



·高功率微波技术·

伸缩式全金属反射阵列扫描天线*

赵旭浩¹, 毕绍锋², 张建德², 孙云飞², 张 强², 袁成卫²

(1. 中国人民解放军海军研究院, 上海 200040; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科科学院 高功率微波技术研究所, 长沙 410073)

摘 要: 提出了一种伸缩式全金属反射单元, 在此基础上设计了一个可用于高功率微波领域的全金属反射阵列波束扫描天线。通过反射单元的上下独立滑动, 阵列中每个阵元所接收电磁波的传输路径可改变, 从而实现了相控波束扫描。由电磁仿真可知, 设计的反射单元能够在 10~13 GHz 的频带范围内实现 0~360° 的线性相位调节, 且可在 15°~40° 偏馈条件下相位调节时保持高功率容量。由该型单元组成的中心工作频率为 10 GHz 的伸缩式全金属反射阵列扫描天线具备 90° 锥角范围内的二维波束扫描能力, 功率容量可达 5 GW/m²。同时, 在波束扫描过程中, 天线增益变化小于 3 dB, 副瓣电平低于 -13 dB, 最大口径效率为 54.59%。

关键词: 波束扫描; 阵列天线; 相位调控; 高功率微波; 功率容量

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210340

Scalable all-metal reflective array beam scanning antenna

Zhao Xuhao¹, Bi Shaofeng², Zhang Jiande², Sun Yunfei², Zhang Qiang², Yuan Chengwei²

(1. Naval Research Institute, Shanghai 200040, China;

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

Abstract: A scalable all metal reflective element is proposed in this paper, and an all-metal reflective array antenna for high power microwave application is also designed. By sliding the connecting rod up and down, the transmission path of the incident wave to each element can be changed to achieve the corresponding phase modulation. Thus, the beam scanning can be achieved. Simulation result shows that the unit can realize linear phase adjustment of 360° within 10–13 GHz and has a power handling capacity of 3 MW, which means the array can achieve 5 GW/m² power handling capacity level after the formation (under vacuum condition). Under the standard of 3 dB gain variation, the antenna can realize a two-dimensional spatial beam scanning within the range of 90° revolving cone angle.

Key words: beam scanning, array antenna, phase modulation, high-power microwave, power handling capacity

作为高功率微波系统的辐射终端, 高功率微波天线直接决定了微波能量能否得到有效利用。现有的高功率微波波束扫描天线有螺旋阵列天线^[1-5]、波导缝隙阵列天线^[6-8]以及漏波阵列天线^[9-11]等, 与以上需要复杂馈电网络的高功率微波天线相比, 反射面天线因其低损耗、高增益的空间耦合馈电方式的特点, 广泛应用于现有的地基高功率微波系统。然而, 随着高功率微波系统向小型化、灵活化方向发展, 受几何结构和扫描能力的限制, 基于传统反射面天线的波束扫描系统已难以满足实际应用需求。平面反射阵列天线的出现与发展, 为新型高功率反射型波束扫描系统的研究提供了思路。作为一种结合了反射面天线和相控阵天线特点的新型天线, 反射阵列天线不仅利用平面化设计克服了传统反射面天线体积庞大、加工困难等问题, 还能通过阵列单元的独立控制实现强大的波束扫描、波束赋形等功能^[12-15]。同时, 特有的空间馈电方式也使其避免了相控阵天线中复杂的功分馈电网络, 有效提高了天线的辐射效率, 具有广阔的应用前景。但是, 目前绝大多数反射阵列天线均由周期性金属贴片单元构成, 且主要依靠有源射频器件的加载来实现对出射波束的调控, 功率容量有限, 无法直接应用于高功率微波领域。为此, 基于传输相位调控机理, 本文提出了一种可伸缩式反射阵列单元, 并将其运用到高功率微波反射阵列扫描天线中。

* 收稿日期: 2021-08-03; 修订日期: 2021-12-25

联系方式: 赵旭浩, allenzhaoxh@qq.com。

通信作者: 袁成卫, cw Yuan@nudt.edu.cn。

仿真结果表明,设计的伸缩式全金属反射阵列扫描天线具有宽频带工作能力、扫描范围广、结构简单、功率容量高等优点。

1 伸缩式调相反射阵元

1.1 伸缩式调相反射阵元的基本结构与原理

由反射阵列的波束调控原理可知,在馈源相对位置固定时,为了改变反射波束指向,不同位置处的反射阵列单元需提供相应的相位补偿。在不改变阵元结构的条件下,最直接的实现方式为改变馈源相位中心至阵列中各单元的距离。基于此,本文提出了如图1所示的上下可伸缩移动的金属阵元来实现电磁波空间传输距离的改变。该金属阵元整体呈方形结构,主要包含金属底板和可调谐反射模块2部分,其中可调谐反射模块由反射柱和连接杆组成。周期边长为 p ,高为 l_0 的金属底板上贯穿有一个边长为 w_0 的共轴方孔,反射模块通过宽 w_1 、长 l_1 的连接杆与金属底板连接。同时,为了提高阵元的功率容量,反射柱的所有棱边均进行了倒角处理,倒角半径为 r_{ch} 。当馈源和阵元位置固定时,通过连接杆在方孔中的上下滑动即可独立调节任意单元反射模块的整体高度 $H_i = h + \Delta h_i$,进而可改变每个阵元接收电磁波的传输路径,达到调相的目的。

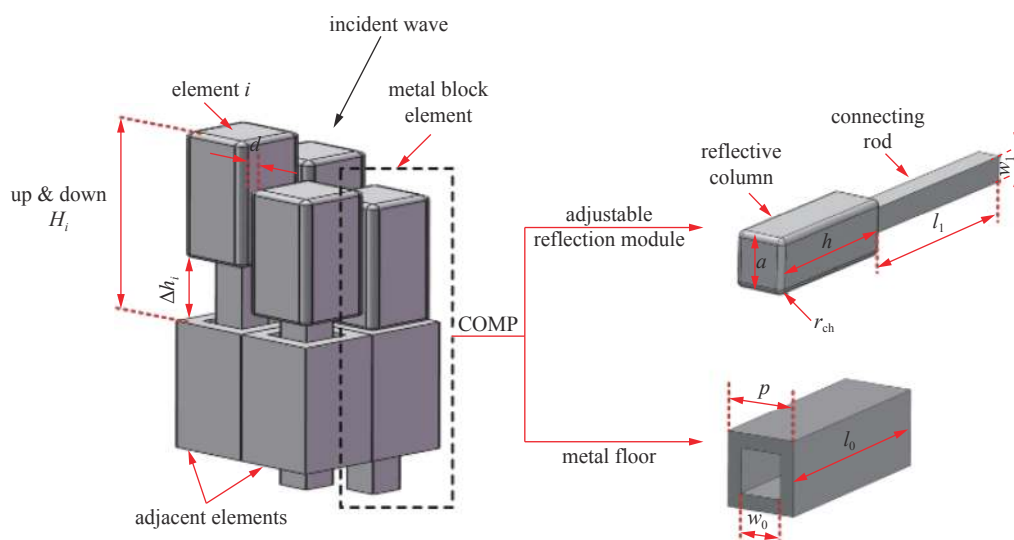


Fig. 1 Overall structure of the scalable all-metal reflective array element

图1 伸缩式全金属反射阵列单元与结构组成

1.2 伸缩式调相反射阵元性能

考虑到工程实现的可行性,阵元的反射柱边长 a 应取小于单元周期 p 的值,以避免相邻阵元在伸缩过程中的相互影响。因此,相邻反射柱之间实际存在如图1所示的宽为 $d = p - a$ 的缝隙。当缝隙宽 d 过大时,部分入射能量会进入缝隙并产生谐振,严重影响反射阵列的工作性能;当缝隙宽 d 过小时,则会加大阵元加工及装配的难度,不易实现。因此,需研究缝隙宽 d 对反射阵元性能的影响,从而进行合理选择。

由前面分析可知,在无谐振、无漏波的条件下,阵元能够通过相对高度 Δh_i 的改变来实现补偿相位的线性调节。然而,当相邻阵元间缝隙宽度不合适时,该线性比例将会受到一定影响。为此,在仿真中,对设计的伸缩式反射阵列单元施加了周期性边界条件来反映周边阵元造成的影响,并采用线极化平面波沿阵元上表面法向对其进行照射。设置阵元周期 $p=10$ mm,反射柱高 $h=30$ mm,在不同馈入频率和阵元间缝隙宽度下,仿真得到了单元反射波相位随相对高度 Δh_i 的变化规律,其结果如图2所示。

由图2可知,在频率10~13 GHz范围内,当相邻阵元间缝隙宽度 $d=0\sim 0.1$ mm之间时,伸缩式反射阵元的出射相位与单元的相对高度 Δh_i 之间基本呈线性关系,即能够在较宽的频带范围内实现 360° 相位调节。随着阵元间距 d 的进一步增大,部分频点处的相移曲线开始产生较大波动,出现非线性趋势。导致这一现象的主要原因是,在特定的 Δh_i 处,部分频点的入射波会在可调谐模块与金属底板之间产生谐振,干扰了单元反射波相位。鉴于此,在伸缩式反射阵元的后续设计中将选取 $d=0.1$ mm作为相邻阵元的间隙。

在此基础上,进一步研究了伸缩式反射阵元在偏馈条件下的工作特性。图3给出了在10 GHz处,反射阵元在不同入射角 θ_{in} 条件下的相移曲线和内部最大电场。从图3中可以看出,入射角 $\theta_{in} \leq 10^\circ$ 时,当阵元相对高度

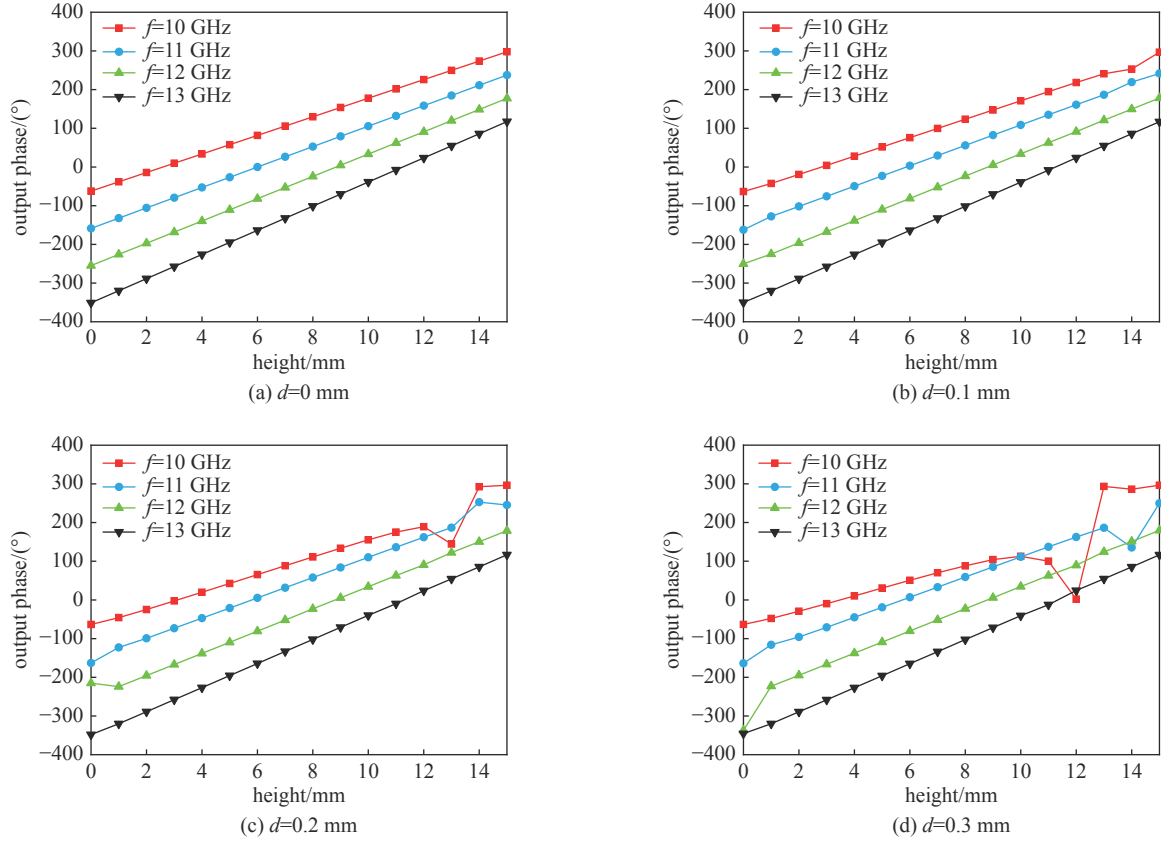


Fig. 2 Influence of the gap width on the phase shifting ability of the array elements
图 2 相邻阵元间距对伸缩式全金属反射阵列单元移相能力的影响

Δh_i 调节至半波长大小, 单元间仍然有一定互耦发生; 此时, 相移曲线出现小幅波动, 结构最大电场大幅上升。当入射角 θ_{in} 继续增大并超过 15° 后, 入射波几乎无法通过阵元间缝隙进入阵元内部; 此时, 反射波相移量与相对高度 Δh_i 呈严格线性关系, 且在 0.5 W 的注入功率下, 反射阵元结构最大电场保持在 20 kV/m 以内, 取真空中金属的击穿阈值为 $500\text{ kV/cm}^{[6]}$ (真空度 $< 10^{-3}\text{ Pa}$), 由式 (1) 可知单元具备 3 MW 的功率容量水平, 即其在组阵后至少可实现 GW/m^2 量级的功率容量 (真空条件下)。图 4 给出了在入射角 θ_{in} 为 15° , 阵元相对高度为 4 mm 时, 单元的口面电场图, 单元最大电场小于 20 kV/m 。因此, 结合上述分析可知, 在伸缩式反射阵列的设计中应尽量避免正馈方式, 而应采用大角度偏置馈入 (考虑到遮挡问题, 最佳偏馈范围应设置为 $15^\circ \sim 40^\circ$), 以保证阵列天线的正常工作。

$$P_{\max} = P_{\text{input}} \left(E_{\max} / E_{\text{input-max}} \right)^2 \quad (1)$$

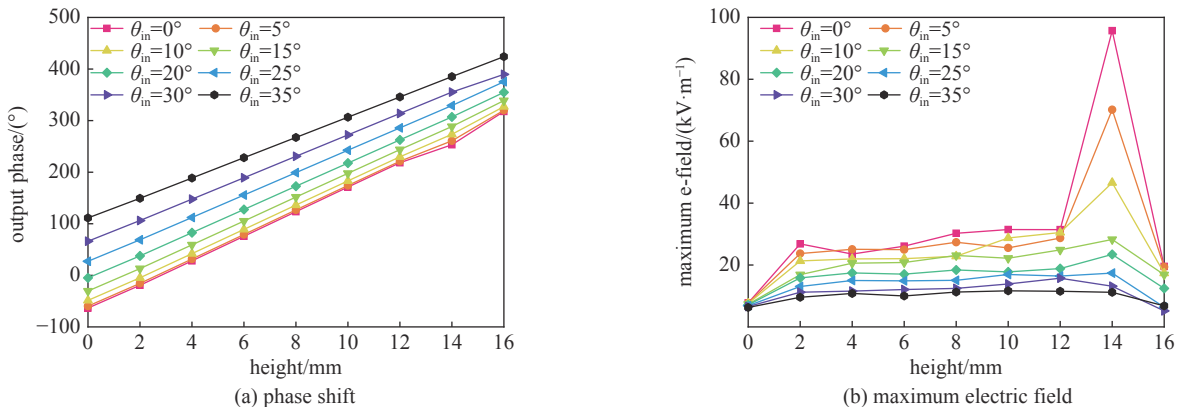


Fig. 3 Phase shift curves and maximum electric field at different incident angles
图 3 不同入射角条件下伸缩式全金属反射阵列单元移相曲线和内部最大电场

2 伸缩式全金属反射阵列扫描天线仿真

利用设计的伸缩式反射阵元组成的全金属反射阵列如图 5 所示,阵列整体呈正方形,边长为 500 mm,由介质窗口进行真空封装,整个波束扫描反射阵列天线通过步进电机带动阵列中各单元的伸缩来实现对波束出射方向的调控。为了与实验室研制的 X 波段速调管放大器^[17]配合,以构成完整的高功率微波空间功率合成系统,设计的伸缩式反射阵列的中心工作频率设置为 10 GHz。仿真中,采用 10 GHz 无直波导移相段多模圆锥喇叭作为馈源,以线极化 HE₁₁ 模式馈入,馈源相位中心与阵列中心相距 1 390.63 mm,中心入射角为 25°,此时反射阵列的锥削电平约为 -10 dB。由图 3(a)可知,当馈入角 $\theta_{in} > 15^\circ$ 后,单元出射波相移量基本保持在约 $21.7578^\circ \Delta h_i$,结合反射阵列的波束调控原理^[8]和阵列布局理论,即可求出不同指向时伸缩式反射阵列中各单元的相对高度。

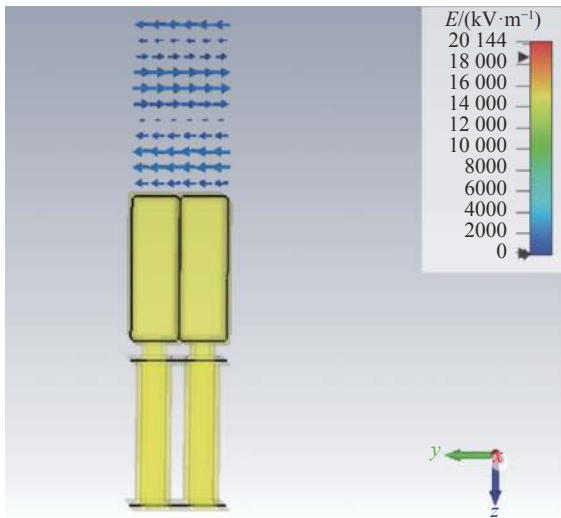


Fig. 4 Electric field of the unit ($\Delta h_i=4$ mm, $\theta_{in}=15^\circ$)

图 4 单元的口面电场图(入射角 $\theta_{in}=15^\circ$, 阵元相对高度 $\Delta h_i=4$ mm)

以图 5 所示的空间直角坐标系为基准,记反射阵列出射波束的俯仰角为 θ ,方位角为 φ 。为了验证伸缩式反射阵列的波束扫描特性,选取了 $(\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ)$, $(\theta=15^\circ, \varphi=0^\circ)$, $(\theta=30^\circ, \varphi=0^\circ)$, $(\theta=45^\circ, \varphi=0^\circ)$, $(\theta=45^\circ, \varphi=90^\circ)$, $(\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ)$, $(\theta=60^\circ, \varphi=180^\circ)$ 7 个状态进行仿真。阵列扫描过程中的二维远场方向图如图 6 所示,由图 6 可知,设计的反射阵列可以在俯仰面上对反射波束进行调控,其最大扫描俯仰角可达 60° 。

表 1 给出了该反射阵列天线在不同波束指向时的辐射特性,结合图 6 可知,当出射波束指向为 $(\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ)$ 时,反射阵列天线最大增益为 32.8 dBi,副瓣电平为 -14.3 dB,由式(2)可知,其口径效率为 54.59%,相较于馈源天线增加了约 5%。

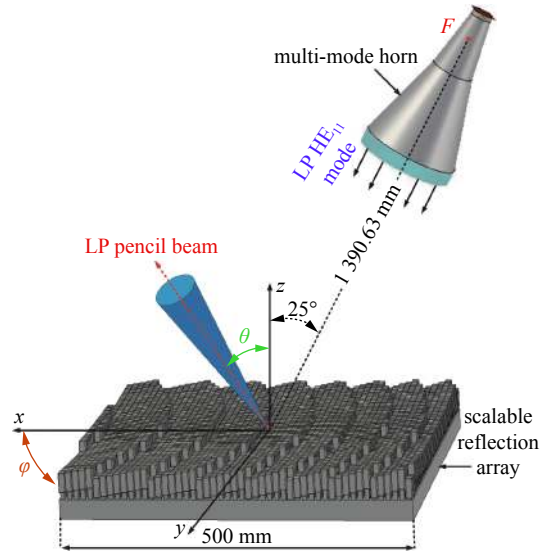


Fig. 5 Structure of the scalable all-metal reflective array

图 5 伸缩式全金属反射阵列结构

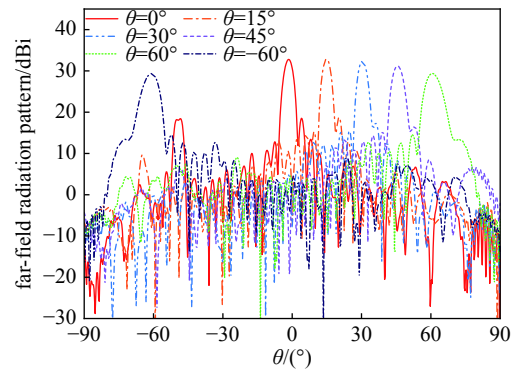


Fig. 6 Two-dimensional far-field radiation pattern during scanning

图 6 阵列扫描过程中的二维远场方向图

表 1 伸缩式全金属反射阵列扫描天线在不同波束指向时的辐射特性
Table 1 Radiation characteristics of the scalable reflective array antenna

status/($^\circ$)	D/dBi	FSLL/dB	$\theta_{HP}/(^\circ)$	$\epsilon_{ap}/\%$
(0,0)	32.8	-14.3	3.7	54.59
(15,0)	32.8	-14.1	3.4	54.59
(30,0)	32.4	-15.1	3.7	49.78
(45,0)	31.2	-14.7	4.5	37.77
(60,0)	29.4	-13.0	6.5	24.95
(45,90)	29.7	-13.3	4.9	26.74
(-60,180)	29.3	-13.0	6.5	24.38

$$\varepsilon_{ap} = D\lambda^2/4\pi A_p \quad (2)$$

式中: A_p 为天线的物理口径; D 为天线的方向性系数。

另外,从图6可以看出,该反射阵列天线在垂直出射时的旁瓣电平出现一个明显的抬高($\theta=-50^\circ$)。经分析可知,阵列天线在垂直出射时,其阵列高度梯度分布与入射波方向垂直,此时的阵列截面如图7所示,反射阵列会在物理反射方向或其反方向附近产生较大的反射,出现遮挡问题,导致天线的旁瓣性能变差。随着波束出射俯仰角 θ 的增大,天线增益逐渐下降,当出射波束指向为($\theta=60^\circ, \varphi=0^\circ$)时,天线增益最低为29.4 dBi。导致这一现象的主要原因是俯仰角增大时,反射阵列天线的阵因子会相应减小,从而使天线增益下降。在这一波束扫描过程中,该反射阵列的旁瓣始终小于-13 dB,增益变化小于3.5 dB,说明上述因素并不会对天线的扫描辐射特性产生较大影响。图8给出了仿真中得到的反射阵列三维远场方向图,展示了天线在方位面上的波束调控能力。结合图6和图8可知,在3 dB增益变化标准下,该伸缩式全金属反射阵列至少具备 90° 锥角范围内的二维波束扫描能力,且在扫描过程中天线的辐射性能稳定,证明了设计的可行性。图9给出了反射阵列天线在垂直出射时($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$)阵列口面的电场分布图,在0.5 W的注入功率下,天线内部的最大电场为966 V/m,按照真空条件下金属表面击穿场强50 MV/m^[16]进行估算,该天线工作在10 GHz时的功率容量约为5.4 GW/m²。

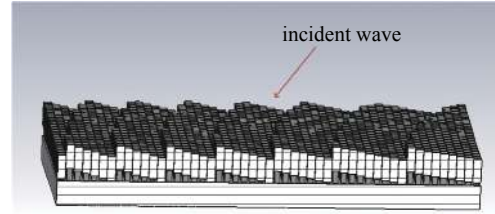


Fig. 7 Sectional view of the array when emits vertically($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$)

图7 阵列天线在垂直出射时($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$)的阵列截面图

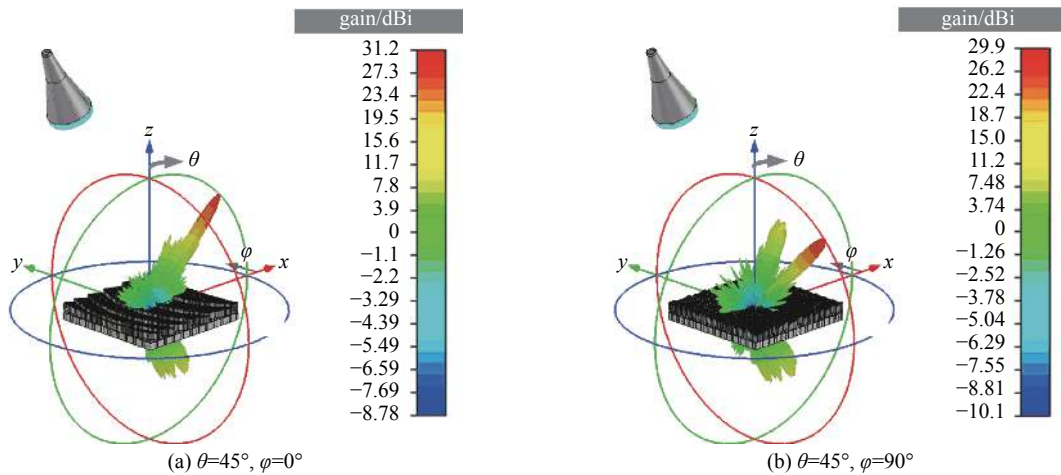


Fig. 8 Three-dimensional radiation pattern of the scalable all-metal reflective array scanning antenna

图8 伸缩式全金属反射阵列扫描天线在方位面扫描时的三维方向图

3 结论

本文提出了一种伸缩式全金属反射单元,并在此基础上设计了一种全金属波束扫描反射阵列天线。以3 dB增益变化为标准,该反射阵列扫描天线至少能够在 90° 锥角范围内对出射波束指向进行调控。扫描过程中,天线最大增益为32.8 dBi,最大口径效率为54.59%,副瓣电平保持在-13 dB以内。此外,在真空工作条件下,天线还具备GW/m²的高功率容量水平,具有高功率微波领域应用的潜力。

参考文献:

- [1] 赵柳, 张健穹, 吴晓降, 等. 4单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1869-1872. (Zhao Liu, Zhang Jianqiong, Wu Xiaojiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial waveguide[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1869-1872)
- [2] 赵柳, 李相强, 刘庆想, 等. 16单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 431-434. (Zhao Liu, Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 16-element radial line helical rectangular array antenna[J]. High Power Laser and Particle

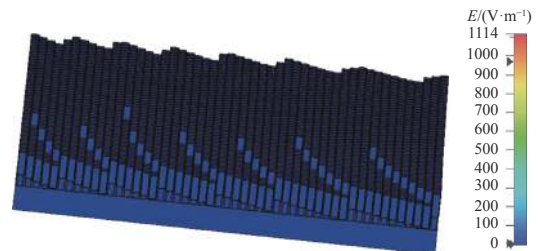


Fig. 9 Electric field distribution of the array at vertical exit

图9 伸缩式全金属反射阵列扫描天线在垂直出射时的阵列口面的电场分布图

- Beams, 2008, 20(3): 431-434)
- [3] 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.
- [4] 张健穹, 刘庆想, 李相强, 等. 三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线的设计与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(4): 550-554. (Zhang Jianqiong, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. Design and experimental research on triangle-grid radial-line helical rectangular array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(4): 550-554)
- [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] Rahmati B, Hassani H R. Low-profile slot transmitarray antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(1): 174-181.
- [7] 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.
- [8] 马嘉雯, 孙云飞, 宛建峰, 等. 高功率谐振式波导缝隙阵宽角扫描技术[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 103002. (Ma Jiawen, Sun Yunfei, Wan Jianfeng, et al. Investigationon of wide-angle scanning technology for high power resonant waveguide slot array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 103002)
- [9] 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.
- [10] 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)
- [11] 李佳伟, 黄文华, 张治强, 等. 基于漏波波导X波段高功率微波天线的实验[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3363-3366. (Li Jiawei, Huang Wenhua, Zhang Zhiqiang, et al. Testing of an X-band HPM antenna based on leaky waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3363-3366)
- [12] Barba M, Carrasco E, Page J E, et al. Electronic controllable reflectarray elements in X band[J]. *Frequenz*, 2007, 61(9/10): 203-206.
- [13] Riel M, Laurin J J. Design of an electronically beam scanning reflectarray using aperture-coupled elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(5): 1260-1266.
- [14] Xu Wangren, Sonkusale S. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103: 031902.
- [15] Hum S V, Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(1): 183-198.
- [16] Dolgashev V, Tantawi S, Higashi Y, et al. Geometric dependence of radio-frequency breakdown in normal conducting accelerating structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97: 171501.
- [17] 张军, 张威, 巨金川, 等. X波段高功率相对论速调管放大器研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 103001. (Zhang Jun, Zhang Wei, Ju Jinchuan, et al. Research of X-band high power triaxial klystron amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 103001)