRE*, 1947, 35(12): 1484-1488.
- [12] Kraus J D, Marhefka R J. *Antennas: for all applications*[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [13] Zhao Pengcheng, Liao Cheng, Lin Wenbin. Propagation of high-power microwave pulses in air-SF<sub>6</sub> mixtures at high pressure[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2013, 43(3): 257-269.
- [14] 钟顺时. *天线理论与技术*[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2015. (Zhong Shunshi. *Antenna theory and techniques*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015)
- [15] 林昌禄. *近代天线设计*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993. (Lin Changlu. *Modern antenna design*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1993)