



·高功率微波技术·

高功率宽频比 C/X 双频反射阵列天线设计*

陈 瑞, 李相强, 张健穹, 王庆峰

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘 要: 为了满足高功率微波系统对宽频比双频辐射天线的研究需求, 提出了一种可工作在 C/X 双频段的高功率圆极化反射阵列天线。天线单元采用介质埋藏的贴片单元形式, 贴片部分由外圈的椭圆环贴片嵌套内圈的椭圆贴片组成, 分别实现低频 (C 波段) 和高频 (X 波段) 的辐射。这种嵌套式的单元形式使得天线可以实现较宽的频比, 同时由于单元采用无突变结构且单元被埋藏在介质中避免了三相点的出现, 从而具有较高的功率容量。高低频段的两种贴片都采用绕轴旋转的方式来调节反射相位, 可以在反射损耗较小的基础上满足 360° 的反射相位调节。基于以上双频辐射单元设计了一个口径尺寸为 400 mm×400 mm 的 20×20 矩形栅格布反阵列天线, 设计结果表明天线在 4.3 GHz 下的增益为 22.2 dBi, 口径效率为 40.2%, 常压空气中的功率容量为 10.4 MW; 在 10.4 GHz 下的增益为 29.9 dBi, 口径效率为 40.5%, 常压空气中的功率容量为 12.2 MW。该天线高低工作频率的频比达到 2.4, 且具有高效率和功率容量的特点。

关键词: 高功率微波; 宽频比; 双频; 反射阵列天线; 椭圆环贴片

中图分类号: TN82

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220420

Design of high power wide frequency ratio C/X dual-band reflectarray antenna

Chen Rui, Li Xiangqiang, Zhang Jianqiong, Wang Qingfeng

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

Abstract: To meet the research demand of high-power microwave system for wide frequency ratio dual-band antenna, this paper proposes a high-power circularly polarized reflectarray antenna that can work in C/X dual-band. The antenna unit adopts the form of substrate buried patch, and the patch part consists of an elliptical ring patch nested with an elliptical patch in the inner to realize the radiation of low frequency (C-band) and high frequency (X-band) respectively. This nested cell form enables the antenna to achieve a wide frequency ratio, at the same time, because the cell has no abrupt structure and it is buried in the substrate to avoid the emergence of triple junction, it has a high power capacity. The two patches of high and low frequency bands rotate around the axis to adjust the reflection phase, which can meet the reflection phase adjustment of 360° on the basis of small reflection loss. Based on the above dual-band radiation unit, design and optimization of a 20×20 rectangular grid reflectarray antenna with an aperture size of 400 mm×400 mm are made. While the antenna works at 4.3 GHz, the gain is 22.2 dBi, the aperture efficiency is 40.2%, and the power capacity is 10.4 MW in air condition. At 10.4 GHz, the antenna has a gain of 29.9 dBi, an aperture efficiency of 40.5%, and a power capacity of 12.2 MW in air condition. the frequency ratio between high and low working frequencies of the antenna reaches 2.4, and it has the characteristics of high efficiency and high power capacity.

Key words: high-power microwave, wide frequency ratio, dual-band, reflectarray antenna, elliptical ring patch

高功率微波天线是高功率微波辐射系统的重要组成部分, 随着高功率微波技术的不断发展, 高功率微波天线也成为了一个重要的研究方向。早期常见的高功率微波天线主要有模式转换器加喇叭天线^[1-2], Vlasov 天线^[3-5]及

* 收稿日期: 2022-12-22; 修订日期: 2023-03-12

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2022YFG0248); 中央高校基本科研业务费资助项目 (2682021GF016)

联系方式: 陈 瑞, crzz2@qq.com。

通信作者: 李相强, xiangqiang_li@163.com。

COBRA 天线^[6]等。近年来,阵列天线逐渐发展了起来,其中代表性的成果有:高功率径向线螺旋阵列天线^[7-9]、高功率径向线缝隙阵列天线^[10],以及高功率漏波波导阵列天线^[11]等。反射阵列天线作为一种结合阵列天线和反射面天线特点的天线形式,因为其避免了复杂的馈电网络和在阵列规模、拓扑结构、共型灵活的优势被引入了高功率领域。代表成果有:三维全金属的加载偶极子反射阵列天线单元^[12]和基于像素化金属图案的超表面反射阵列天线单元^[13],以及高功率全金属双螺旋反射阵列天线^[14]和高功率双频椭圆贴片反射阵列天线^[15]。其中高功率双频椭圆贴片反射阵列天线使用介质埋藏型的椭圆贴片作为两个频率的单元,较好地解决了高功率微波天线领域的频率复用问题。但是因为该天线在两个频段采用形状相同但大小不同的单元进行交错式排布组阵,在使用该单元组阵实现较宽频比的阵列时,存在物理空间上单元的排布困难,所以必须采用较大的单元间距,从而导致阵列栅瓣的产生和口径效率的降低^[16]。而在某些应用场景中,高功率微波天线需要工作在两个频比较宽的频率上,现有的高功率反射阵列天线还无法满足这一需求。基于以上背景,本文在椭圆贴片反射阵列天线单元基础上,设计了一种以介质埋藏型椭圆环嵌套椭圆贴片为单元的可实现宽频比的高功率双频反射阵列天线。首先对双频反射阵列天线的工作原理进行了阐述,然后对椭圆环嵌套椭圆贴片单元进行了设计,最后对设计的双频反射阵列天线进行了数值模拟。

1 工作原理

设计的高功率双频反射阵列天线主要由高功率反射阵列和高功率馈源天线两个部分组成,其示意图如图 1 所示。其中高功率反射阵列由反射阵列天线单元按照矩形栅格的排布方式组合而成。C 波段的高功率馈源喇叭采用与 z 轴负 15° 夹角的方向进行偏馈, X 波段的高功率馈源喇叭采用垂直方向进行正馈,两个频段的主波束方向均为与 z 轴正 15° 夹角的方向。以图中 C 波段反射阵列天线为例,其基本原理为: C 波段高功率馈源喇叭分别沿着不同的路径辐射电磁波到各高功率反射阵列天线单元。由于各单元的空间位置不同,使得各单元到馈源相位中心的波程不同,从而导致不同单元接收到的电磁波的入射相位不同。然后通过单元反射相位响应曲线旋转 C 波段对应的椭圆环贴片,完成对入射电磁波的相位补偿,从而实现高功率双频反射阵列天线在 C 波段预设方向上形成笔形波束辐射。根据射线理论,阵列中第 mn 个单元所需补偿的相位

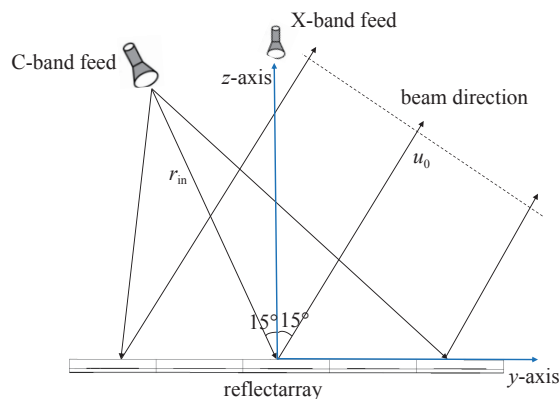


Fig. 1 Diagram of high-power dual-band reflectarray antenna
图 1 高功率双频反射阵列天线示意图

$$\varphi_{mn} = k \times (r_{inmn} - \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{r}_{mn}) + \varphi_0 \quad (1)$$

式中: k 为对应频率的自由空间传播常数, r_{inmn} 为馈源天线相位中心到第 mn 个反射阵列天线单元的空间距离, \mathbf{u}_0 为阵列天线波束指向的单位矢量, \mathbf{r}_{mn} 为第 mn 个反射阵列天线单元的位置矢量, φ_0 为参考相位值。

2 单元设计

根据前文所述,为了设计宽频比双频反射阵列天线单元,依据天线基本理论,设计反射阵列天线单元应该满足以下要求:(1)在两个频比较大的频段上,均具有良好的反射幅度和相位响应,且单元间距可以满足布阵要求;(2)在正入射和斜入射时,不同入射角对应的反射相位响应曲线的趋势基本一致,且单元的调相范围应该满足 360° ;(3)组阵时双频间的干扰应该尽量小,避免因为互耦较大导致阵列无法在两个频段内高效率地辐射。

基于以上反射阵列天线设计的基本要求和综合考虑高功率因素,本文设计了一种介质埋藏型椭圆环嵌套椭圆贴片的反射阵列天线单元,其三维结构分离式示意图如图 2(a)所示。单元的形式为椭圆环嵌套椭圆贴片的基础上在贴片上下分别覆盖一层 Rogers 5880 介质板。首先该单元采用嵌套结构,组阵时高低两个频段之间在物理空间上影响较小,有利于实现宽频比。其次因为该单元不存在突变结构,有利于降低电场,且将贴片埋藏到了介质中,避免了三相点的产生,所以有高功率应用的潜力。该单元的调相方式为通过绕轴旋转椭圆环贴片实现低频 C 波段 4.3 GHz 的调相和通过绕轴旋转椭圆贴片实现高频 X 波段 10.4 GHz 的调相。经过参数优化,单元模型尺寸如图 3 所示,其中单元长度 L 为 20 mm,上层介质厚度 H_1 为 2.05 mm,下层介质厚度 H_2 为 0.76 mm,椭圆环贴片

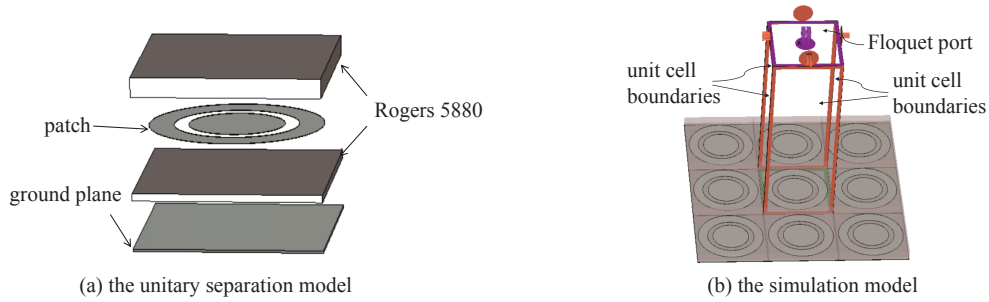


Fig. 2 Diagram of the reflectarray unitary separation model and simulation model

图 2 反射阵列天线单元分离式和仿真模型

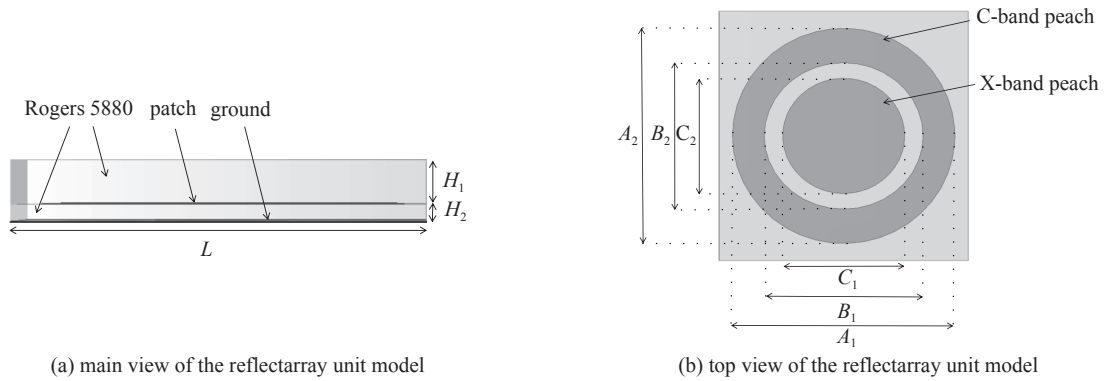


Fig. 3 Reflectarray unit model diagram

图 3 反射阵列天线单元模型图

的外长轴长度 A_1 为 17.9 mm, 外短轴长度 A_2 为 17.26 mm, 内长轴长度 B_1 为 12.76 mm, 内短轴长度 B_2 为 11.74 mm。椭圆贴片的长轴长度 C_1 为 9.80 mm, 短轴长度 C_2 为 9.23 mm。

为了验证所设计的反射阵列天线单元可以辐射圆极化波, 用仿真软件采取元胞边界法 (Unit Cell) 对该单元进行全波仿真, 在单元的周期性方向的边界条件均设置成为 Unit Cell, 在入射波方向设置边界条件为 open (add space), 在入射方向上设置 Floquet 端口作为单元的激励端口, 如图 2(b) 所示。分别用垂直和水平极化平面波对单元进行激励: (1) 输入垂直极化波激励时, 得到的介质内部贴片表面电场分布如图 4 所示。图 4(a) 为 4.3 GHz 下的结果, 可以看到当反射阵列天线单元工作在低频时, 入射波只在椭圆环贴片表面激励出一个垂直方向的 TM_{01} 模式电磁波。图 4(b) 为 10.4 GHz 下的结果, 在反射阵列天线单元工作在高频时, 入射波只在椭圆贴片表面激励出一个垂直方向的 TM_{01} 模式电磁波。(2) 在输入水平极化波激励时, 得到的介质内部贴片表面电场分布如图 5 所示。图 5(a) 为 4.3 GHz 下的结果, 可以看到当反射阵列天线单元工作在低频时, 入射波只在椭圆环贴片表面激励出一个水平方向的 TM_{01} 模式电磁波。图 5(b) 为 10.4 GHz 下的结果, 可以看到在反射阵列天线单元工作在高频时, 入射波只在椭圆贴片表面激励出一个水平方向的 TM_{01} 模式电磁波。通过以上结果可以得出结论, 当单元被低频 4.3 GHz

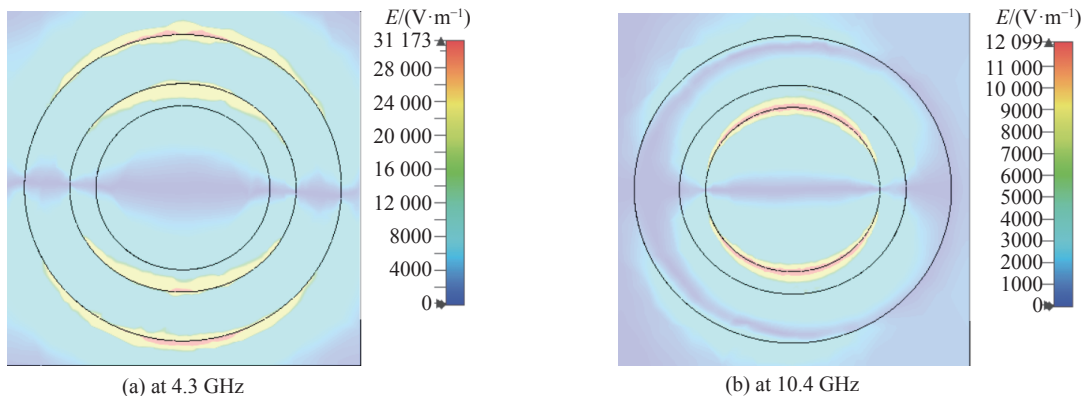


Fig. 4 Reflectarray unit electric field simulation results for vertical polarization incidence

图 4 反射阵列天线单元垂直极化入射时电场仿真结果

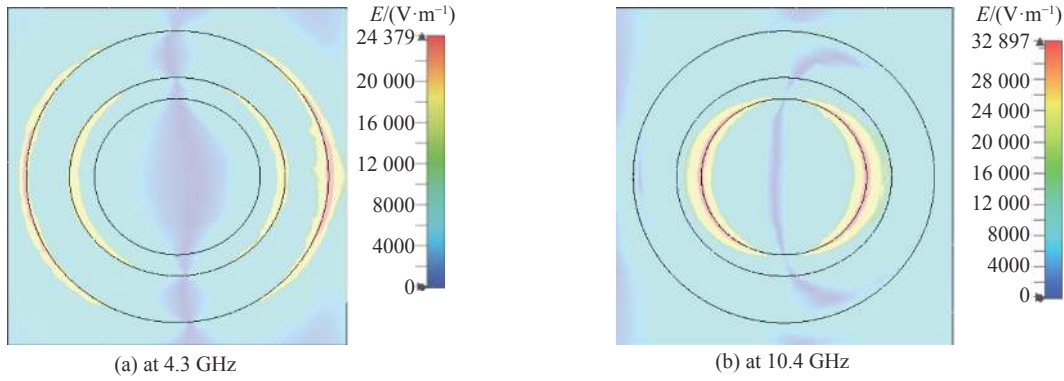


Fig. 5 Reflectarray unit electric field simulation results for horizontal polarization incidence

图 5 反射阵列天线单元水平极化入射时电场仿真结果

入射波照射时,只有椭圆环贴片表面被激励起 TM_{01} 模式电磁波。当单元被高频 10.4 GHz 入射波照射时,只有椭圆贴片表面被激励 TM_{01} 模式电磁波。

又因为椭圆环贴片在垂直和水平两个方向上的有效长度不同,所以可以通过合理的设计椭圆环的内外长短轴的长度,实现垂直和水平两个正交的 TM_{01} 模式电磁波产生 90° 的相位差,从而实现椭圆环在低频 4.3 GHz 辐射圆极化波。同理,对于椭圆贴片也可以合理的设计其长短轴的长度,实现垂直和水平两个正交的 TM_{01} 模式产生 90° 的相位差,从而实现椭圆贴片在高频 10.4 GHz 辐射圆极化波。

基于同样的方法,对该单元激励左旋圆极化平面波来进行全波仿真。通过在入射角度 θ 为 0° 和 20° 时从 0° 到 180° 旋转对应的贴片,两个频率下单元的反射幅度响应曲线如图 6(a) 所示,反射相位响应曲线如图 6(b) 所示。可以得出在低频 4.3 GHz,除在 20° 入射时个别旋转角度外,其他情况下反射幅度响应均大于 -0.6 dB。而且在不同入射角度 θ 入射时低频反射相位响应曲线基本一致,且均满足 360° 的相位补偿;同样得出在高频 10.4 GHz,除在 0° 入射时部分旋转角度外,其他情况下反射幅度响应均大于 -0.9 dB。而且在不同入射角度 θ 入射时高频反射相位响应曲线基本一致,且均满足 360° 的相位补偿。从以上结果可以得出,所设计的高功率双频反射阵列天线单元,在单元频比以及单元反射相位和反射幅度响应上均满足高功率宽频比双频反射阵列天线单元的基本要求。

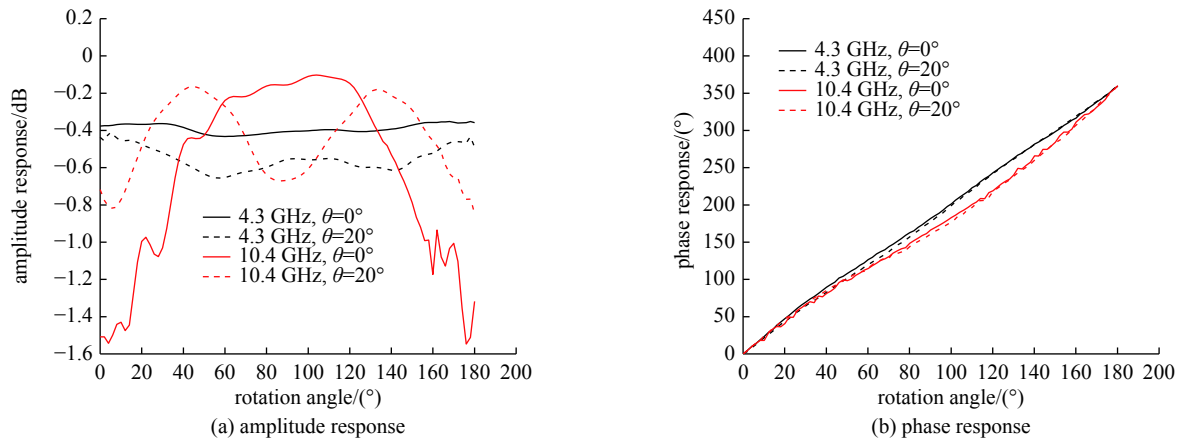


Fig. 6 Simulated phase response and amplitude response of reflectarray unit

图 6 反射阵列天线单元的反射相位响应和幅度响应

3 阵列天线性能分析

为了验证所设计双频单元天线的性能,按照图 1 所示设计了一个口面尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的反射阵列天线。所设计阵列的单元间距为 20 mm (约等于 0.29 个低频波长和 0.69 个高频波长),单元按照 20×20 的矩形栅格排布共计 400 个单元。阵列在两个频率均采用辐射左旋圆极化波的圆锥喇叭天线作为馈源,并以边缘照射电平均采用 -8 dB 为原则设定馈源喇叭天线高度。为了减少馈源天线的遮挡,因为低频 4.3 GHz 的馈源相对较大,故低频采用馈源喇叭在 yOz 面上与 z 轴 -15° 夹角的方向进行偏馈。而高频 10.4 GHz 的馈源相对较小,故高频馈源喇叭采用正馈。将两个频率的主波束方向均设定在 yOz 面与 z 轴夹角 $+15^\circ$ 的方向上,用来平衡溢出效率和口径效率。

首先根据公式(1)计算得到阵列在 4.3 GHz 和 10.4 GHz 两个频率下阵列口面上各单元分别所需的相位补偿

量,其次按照图 6(b)所示两个频率下的反射相位响应曲线得出不同频率下每个贴片所需旋转的角度,进行组阵。对阵列进行全波仿真,所得的两个频段的方向图如图 7(a)所示,轴比如图 7(b)所示。低频段中心频点 4.3 GHz 的增益为 22.2 dBi,轴比为 0.86 dB,口径效率为 40.2%,1 dB 增益带宽为 4.27~4.34 GHz(相对带宽为 1.6%),且在 1 dB 增益带宽内轴比均小于 3 dB。高频段中心频点 10.4 GHz 的增益为 29.9 dBi,轴比为 2 dB,口径效率为 40.5%,1 dB 增益带宽为 9.92~10.45 GHz(相对带宽为 5.2%),且在 1 dB 增益带宽内轴比均小于 3 dB。

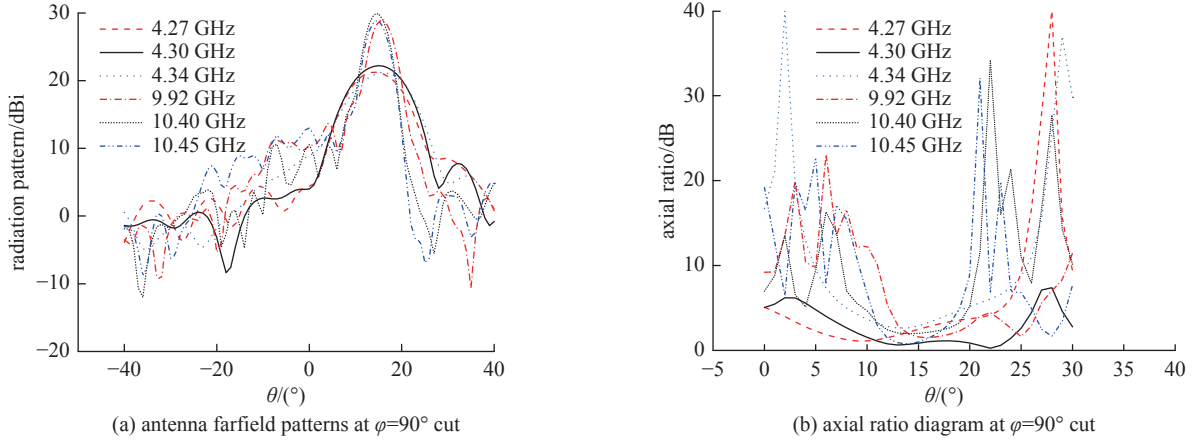


Fig. 7 Antenna farfield patterns and axial ratio diagram of high-power dual-band reflectarray antenna

图 7 高功率双频反射阵列天线 $\varphi=90^\circ$ 面的远场方向图和轴比图

进一步地,为了证明所设计的高功率双频反射阵列天线具有较低的互耦,仿真得出了阵列在不考虑高频单元的耦合(即所有高频椭圆贴片单元的转角相同)时低频 4.3 GHz 的方向图,以及阵列在不考虑低频单元的耦合(即所有低频椭圆环贴片单元的转角相同)时高频 10.4 GHz 的方向图。将其与正常考虑互耦情况下(即低频椭圆环贴片单元与高频椭圆贴片单元都旋转)两个频段的方向图进行对比。其对比结果如图 8 所示,可以得出两个频段下考虑互耦与不考虑互耦的方向图基本一致。且在低频 4.3 GHz,正常情况下考虑互耦的增益仅比不考虑互耦的增益低 0.01 dB。在高频 10.4 GHz,正常情况下考虑互耦的增益仅比不考虑互耦的增益低 0.2 dB。通过以上分析可以得出结论,所设计的高功率双频反射阵列天线具有低互耦性能,且在频比为 2.4 的两个频段内均实现了高效率的辐射。

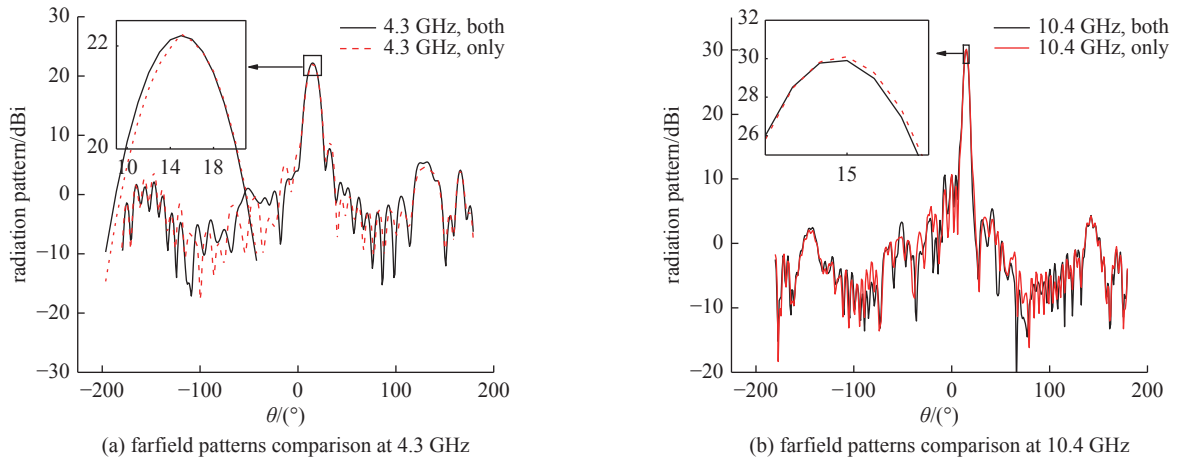


Fig. 8 Comparison between rotating single-band unit only and normal farfield patterns at $\varphi=90^\circ$ cut

图 8 仅旋转单频段单元和正常情况下 $\varphi=90^\circ$ 面方向图对比

为了验证高功率双频反射阵列天线的功率容量,以输入功率为 0.5 W 对该天线进行全波仿真。介质内部贴片电场结果如图 9 所示:4.3 GHz 时介质内部贴片最大场强为 6556 V/m,按照介质的击穿阈值为 40 MV/m^[17] 计算得出 4.3 GHz 时介质内部贴片的功率容量为 18.6 MW。10.4 GHz 时介质内部贴片最大场强为 5716 V/m,按照同样的击穿阈值计算得出 10.4 GHz 时介质内部贴片的功率容量为 24.5 MW。反射阵列表面电场结果如图 10 所示:4.3 GHz 时反射阵列表面最大场强为 656 V/m,按照在常压空气中击穿阈值为 3 MV/m 计算得出 4.3 GHz 时反射阵列表面在常压空气中功率容量为 10.4 MW。在 10.4 GHz 反射阵列表面最大场强为 606 V/m,按照同样的击穿阈值计算得出 10.4 GHz

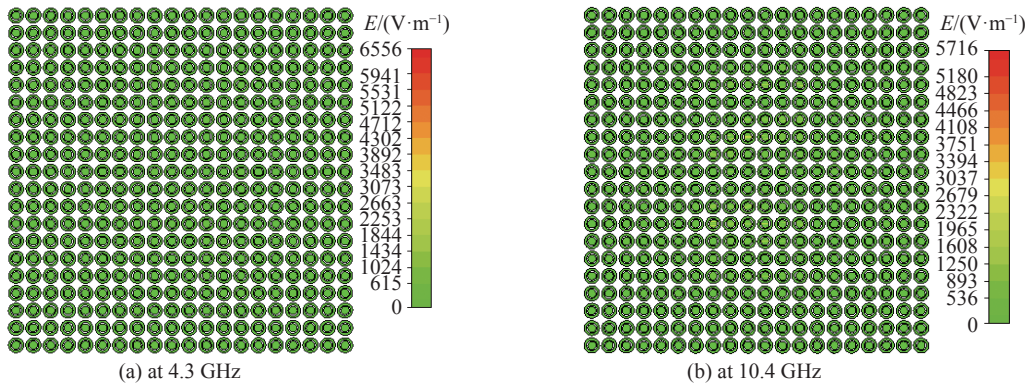


Fig. 9 Electric field simulation results of the patch

图9 贴片的电场仿真结果

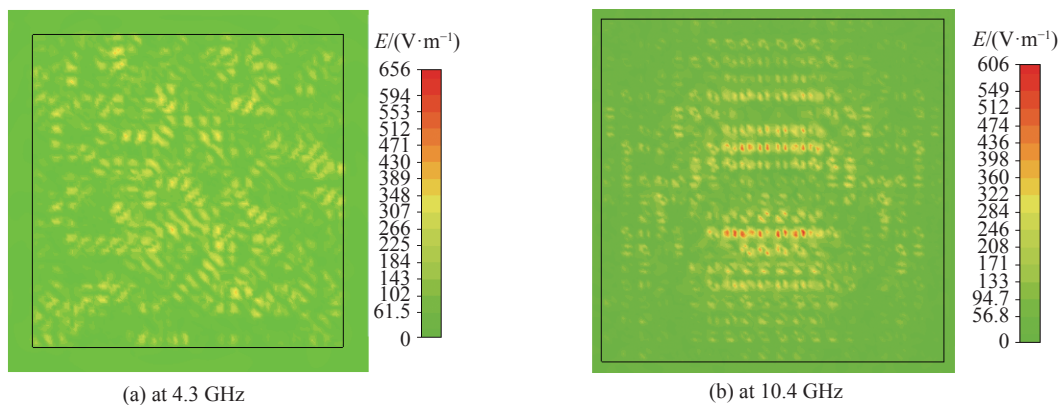


Fig. 10 Electric field simulation results of reflectarray surface

图10 反射阵列表面的电场仿真结果

时反射阵列表面在常压空气中的功率容量为 12.2 MW。

综上所述,所设计的高功率双频反射阵列天线在常压空气中 4.3 GHz 时的功率容量为 10.4 MW, 10.4 GHz 时的功率容量为 12.2 MW。

4 结论

本文设计并研究了一种新型的宽频比双频介质埋藏型高功率反射阵列天线,通过采用嵌套式单元结构实现了高功率双频反射阵列天线的宽频比,满足了高功率微波天线领域对宽频比双频天线的应用需求。与已有的高功率双频反射阵列天线相比,该天线阵列不同频率单元之间的限制更小,使得天线可以实现更高的频比;此外相比于已有的宽频比反射阵列天线,该天线的单元不存在突变结构,且将单元贴片埋藏在介质中,避免了三相点的出现,具有更高的功率容量。本文提出的高功率宽频比双频反射阵列天线,为双频高功率辐射天线的研究与应用提供了一种途径。

参考文献:

- [1] Lee B M, Lee W S, Yoon Y J, et al. X-band TM_{01} - TE_{11} mode converter with short length for high power[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(18): 1126-1127.
- [2] Thomas B, James G, Greene K. Design of wide-band corrugated conical horns for Cassegrain antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(6): 750-757.
- [3] Vlasov S N, Orlova I M. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1974, 17(1): 115-119.
- [4] 袁成卫, 凌根深. Vlasov辐射器反射特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(2): 172-175. (Yuan Chengwei, Ling Genshen. Reflective characteristics of bevel-cut Vlasov radiator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2): 172-175)
- [5] El Misilmani H, Al-Husseini M, Kabalan K Y, et al. Optimized reflector position for Vlasov antennas[C]//*Electromagnetics Research Symposium Proceedings*. 2013.
- [6] Courtney C C, Baum C E. The coaxial beam-rotating antenna (COBRA): theory of operation and measured performance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(2): 299-309.

- [7] 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.
- [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] 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. Experiment research of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 265-268)
- [10] Yuan Chengwei, Peng Shengren, Shu Ting, et al. Designs and experiments of a novel radial line slot antenna for high-power microwave application[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(10): 4940-4946.
- [11] 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.
- [12] Campbell S D, Mackertich-Sengerdy G, Binion J D, et al. Metamaterial-enabled reflectarray antennas for high-power microwave applications[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. 2020: 651-652.
- [13] Gregory M D, Bossard J A, Morgan Z C P O, et al. Metamaterials for high power reflectarray design[C]//Proceedings of 2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES). 2016: 1-2.
- [14] 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 wideband dual-helical reflectarray antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 093001)
- [15] 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.
- [16] Deng Ruyuan, Xu Shenheng, Yang Fan, et al. Single-layer dual-band reflectarray antennas with wide frequency ratios and high aperture efficiencies using phoenix elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 612-622.
- [17] 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.