



·高功率微波技术专辑·

# 一种旋转移相式高功率微波反射阵列天线\*

许 亮, 张 强, 袁成卫, 刘金亮, 孙云飞, 龚鸿州, 刘东琪

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 利用旋转移相技术的几何相位调控方法, 提出一种基于传输相位差概念的波束扫描高功率微波反射阵列天线。电磁仿真结果表明, 所设计的三叉戟形反射阵列天线单元工作于 9.5~10.5 GHz, 在 0~40°入射角度下具有 360°范围内的线性相位调控能力, 真空条件下的功率容量达到 1.11 GW。采用该单元设计了半径为 200 mm 的圆形口径反射阵列天线, 并使用全波仿真软件进行验证, 利用口径相位分布的可重构特性, 所设计的反射阵列天线可以实现±40°范围内的波束扫描。在 10 GHz 时, 波束扫描过程中的增益下降小于 1.7 dB, 最大增益达到 31.1 dBi, 对应口径效率为 73.42%, 最低口径效率超过 50%, 副瓣电平和轴比始终低于 -18.7 dB 和 1.6 dB。

**关键词:** 旋转移相技术; 波束扫描; 反射阵列天线; 高功率微波; 功率容量

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230379

## A high-power microwave reflectarray antenna based on variable rotation technique

Xu Liang, Zhang Qiang, Yuan Chengwei, Liu Jinliang, Sun Yunfei, Gong Hongzhou, Liu Dongqi

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

**Abstract:** In this paper, utilizing the geometrical phase shifting method of Variable Rotation Technique (VRT), we propose a beam scanning high-power microwave reflectarray antenna based on the concept of transmission phase difference. Electromagnetic simulation results show that the designed trident-shaped reflectarray antenna element operates at 9.5–10.5 GHz, has a linear phase shift capability within 360° at 0–40° incidence angle, and has a power handling capacity of 1.11 GW under vacuum conditions. A circular-shaped aperture reflectarray antenna with a radius of 200 mm is designed using the proposed element, and verified by full-wave simulation. Through the reconfiguration of the aperture phase distribution, the designed reflectarray antenna can realize the beam scanning in the range of ±40°. At 10 GHz, the maximum gain loss during beam scanning is less than 1.63 dB, the maximum gain reaches 31.1 dBi, the corresponding aperture efficiency is 73.42%, while the minimum aperture efficiency is more than 50%. The sidelobe level and axial ratio are always lower than -18.7 dB and 1.6 dB, respectively.

**Key words:** variable rotation technique, beam scanning, reflectarray antenna, high-power microwave, power handling capacity

高功率微波辐射系统是高功率微波从产生到传输向自由空间的辐射终端, 高功率微波天线是高功率微波辐射系统中的重要组成部分。为了实现辐射系统功率容量和增益的提升, 往往通过将天线单元组成阵列以获得更大的物理口径。目前主流的高功率微波阵列天线主要包括波导缝隙阵列天线<sup>[1-3]</sup>、螺旋阵列天线<sup>[4-6]</sup>、传输阵列透镜天线等<sup>[7-9]</sup>, 它们均实现了 GW/m<sup>2</sup> 量级的功率容量, 具备二维波束扫描的能力。但是, 它们均受到复杂的馈电网络或较大的轴向尺寸的制约, 使得整个辐射系统在部分场景的应用受限。随着高功率微波辐射系统对于天线的共形能力、波束灵活调控能力、小型化与模块化能力的更高要求, 需要提升高功率微波天线与各类装载平台的适配性。研究功率容量高、波束扫描范围大、馈电方式简便和具有低剖面的高功率微波天线成为高功率微波应用的迫切需求。反射阵列天线因其空间馈电和低剖面特性, 较好地契合于上述发展方向, 但目前关于高功率微波反射阵列天线

\* 收稿日期: 2023-10-30; 修订日期: 2023-12-26

联系方式: 许 亮, 784151904@163.com。

通信作者: 袁成卫, cwyan@nudt.edu.cn;

刘金亮, lle333@163.com。

的相关研究报导中,往往又受到功率容量和波束扫描性能的限制<sup>[10-12]</sup>。本文利用旋转移相技术(VRT),基于传输相位差概念,设计了一种三叉戟形的反射阵列天线单元,由该单元组成的反射阵列天线具有结构简单易加工、波束扫描灵活和功率容量高等特点。

### 1 三叉戟形反射阵列天线单元

基于几何相位调控在反射阵列天线上的应用首先由 John Huang 提出<sup>[13]</sup>,对于一束照射向反射阵元的理想圆极化入射波,其在传播方向上可以分解为两束幅度相等、相位相差  $\pi/2$  的正交线极化波,若这两束线极化波经过反射阵元的相位调制后,在两个正交极化方向上产生了  $\pi(180^\circ)$  的相位差,则反射波能够保持与入射波相同的圆极化偏振状态。假设此时单元相对初始状态的旋转角度为  $\eta$ ,则反射相位会产生  $2\eta$  的改变,这意味着在理想情况下,基于几何相位调控的反射阵元可以在  $180^\circ$  旋转角度内实现  $360^\circ$  范围内的线性相位调控。

#### 1.1 三叉戟形反射阵元基本结构和工作原理

为了实现反射阵元的高功率容量,本节基于传输相位差的原理设计了一种全金属结构的三叉戟形反射阵列天线单元,可以在波束扫描过程中保持高功率容量和低交叉极化电平。单元中心频率为 10 GHz,其结构如图 1 所示,它由反射器和内部的三叉戟形单元组成。三叉戟形单元由三根顶部枝节、反射圆盘和底部枝节组成。三根顶部枝节长度和厚度分别为  $h_1$  和  $t_1$ ,位于中间的枝节宽度为  $w_1$ ,左右两侧枝节宽度为  $w_2$ ,与中间枝节的间隔为  $w_3$ ;反射圆盘直径为  $d_1$ 、厚度为  $h_2$ ;底部枝节长度为  $h_3$ ,直径为  $d_5$ 。反射器外观是边长为  $l$ 、高度为  $h$  的正六棱柱,其中掏空出直径为  $d_2$ 、深度为  $h_4$  的圆波导,圆波导尺寸满足入射波在工作频率下不截止。圆波导下端是深度为  $h_5$ 、内外直径分别为  $d_3$  和  $d_4$  的扼流槽。正六棱柱底部是内外直径分别为  $d_5$  和  $d_6$ 、厚度为  $h_6$  的微型轴承,优化后的结构参数见表 1。装配过程中,三叉戟形单元插入反射器中的圆波导,底部枝节穿出微型轴承并与步进电机连接,通过步进电机带动天线单元的旋转,从而实现对反射相位的线性调控。

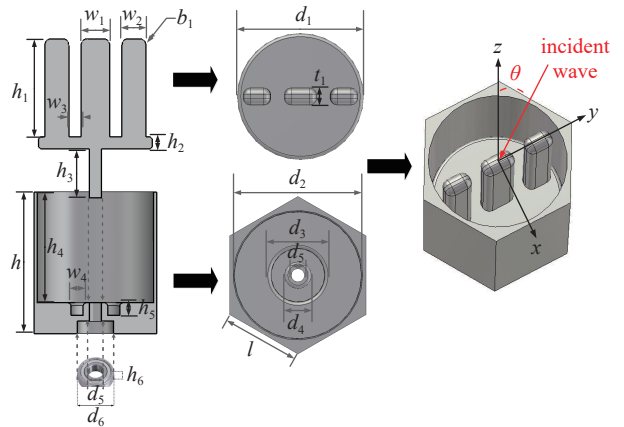


Fig. 1 Configuration of the trident-shaped reflectarray antenna element

图 1 三叉戟形反射阵列天线单元结构示意图

表 1 三叉戟形反射阵列天线单元结构参数  
Table 1 Geometry parameters of the trident-shaped reflectarray antenna element (mm)

$l$	$h$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$t_1$	$b_1$
11.5	23	16	2	6	18	2	2.5	2.5	1
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	
18.5	18.9	9	4	2	5	4.7	3.9	2	

为了说明三叉戟反射阵列天线单元基于传输相位差的工作机理,对该类天线单元采用一种线极化传输特性的通用分析方法。以图 2 中的模型为例,定义极化方向与三叉戟枝节平行的线极化波为  $y$  极化波,极化方向与三叉戟枝节垂直的线极化波为  $x$  极化波。如图 2(a)所示,去掉三叉戟形单元底部的反射圆盘和正六棱柱底部的金属结构,则天线单元剩余部分形成一个具有传输通道的模型,在 CST 中使用 unit cell 边界条件可以获得该传输模型中  $x$  与  $y$  极化波的反射系数,结果表明该传输模型在  $y$  极化方向上的谐振频率低于 10 GHz,对于 10 GHz 的入射波,传输模型呈容性,使得入射波相位滞后。而在在  $x$  极化方向上,传输模型的谐振频率大于 10 GHz,对于 10 GHz 的入射波,传输模型呈感性,使得相位超前。以上特性表征出的直观形式便是对于 10 GHz 的圆极化入射波,其在  $x$  极化方向和  $y$  极化方向的分量具有不同的传播常数  $\beta_1$  和  $\beta_2$ 。考虑到金属板的反射作用,线极化波的传输路径是传输通道的两倍。根据上一节的分析,实现旋转移相单元的标准变为

$$P_d = 2h_1(\beta_1 - \beta_2) = \pi \quad (1)$$

其中  $P_d$  为入射波经过反射后在  $x$  极化方向和  $y$  极化方向的传输相位差。对于上述传输模型来说,需要满足  $x$  极化方向与  $y$  极化方向的传输相位差接近  $\pi/2$ 。图 2(b)给出了该传输模型在两个极化方向上同时入射的线极化波经过相位调制后的传输相位,可以观察到在  $y$  极化方向的相位延迟量在 9~10 GHz 的范围内接近  $90^\circ$ 。需要指出的是,

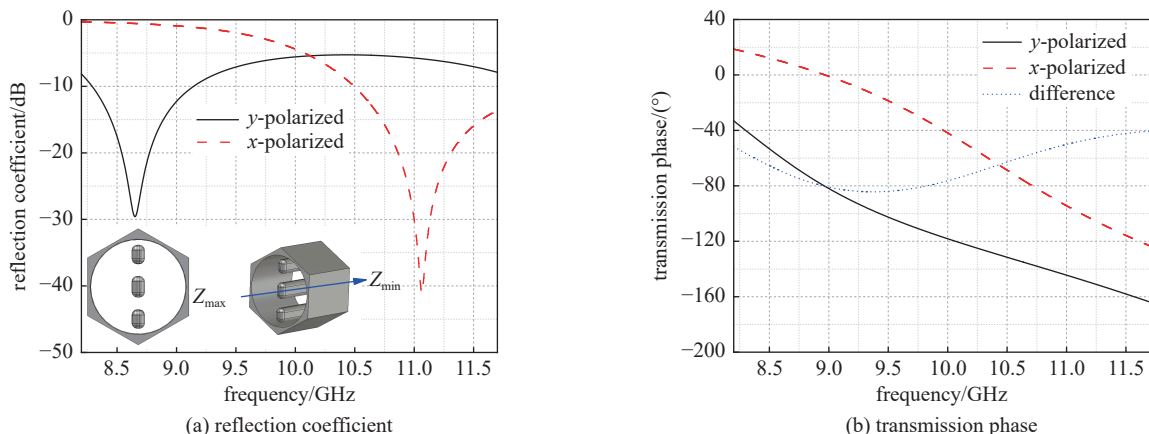


Fig. 2 Transmission model analysis of the trident-shaped reflectarray antenna element

图2 三叉戟形反射阵列天线单元的传输模型分析

结合图2(a), 两束线极化波在中心频点处存在一定程度的反射, 并未完全透过传输结构, 只有透射分量可以接受传输结构的相位调制。因此, 采用线极化传输特性的通用研究方法只能用于分析和研究单元在移相机制上的特点, 并不能得到准确的圆极化移相结果。

## 1.2 三叉戟形反射阵元性能

在以上研究基础上, 以圆极化波在不同入射角  $\theta$  下激励带有反射结构的完整的三叉戟形反射阵元, 可以较为准确的反映单元在圆极化入射波下的工作特性。以理想圆极化波入射、三叉戟形结构逆时针旋转为标准, 得到了单元的幅度响应如图3(a)所示, 随着入射波的入射角度从  $0^\circ$  增加到  $40^\circ$ , 反射波中的共极化分量在  $9.5 \sim 10.7$  GHz 范围内始终保持大于  $-0.4$  dB, 且交叉极化分量小于  $-10$  dB, 证明了该单元受入射角度的影响较小, 具有良好的鲁棒性。另一方面, 图3(b)展示了单元在  $9.5$ 、 $10$  和  $10.5$  GHz 频点上反射相位随旋转角  $\eta$  的变化规律。尽管受到大入射角度的影响, 单元的相移曲线出现一定程度上的波动, 但反射相位变化规律基本上遵循与旋转角度的二倍关系, 表明了该单元在  $9.5 \sim 10.5$  GHz 范围内具备良好的线性移相能力。

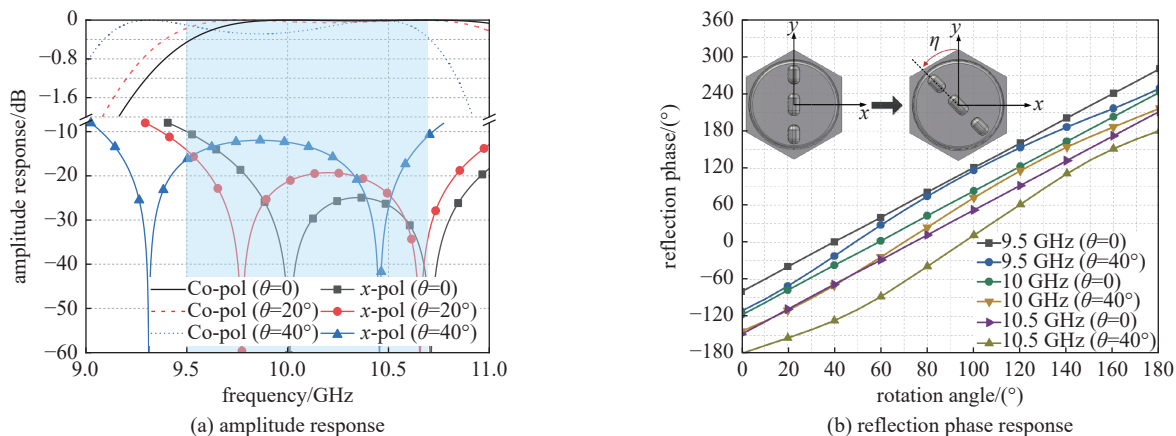


Fig. 3 Simulation results of the trident-shaped reflectarray antenna element

图3 三叉戟形反射阵列天线单元仿真结果

图4给出了该天线单元在  $0^\circ$  和  $40^\circ$  两个极端入射状态下随着旋转角度变化的共极化分量曲线和最大电场强度分布曲线。天线单元除了在  $10.5$  GHz、 $40^\circ$  大入射角条件下的共极化分量占比下降到  $73.6\%$ , 在其他状态中的共极化分量始终大于  $90\%$ , 在中心频率  $10$  GHz 处, 其共极化分量占比在  $40^\circ$  入射条件大于  $93\%$ 。另一方面, 仿真中设置平均功率为  $0.5$  W, 单元的最大电场强度始终小于  $20$  kV/m。天线单元功率容量计算公式为

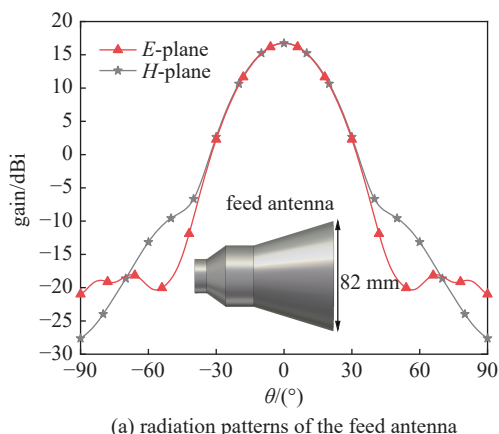
$$P_{\max} = \left( \frac{E_{\text{break}}}{E_{\max}} \right)^2 \times P_{\text{in}} \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{break}}$  是材料的击穿阈值, 通常取真空中金属的击穿阈值为  $500$  kV/cm;  $P_{\text{in}}$  是输入功率;  $E_{\max}$  是在该功率下器件表面的最大电场强度。根据式(2)计算得到在真空条件下, 单元在工作带宽内的功率容量大于  $3.27$  MW, 单位面积

内的等效功率容量大于 9.51 GW/m<sup>2</sup>, 证明了基于传输路径移相的反射阵元具有的高功率容量特性。

## 2 三叉戟形反射阵列天线仿真

作为验证, 将工作在 10 GHz 的三叉戟形反射阵列天线的反射阵面设置为半径 200 mm 的圆形口径, 为了避免馈源遮挡效应对天线辐射性能产生影响, 采用了馈源天线以 20°斜入射角照射反射阵列表面的偏馈设计。如图 5(a) 所示, 馈源天线为多模圆锥喇叭天线, 辐射 HE<sub>11</sub> 混合模式, 具有良好的等化辐射特性, 其 -10 dB 波束宽度约为 50°。根据馈源天线辐射特性, 综合选定其相位中心摆放位置距离 z 轴的高度为 400 mm, 焦距比 F/D=1, 图 5(b) 为此构型下的三叉戟形反射阵列天线整体结构。



(a) radiation patterns of the feed antenna

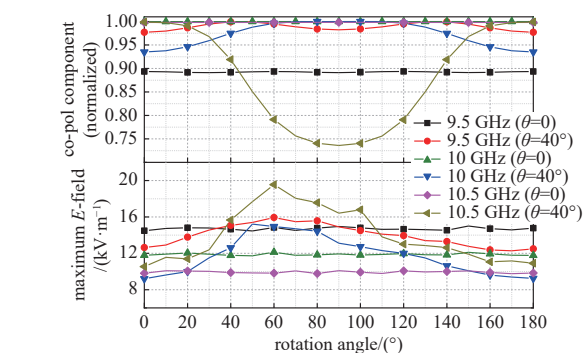
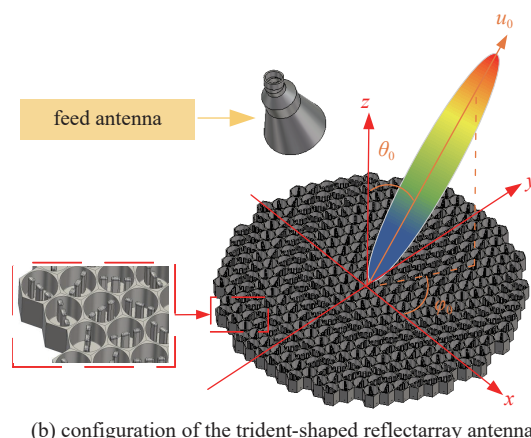


Fig. 4 Co-polarization component and maximum E-field distribution of the trident-shaped reflectarray antenna element

图 4 三叉戟形反射阵列天线单元的共极化分布曲线与场分布曲线



(b) configuration of the trident-shaped reflectarray antenna

Fig. 5 Configuration of the feed antenna and the trident-shaped reflectarray antenna

图 5 馈源天线和反射阵列天线构型

对于给定尺寸和馈源等条件的反射阵列天线, 阵列口径面上的相位分布主要由两部分组成, 其一是用于补偿从馈源相位中心辐射的电磁波到各单元所在位置的空间路径差异产生的空间相位差; 另一部分是用于实现预期波束指向所需要的梯度相位差。因而反射阵中第  $mn$  个单元所需要补偿的反射相位为<sup>[14]</sup>

$$\varphi_{mn} = k(|r_d| - \hat{\mathbf{u}}_0 \cdot \mathbf{r}_{mn}) + \Delta\varphi \quad (3)$$

式中:  $k$  是自由空间中的波数,  $|r_d|$  是馈源相位中心到反射阵面上第  $mn$  个反射阵元的距离,  $\mathbf{u}_0$  是期望主波束辐射方向上的单位矢量,  $\mathbf{r}_{mn}$  是从坐标原点指向反射阵元的位置矢量,  $\Delta\varphi$  是口径面的参考相位。

根据式(3)计算了 6 种波束扫描状态下所需要的口径面量化反射相位分布情况, 如图 6 所示。图示结果反映出, 得益于反射阵元近乎线性的相移曲线, 量化口径相位分布均匀, 能够保证对反射波的有效相位调制。

通过全波仿真计算得到 10 GHz 时, 三叉戟形反射阵列天线在不同波束指向下的三维辐射方向图如图 7 所示。从中可以看出, 通过改变反射阵的口面相位分布, 能够实现 ±40° 范围内的二维空间波束扫描。天线在波束指向为 ( $\theta_0=10^\circ, \varphi_0=90^\circ$ ) 时的增益达到 31.1 dBi, 对应口径效率达到 73.42%。当波束扫描范围增大到 ( $\theta_0=40^\circ, \varphi_0=90^\circ$ ) 时, 增益降低到 29.47 dBi, 对应口径效率为 50.45%。以上结果表明, 该天线在二维波束扫描过程中的增益下降范围不超过 1.7 dB, 且未出现明显栅瓣抬升现象。

图 8 为反射阵列天线在 ( $\theta_0=0^\circ, \varphi_0=90^\circ$ ) 和 ( $\theta_0=40^\circ, \varphi_0=90^\circ$ ) 两个典型波束扫描状态下的二维归一化辐射方向图, 从中可以看出该反射阵列天线在 9.5~10.5 GHz 范围内均保持了较好的方向图一致性, 随着频率偏离中心频点, 最大波束指向略微发生偏移, 这是由于频率变化造成的空间相位差改变以及单元反射相位变化导致, 可以针对频带内的任一频点进行单独的口面相位分布计算, 从而实现在该频点处精准的波束扫描控制。此外, 从图 8(b) 中注意到, 天线在 10.5 GHz 时出现了较为明显的后向栅瓣, 这是由于天线单元周期间隔不满足此工作频点下的栅瓣抑制条件所致, 因而造成了栅瓣抬升和增益下降。仿真结果表明, 该阵列天线除了在 10.5 GHz、波束扫描俯仰角

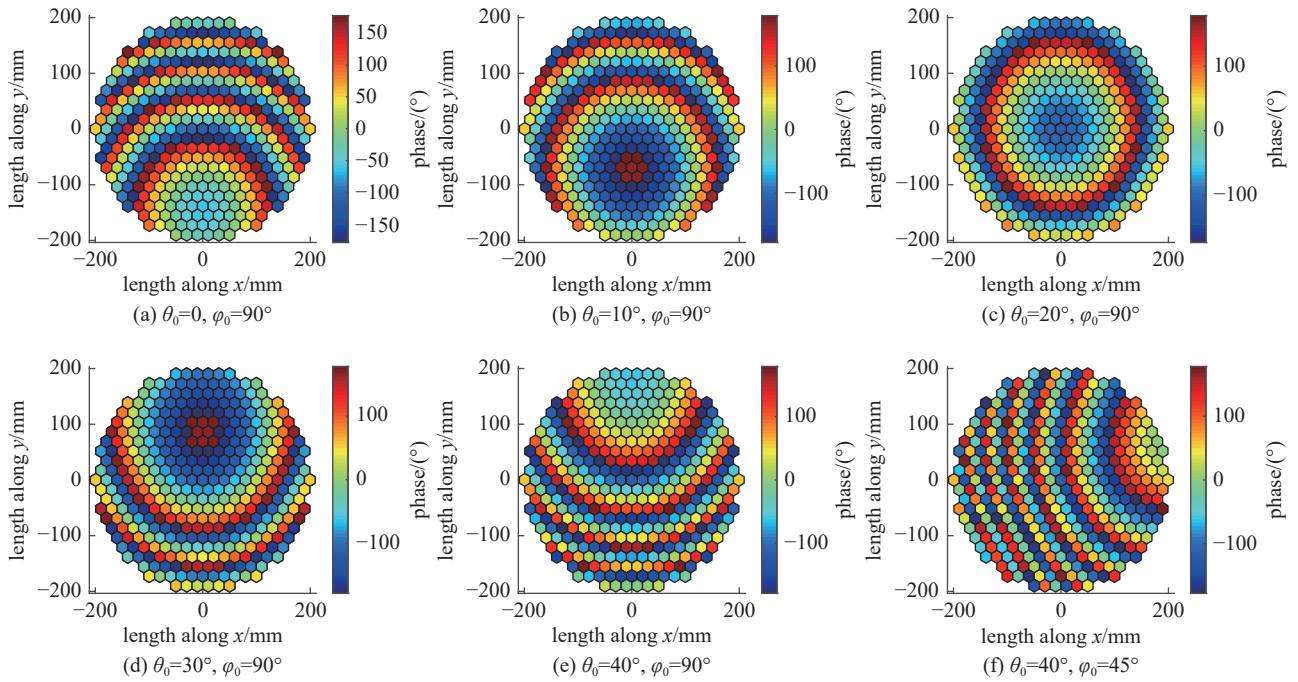


Fig. 6 Aperture phase distribution of different beam scanning states

图 6 不同波束扫描状态下的口径相位分布

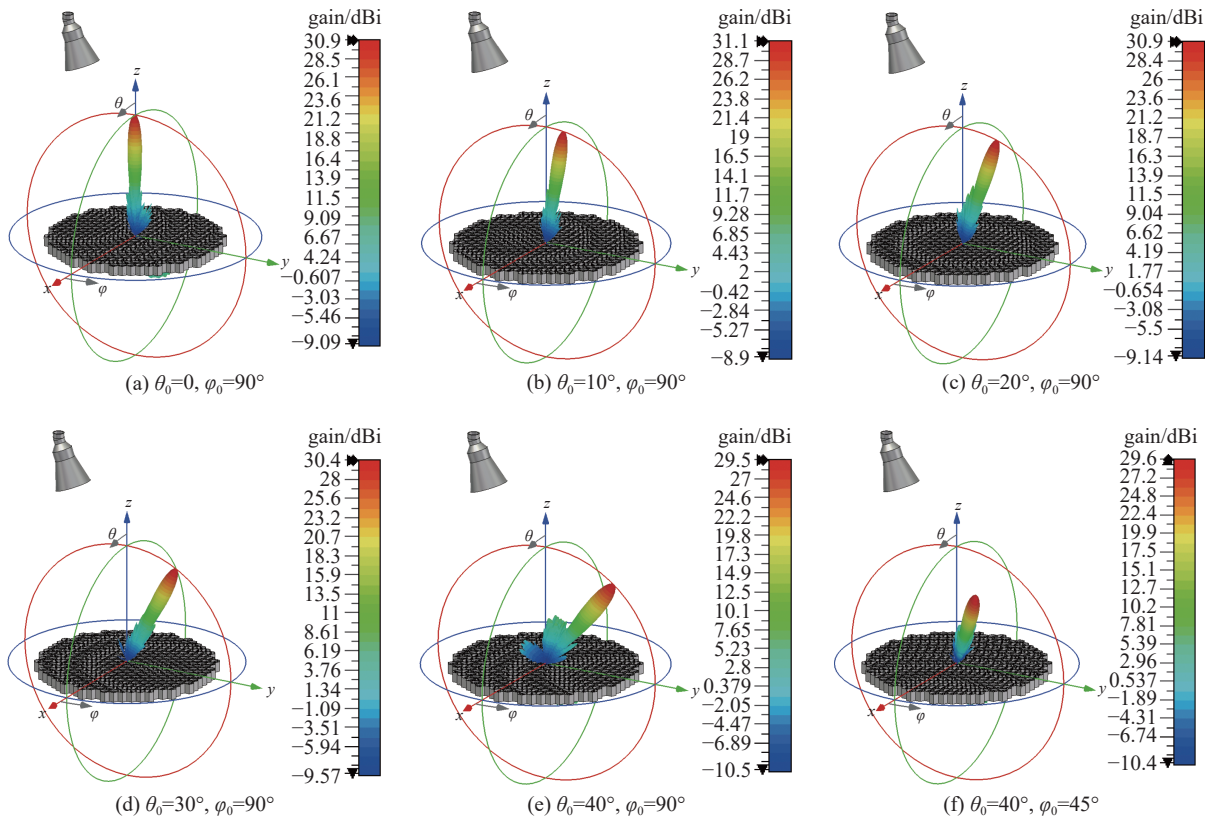


Fig. 7 Three-dimensional radiation patterns of the trident-shaped reflectarray antenna

图 7 三叉戟形反射阵列天线三维辐射方向图

40°时出现了明显的交叉极化电平升高和后向栅瓣, 在 9.5~10.5 GHz 范围内, 其他波束扫描状态下的副瓣电平小于 -18.7 dB, 交叉极化电平小于 -20 dB, 在 1 GHz 工作带宽内(相对带宽 10%)具有良好的二维空间波束扫描性能。表 2 进一步汇总了该天线在中心频点时的工作性能, 其在波束扫描过程中的最大口径效率达到 73.42%, 最低口径效率仍超过 50%, 主瓣轴比始终小于 1.6 dB, 具有良好的辐射性能。

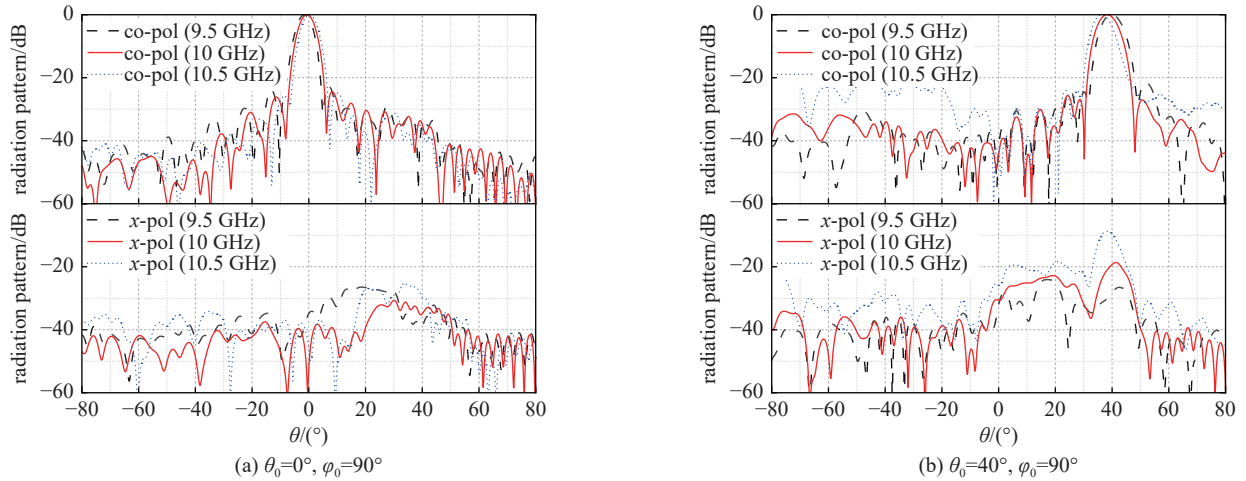


Fig. 8 Normalized radiation patterns of the trident-shaped reflectarray antenna

图 8 三叉戟形反射阵列天线归一化辐射方向图

表 2 三叉戟形反射阵列天线不同波束指向下的辐射特性 (10 GHz)

Table 2 Performance of the trident-shaped reflectarray antenna in different beam scanning states (10 GHz)

beam direction/(°)	gain/dBi	sidelobe level/dB	axial ratio/dB	aperture efficiency/%
(0, 90)	30.91	-24.0	0.032	70.28
(10, 90)	31.10	-21.2	0.132	73.42
(20, 90)	30.86	-18.7	0.317	69.47
(30, 90)	30.43	-22.9	0.467	62.92
(40, 90)	29.47	-22.6	1.553	50.45
(40, 45)	29.63	-25.6	1.426	52.34

利用全波仿真软件对三叉戟形反射阵列天线的功率容量进行评估, 不考虑馈源天线功率容量的影响, 在 10 GHz、输入功率 1 W 时, 得到天线的表面电场分布如图 9 所示。三个扫描状态下的最大电场均出现在馈源天线内部, 而反射阵列表面的最大电场强度不超过 1500 V/m, 计算得到功率容量超过 1.11 GW(等效为 8.84 GW/m<sup>2</sup>)。

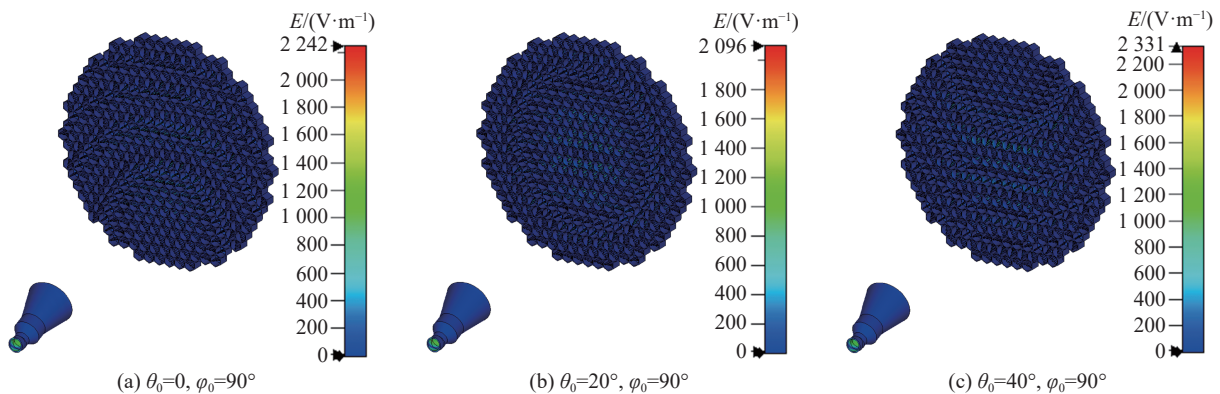


Fig. 9  $E$ -field distribution of the trident-shaped reflectarray antenna (10 GHz)

图 9 三叉戟形反射阵列天线电场分布 (10 GHz)

### 3 结 论

本文基于旋转移相技术的几何相位调控方法, 以实现反射阵列天线的高功率容量和灵活的二维空间波束扫描能力为目标进行研究。根据反射阵列天线单元实现旋转移相的前提, 提出了一种基于传输相位差概念的反射阵列设计思路, 设计了一种三叉戟形高功率微波反射阵列天线单元(工作带宽 9.5~10.5 GHz)。通过该单元阐述了对该类天线单元可以采用线极化传输特性分析的研究方法, 并利用全波仿真验证了基于该天线单元所设计的反射阵列天线的辐射性能及波束扫描能力。全波仿真结果表明, 在中心频点处, 半径为 200 mm 的三叉戟形反射阵列天线

可以实现 $\pm 40^\circ$ 范围内的波束灵活调控,在不考虑馈源功率容量限制的情况下,反射阵面在真空条件下的功率容量达到 1.11 GW,最大口径效率超过 70%,辐射性能良好。以上研究结果表明,采用所提出的三叉戟形反射阵元所组成的反射阵列天线,具有在高功率微波辐射系统中的应用潜力,相关研究方法有望得到进一步的实验验证。

#### 参考文献:

- [1] Guo Letian, Huang Wenhua, Chang Chao, et al. Studies of a leaky-wave phased array antenna for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2366-2375.
- [2] Yang Yiming, Yuan Chengwei, Qian Baoliang. A beam steering antenna for X-band high power applications[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2014, 68(8): 763-766.
- [3] 李佳伟, 黄文华, 梁铁柱, 等. 基于漏波波导的 X 波段高功率微波天线[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(8): 2125-2129. (Li Jiawei, Huang Wenhua, Liang Tiezhu, et al. Design and simulation of X-band HPM antenna based on leaky waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2125-2129)
- [4] 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.
- [5] Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhang Jianqiong, et al. 16-element single-layer rectangular radial line helical array antenna for high-power applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, 9: 708-711.
- [6] Yu Longzhou, Yuan Chengwei, He Juntao, et al. Beam steerable array antenna based on rectangular waveguide for high-power microwave applications[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 535-541.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhao Xuhao, Xu Liang, Zhang Jiande, et al. A dielectric embedded reflectarray for high-power microwave application[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93: 064703.
- [12] Kong Gexing, Li Xiangqiang, Wang Qingfeng, et al. A dual-band circularly polarized elliptical patch reflectarray antenna for high-power microwave applications[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 74522-74530.
- [13] Huang J, Pogorzelski R J. A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(5): 650-656.
- [14] Mao Yilin, Xu Shenheng, Yang Fan, et al. A novel phase synthesis approach for wideband reflectarray design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 4189-4193.