



·高功率微波技术·

## C/Ku 波段共口径宽角度扫描相控阵天线\*

邓 洲, 钟选明, 程友峰, 廖 成

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

**摘 要:** 设计了一款具有高功率容量与宽角度扫描特性的 C/Ku 双频段共口径平面相控阵天线。在同一辐射口径内, 相控阵天线包含有基于平面偶极子单元的 C 波段  $4 \times 4$  阵列, 以及基于混合零阶谐振贴片单元的 Ku 波段  $8 \times 9$  阵列。所设计的相控阵天线的宽角度扫描性能归功于双频段阵元天线的宽波束辐射特性。下层混合零阶谐振贴片天线既能作为 Ku 波段的宽波束辐射单元, 又能够为 C 波段的偶极子天线提供零反射相位, 进而基于镜像原理拓宽偶极子天线的波束宽度。并且, 对天线进行了介质埋入式设计, 避免了空气击穿以提高天线系统功率容量。全波仿真结果表明, 所提出的共口径相控阵天线在 C 和 Ku 双频段均实现了  $\pm 45^\circ$  的波束扫描, 增益波动小于 3 dB, 天线阵列在各单元输入功率之和为 1 W 时功率容量达 18.9 MW。

**关键词:** 共口径天线; 宽角扫描; 高功率相控阵天线; 双频段; 平面天线

中图分类号: TN821+.8

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210453

## C/Ku band shared-aperture wide-angle scanning phased array antenna

Deng Zhou, Zhong Xuanming, Cheng Youfeng, Liao Cheng

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

**Abstract:** In this paper, a shared-aperture planar phased array antenna operated at C and Ku band with wide-angle scan and high-power capacity is designed. The proposed phased array contains a printed dipole element-based  $4 \times 4$  C-band array and a Ku-band array composed of  $9 \times 8$  hybrid zeroth-order resonance patch elements. The wide-angle scanning performance of the designed phased array attributes the success to the wide-beam radiation of the dual-band elements. The bottom zeroth-order resonance patch element can not only be used as the Ku-band wide-beam radiation element, but also supplies the zero-phased reflection for the C-band printed dipoles which generate the wide-beam patterns based on the image theory. Furthermore, the antenna is designed with all metals buried by substrates to avoid air breakdown, and thus to improve the power capacity of the phased array. Full-wave simulation results show that the designed array can obtain a  $\pm 45^\circ$  beam scan with its gain fluctuation less than 3 dB in both C and Ku bands, and the power capacity of the array reaches 18.9 MW when the total input power is 1 W.

**Key words:** shared-aperture antenna, wide-angle scanning, high-power phased array antenna, dual-band, planar antenna

近年来, 随着无线通信技术的迅猛发展, 天线作为接受和辐射电磁波的设备, 得到了越来越多学者的关注。对于飞机、卫星、雷达等系统而言, 天线的尺寸、形状等都受到极大制约, 如何将多种天线集成到同一口径内, 且有效避免天线之间的电磁耦合, 成为亟待解决的重要问题, 也因此产生了共口径天线<sup>[1]</sup>。国内外关于共口径天线的研究主要分为三种类型: 采用单层结构, 在低频单元上开缝或者在低频单元周围放置高频单元, 这类共口径天线剖面高度较低, 有利于空间复用<sup>[2-3]</sup>; 采用多层结构, 将不同类型的天线分层放置, 便于将馈电网络隔开以增加隔离度, 但需要保证不同层的结构对相互的辐射性能影响最小化<sup>[4-6]</sup>; 采用波束形成网络、超材料等其它方法将两种不同类型的天线集成到同一结构中, 达到多频段工作的效果<sup>[7-8]</sup>。

在卫星通信、雷达系统、军事武器等领域, 相控阵天线有着不可替代的作用。相比于传统天线, 相控阵天线能

\* 收稿日期: 2021-10-26; 修订日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61901398, 61801405, 61731005); 四川省科技厅项目(2021YJ0361); 西南交通大学科技建设专项(XJ2021KJZK008)

联系方式: 邓 洲, dengzhouwjtu@163.com。

通信作者: 钟选明, xm\_zhong@163.com。

调整各个阵元的馈电幅度和相位,实现低副瓣电平、波束赋形等功能,满足不同系统的特殊需要<sup>[9]</sup>。广阔的应用前景下,相控阵天线的发展也存在一些亟待攻克的技术难题,诸如宽角度扫描相控阵天线与共口径相控阵天线。宽角度扫描相控阵天线需要摆脱阵元间的耦合效应以及单元方向图的限制,有效扩宽波束覆盖范围。而共口径相控阵天线能在同一口径内集成多种不同用途的天线,提高空间的利用率,但需要采用合理的设计避免阵元间的强耦合。如果将两者结合起来,则可以利用前者的宽角度扫描特性与后者的多频段工作性能,实现相控阵天线在多频段下(尤其是频段跨度较大情况下)的宽角度扫描,综合提升相控阵天线的反射与辐射性能。为此,本文设计了一款C/Ku波段的共口径高功率平面宽角度扫描相控阵天线,基于共口径设计实现了双频段工作,而基于宽波束单元设计实现了宽角度扫描。具体地,高频段天线单元能够利用混合零阶模式实现宽波束辐射,并且能够作为低频段天线的反射地板,在降低整体剖面的同时为低频段天线提供零反射相位,进而基于镜像原理拓展低频段天线的波束宽度<sup>[10]</sup>。同时,对天线金属部分采用介质埋入式处理以提升系统功率容量<sup>[11]</sup>。最终通过对天线阵列的合理排布,实现了 $\pm 45^\circ$ 的波束扫描效果,并且天线整体剖面高度仅 $0.13\lambda_{\text{high}}$ ( $\lambda_{\text{high}}$ 为高频段天线工作频率所对应的自由空间波长),功率容量达18.9 MW。

## 1 天线单元设计

### 1.1 Ku波段天线单元设计

Ku波段天线单元采用宽波束的混合零阶谐振的贴片天线<sup>[12]</sup>,其结构如图1所示,其中 $W_s$ 、 $W_h$ 、 $W_p$ 和 $W_k$ 分别为介质基板、贴片天线以及周围环的尺寸, $R$ 和 $r$ 分别为馈电圆和接地金属柱的半径, $h$ 和 $H$ 分别为上层和下层介质基板的厚度。天线采用Rogers5880作为介质基板的材料,在基板的顶部印刷有一个矩形贴片,底部为金属接地面,矩形贴片的中心与接地面由一个金属通孔连接,天线单元呈蘑菇状。为了提升系统功率容量,在天线上方增加介质埋藏层,避免天线金属部分与空气直接接触。同轴线由接地面连接至圆形贴片的中心,圆形贴片与矩形贴片中间存在一个间隙,以引入分布电容抵消馈电探针所产生的电感。贴片天线在后续设计中需要充当平面偶极子的反射地板,由于上层偶极子的排布受到馈电位置的限制,并且单元间距需要满足相控阵天线不出现栅瓣的约束条件,为此在贴片天线周围加载了环形金属贴片以调整其零反射相位对应的频率。

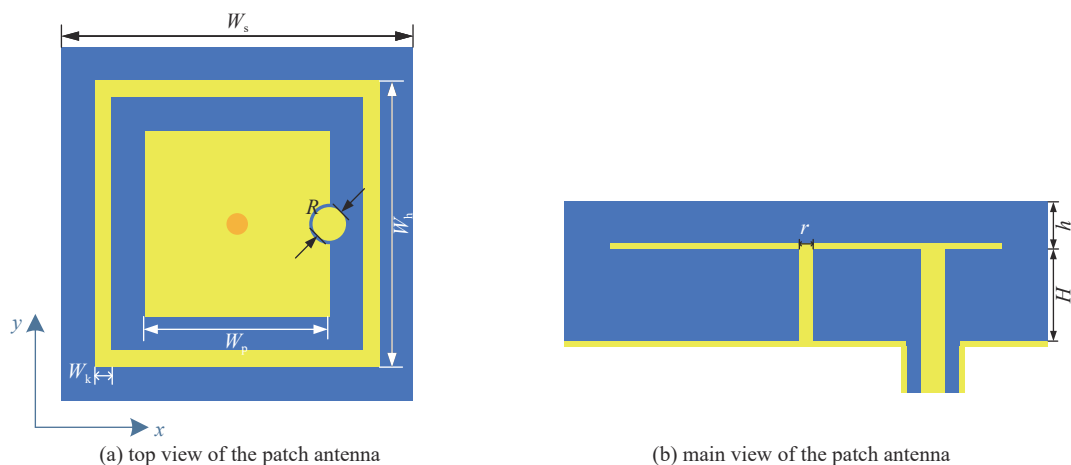


Fig. 1 Schematic diagram of patch antenna

图1 贴片天线结构示意图

传统的贴片天线工作在 $TM_{10}$ 模式下,该模式下天线的辐射方向图指向侧射方向。当矩形贴片中心与接地面由一个金属通孔连接时,这样的蘑菇形结构可以激发出零阶谐振模式,该模式下天线的辐射方向图是心形的,类似于单极子天线的远场方向图。当零阶谐振模式与 $TM_{10}$ 模式同时激发时,天线单元的方向图叠加,其波束宽度将会展宽,这有利于增加由该单元组成的相控阵天线的波束扫描范围<sup>[13]</sup>。

经过优化,混合零阶谐振的贴片天线的回波损耗和辐射方向图如图2和图3所示。从图中可以看出,在11.7~12.7 GHz的频带范围内天线单元的回波损耗小于-10 dB,单元的增益能达到6.47 dBi,在 $yoz$ 平面的3 dB波束宽度能达到 $95.8^\circ$ ,具有良好的阻抗匹配性能和较宽的波束宽度。

### 1.2 C波段天线单元设计

C波段天线单元采用加载人工磁导体结构的平面偶极子天线,由于人工磁导体具有特殊的电磁特性,对电磁

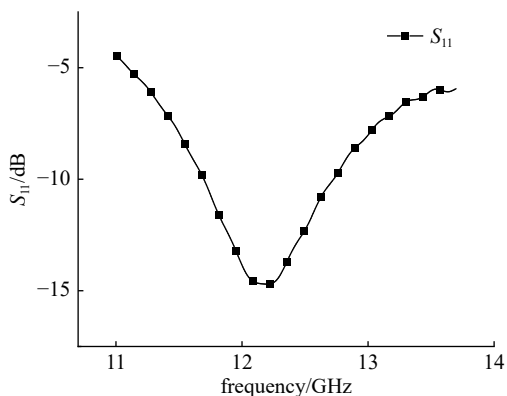


Fig. 2 S-parameter of the patch antenna  
图 2 贴片天线回波损耗  $S_{11}$

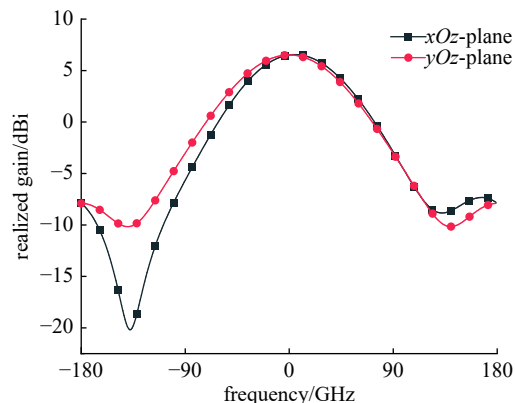


Fig. 3 Radiation pattern of the patch antenna  
图 3 贴片天线辐射方向图

波的反射相位可随频率发生改变, 根据此特性可用人工磁导体结构替代传统的金属表面反射器以降低平面偶极子的剖面高度<sup>[14-15]</sup>。为了方便馈电并提高单元间的隔离度, 将偶极子与混合零阶谐振的贴片天线错开排布, 其结构如图 4 所示, 其中  $W_d$  为偶极子的宽度,  $L$  为偶极子的长度,  $G$  为偶极子两臂之间的间隙。根据镜像原理, 人工磁导体结构衬底的偶极子天线可以等效为同相二元阵, 其阵因子具有宽波束特性, 可展宽偶极子天线的波束宽度<sup>[10]</sup>。并且, 上述工作在 Ku 波段的混合模式贴片天线组阵后可实现人工磁导体的性能, 详细原因可见后文。

采用 Floquet 法求解周期结构的反射相位与频率的关系, 本文提出的混合零阶谐振的贴片天线的反射相位图如图 5 所示。从图中可以看出, 加载了环形金属片后, 贴片天线在 C 波段 6.4 GHz 出现了零反射相位点。显然, 混合零阶谐振的贴片天线和人工磁导体结构有相似的性能, 并且贴片天线底部是连续的金属地板, 能将入射的电磁波全部反射, 故其反射系数约等于 1, 因此可以作为偶极子天线的反射地板。综上, 本文的阵元天线是 C/Ku 波段的低剖面共口径天线, 其中混合模式贴片既可以作为 Ku 波段的辐射阵元, 又可以作为 C 波段偶极子天线的零反射相位地板, 用以扩宽偶极子  $yoz$  平面的波束宽度。需要说明的是, 偶极子天线的放置方式保证了双频段的天线在  $yoz$  平面具有相同的电场极化。在仿真过程中发现, 偶极子与下层反射地板相距不能过远(约大于 0.03), 否则将激起表面波, 影响偶极子的辐射性能。经过优化, 偶极子天线的回波损耗和辐射方向图如图 6 和图 7 所示, 从图中可以看出, 在 5.5~6.2 GHz 的频带范围内天线单元的回波损耗小于 -10 dB, 天线的谐振频率与所设计零反射相位的频率差是由天线与反射地板之间的空间相位导致的。单元的增益能达到 4.53 dBi, 在  $yoz$  平面的 3 dB 波束宽度能达到 89.6°, 具有良好的阻抗匹配性能和较宽的波束宽度。

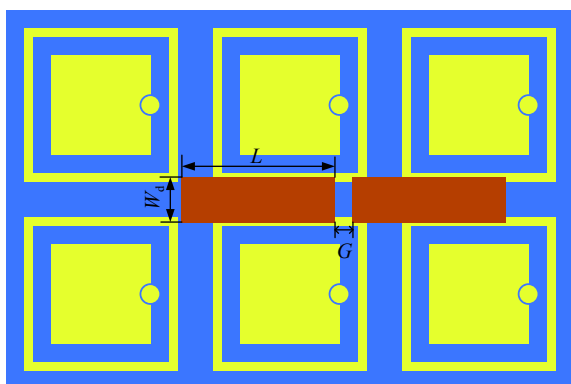


Fig. 4 Top view of planar dipole antenna  
图 4 平面偶极子天线俯视图

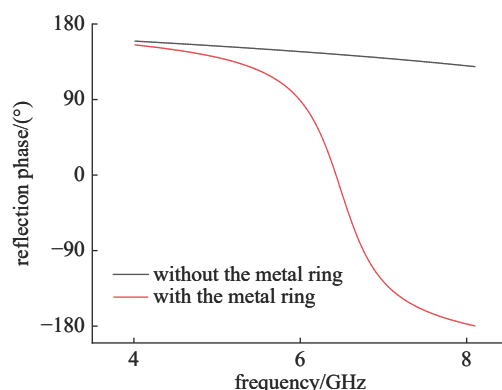


Fig. 5 Reflection phase diagram of the patch antenna  
图 5 贴片天线反射相位图

## 2 共口径相控阵设计和分析

### 2.1 共口径相控阵的结构设计

共口径天线阵列的结构如图 8 所示, 天线金属部分采用介质埋藏处理, 为了更清晰地展现天线结构, 示意图隐藏了偶极子与贴片天线之间填充的介质以及埋藏偶极子的介质。从图中可以看出 Ku 波段相控阵天线由 8×9 个单元组成, C 波段阵列天线由 4×4 个单元组成。天线阵列共有三层介质基板, 均采用 Rogers5880 材料。Ku 波段的贴

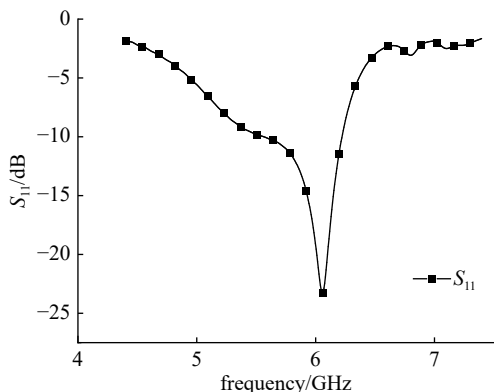


Fig. 6 S-parameter of the planar dipole antenna

图 6 平面偶极子天线回波损耗  $S_{11}$

片印刷在最下层介质基板上, C波段的平面偶极子印刷在中间介质基板上, 最上层介质基板的作用是为了避免金属贴片与空气接触面上的强电场引起空气击穿。贴片天线作为平面偶极子的反射板, 简化了阵列结构, 且两者相距的高度仅 0.508 mm, 有效降低了天线的整体剖面。

对于相控阵天线的设计, 需要考虑合理排布单元以避免出现栅瓣, 相控阵天线不出现栅瓣的最大单元间距  $d_{\max}$  为

$$d_{\max} < \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_0|} \quad (1)$$

为实现  $\pm 45^\circ$  的电扫描角度, 分别取两个频段对应的最高频率 6.2 GHz 与 12.7 GHz, 根据公式(1)可求得 C 波段单元间距应小于 28.3 mm, Ku 波段单元间距应小于 13.8 mm。在尽量增大间距以降低阵元间的耦合的前提下, 对 C/Ku 波段天线单元之间的间距进行了适当优化, 最终选取的各尺寸参数如表 1 所示。

表 1 优化参数值  
Table 1 Optimized parameter values

$W_s$	$W_h$	$W_p$	$W_k$	$W_d$	$R$	$r$	$H$	$L$	$G$	$h$
10.5	8.5	5.5	0.5	2.5	0.5	0.3	2	8.5	1	1.08

## 2.2 仿真结果分析

首先分析所设计的共口径相控阵天线的反射性能, 主要考察阵列天线的有源反射系数。一方面, 阵列天线中天线的耦合主要来自临近单元, 因此位于阵列中间位置的天线单元的阻抗匹配带宽可近似看作阵列的带宽。此处选取了位于阵列中间的单元, 在波束扫描情况下其有源反射系数如图 9 所示。由于阵列结构具有对称性, 从图中的结果可以推断出在  $\pm 45^\circ$  的扫描范围内, C 波段阵列的中心单元有源反射系数在 5.44~5.98 GHz 的频带范围内低于 -6 dB (对应有源驻波比小于 3), Ku 波段在各扫描角度下的有源反射系数在 11.87~12.7 GHz 的频带范围内均低于 -6 dB, C/Ku 波段的 -6 dB 阻抗匹配带宽分别为 9.5% 和 6.8%。另外, 在工作频段内的低有源反射系数保证了所提出的共口径相控阵天线在双频段  $\pm 45^\circ$  扫描范围内均不会出现扫描盲点。

另一方面, 共口径阵列天线在同一口径内排布, 结构紧凑, 因此需要通过合理排布天线结构来增加双频段阵列的单元间的隔离度。不失一般性, 这里选取了耦合最严重, 即距离相隔最近的两个天线单元作为考察对象, 其传输系数的仿真结果如图 10 所示。从图中可以看出, 在工作带宽内, C 波段这两个单元间隔高于 11 dB, Ku 波段隔离度高于 15 dB。

然后, 对双频段相控阵天线的辐射性能进行仿真与分析。C 波段人工磁导体结构衬底的偶极子阵列与 Ku 波段混合零阶模式贴片阵列的波束扫描结果如图 11 所示, 从图中可以看出, 双频段的相控阵天线在  $yoz$  平面均能实现  $\pm 45^\circ$  范围内的扫描。具体地, Ku 波段阵列的最大增益为 21.9 dBi, 最大副瓣电平低于 9.5 dB, 增益波动小于 3 dB;

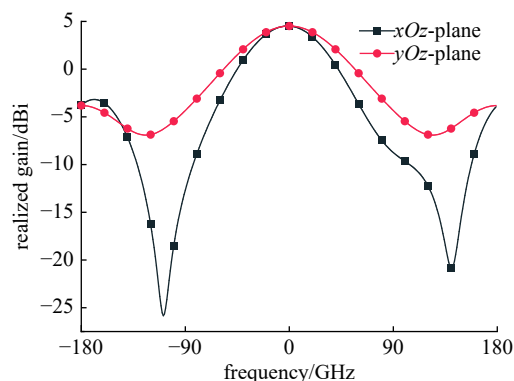


Fig. 7 Radiation pattern of the planar dipole antenna

图 7 平面偶极子天线辐射方向图

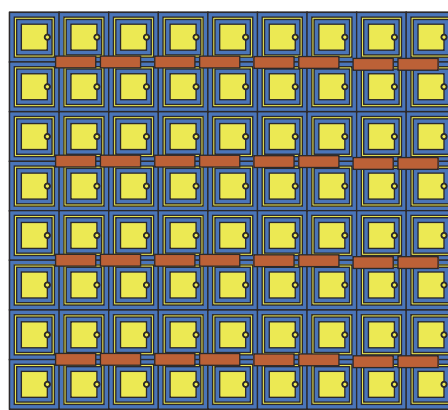


Fig. 8 Top view of the shared-aperture antenna

图 8 共口径天线阵列俯视图

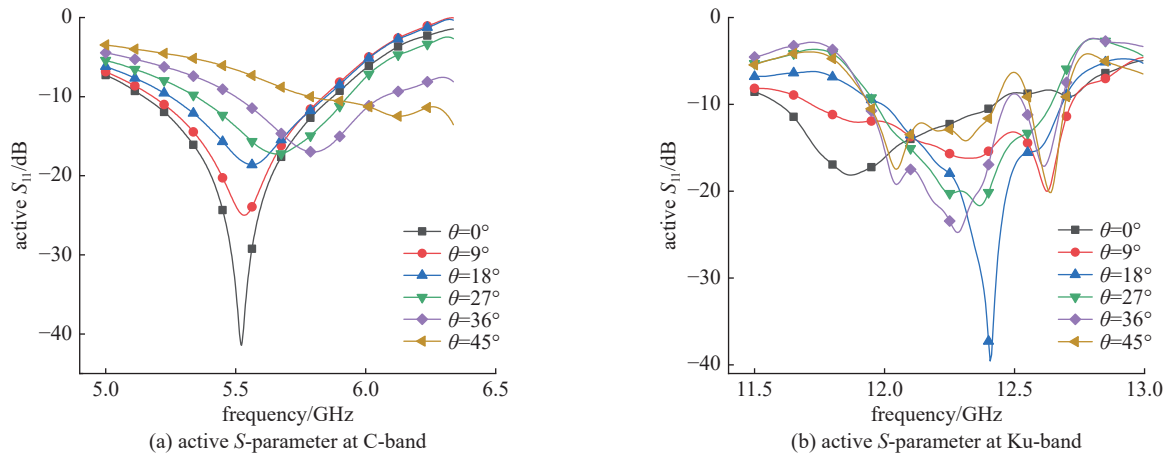


Fig. 9 Active s-parameter  
图 9 有源反射系数

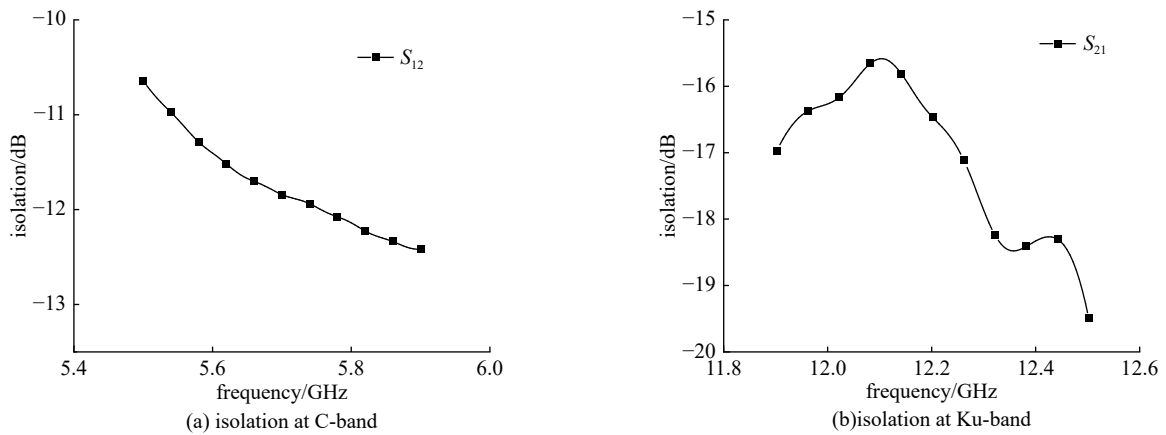


Fig. 10 Isolation between C and Ku bands  
图 10 C/Ku 波段隔离度

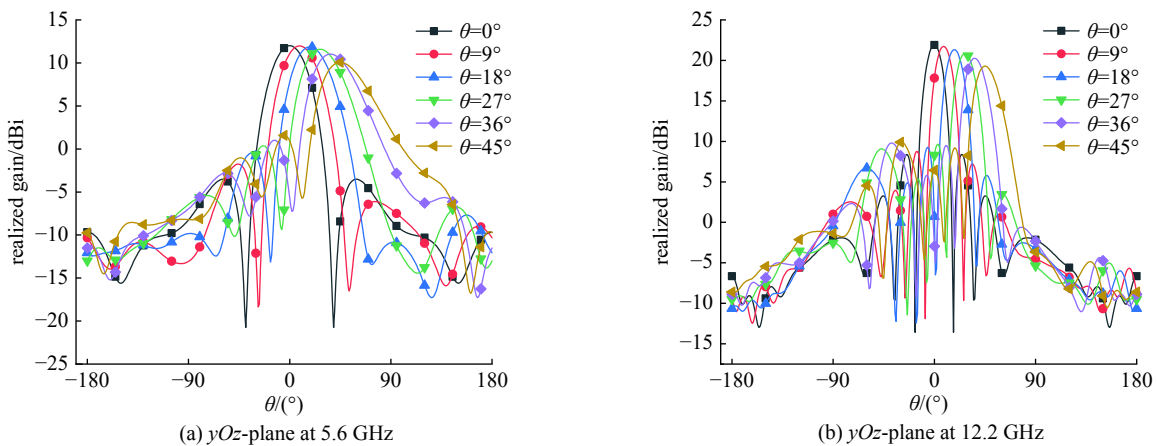


Fig. 11 *yoz*-plane radiation patterns  
图 11 相控阵天线 *yoz* 平面辐射方向图

在 C 波段，相控阵天线最大增益为 12.1 dBi，最大副瓣电平低于 8.5 dB，增益波动小于 2 dB，扫描过程中增益稳定不存在扫描盲点。对比双频段的阵列扫描性能，由于 Ku 波段频率更高，在同一口径内阵元数量更多，因而波束宽度更窄，方向性更好；而 C 波段由于波长更长，在同一口径内阵元数量相对较少，阵因子的半功率波束宽度更宽，因而能覆盖更大的扫描范围。

### 2.3 功率容量分析

最后，分析所设计的相控阵天线的功率处理能力。辐射天线系统的功率容量是指天线在不发生击穿的情况下

所能承受的最大功率<sup>[16]</sup>,其功率容量 $P_C$ 可以定义为击穿场强 $E_d$ 与系统内部场强最大值 $E_{max}$ 的关系

$$P_C = \frac{(E_d)^2}{(E_{max})^2} \quad (2)$$

因此,提升天线系统功率容量最直接的方法是提升系统击穿场强,具体实现手段包括对天线进行介质埋藏处理或填充惰性气体。为了提升所设计的共口径相控阵天线的功率容量,本文对天线的金属部分采用了介质埋藏处理。对于介质埋藏式的天线系统,需要考虑外侧表面空气击穿和介质内部击穿,系统功率容量为各位置最低功率容量<sup>[17]</sup>。由于最强电场出现在金属贴片与空气的接触面上,介质埋藏能够有效避免金属贴片与空气接触,进而阻止了强电场引起的空气击穿,在介质埋藏处理后,通过比较介质表面的空气击穿和介质内部击穿情况可以得出系统的功率容量。

当天线系统的总输入功率为1 W时,由于低频阵列的场强更大,为了得到系统的最大功率容量,选择了低频阵列的场强进行计算,其与空气接触的介质外侧表面的场强分布如图12所示,天线系统内部场强分布如图13所示。从图中可以看出,介质外侧表面最大场强为690 V/m,天线系统内部最大场强为6692 V/m,而空气的击穿阈值为3 MV/m,介质的击穿阈值为40 MV/m,由公式(2)计算可得介质层外表面的功率容量最低为18.9 MW,其功率容量即为共口径天线系统的功率容量。对于未进行介质填充的阵列天线,其系统内最大场强约为10524 V/m,由公式(2)可求得未填充介质的天线阵列功率仅为81260 W。显然,经介质埋藏处理后,天线系统的功率容量有了明显提高。

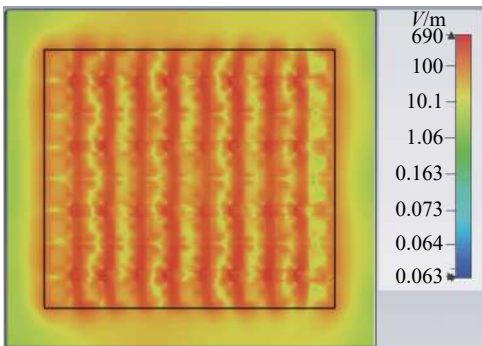


Fig. 12 Electric field distribution in the surface of the medium

图 12 介质表面电场强度分布

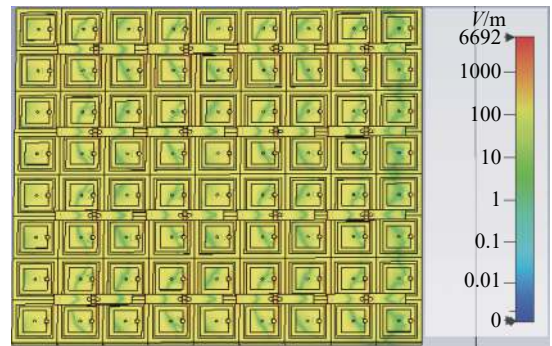


Fig. 13 Electric field distribution in the antenna system

图 13 天线系统电场强度分布

### 3 结 论

本文研究并设计了一款具有高功率容量与宽角度扫描特性的C/Ku双频段共口径平面相控阵天线。该天线将Ku波段辐射结构作为C波段天线的反射地板,在同一口径内实现了双频工作,整体剖面高度仅0.13,频率比达2.12:1。同时在双频段均采用具有宽波束辐射特性的阵元天线,在 $yo_z$ 平面实现了 $\pm 45^\circ$ 范围内的波束扫描效果,且增益波动小于3 dB。最后对天线的金属部分采用了介质埋入式处理,避免了空气击穿,阵列在总输入功率为1 W时功率容量达18.9 MW,能满足高功率场景的应用。综上,本文提出的共口径天线具有宽角扫描特性和高功率容量,且结构简单,易于加工制作,对共口径相控阵天线的设计具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 宋航. 共口径天线的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 1-10. (Song Hang. Study and design of shared-aperture antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 1-10)
- [2] Naishadham K, Li Ronglin, Li Yang, et al. A shared-aperture dual-band planar array with self-similar printed folded dipoles[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 606-613.
- [3] Wang Zongxin, Xiao Lingwen, Fang Laiwang, et al. A design of E/Ka dual-band patch antenna with shared aperture[C]//Proceedings of 2014 Asia-Pacific Microwave Conference. 2014: 333-335.
- [4] Bai Chunxu, Cheng Yujian, Ding Yanrong, et al. A metamaterial-based S/X-band shared-aperture phased-array antenna with wide beam scanning coverage[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 4283-4292.
- [5] Liu Shengying, Jiang Kaibo, Xu Guobing, et al. A dual-band shared aperture antenna array in Ku/Ka-bands for beam scanning applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 78794-78802.

- [6] Mao Chunxu, Gao S, Wang Yi, et al. A shared-aperture dual-band dual-polarized filtering-antenna-array with improved frequency response[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 1836-1844.
- [7] Tao Mingcui, Wu Yiwen, Hao Zhangcheng. Compact orthogonal multiple-beam antenna with shared aperture[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(6): 873-877.
- [8] Yan Bo, Zhang Yuanming, Li Long. Design of a dual-band shared-aperture antenna based on frequency selective surface[C]//Proceedings of 2013 International Symposium on Antennas & Propagation. 2013: 496-499.
- [9] 丁霄. 基于方向图可重构技术的相控阵大角度扫描特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 3-6. (Ding Xiao. Research on the performance of wide-angle scanning phased array based on pattern reconfigurable technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 3-6)
- [10] Wang Ren, Wang Bingzhong, Ding Xiao, et al. Planar phased array with wide-angle scanning performance based on image theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(9): 3908-3917.
- [11] 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.
- [12] Ko S T, Lee J H. Hybrid zeroth-order resonance patch antenna with broad  $E$ -plane beamwidth[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 19-25.
- [13] Wen Yaqing, Gao S, Wang Bingzhong, et al. Dual-polarized and wide-angle scanning microstrip phased array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(7): 3775-3780.
- [14] 白芮欣. 基于人工磁导体的低剖面天线及最优结构的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014: 41-45. (Bai Ruixin. Research on low profile antenna based on AMC and the optimal structure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014: 41-45)
- [15] Nasser S S S, Liu Wei, Chen Zhining. Wide bandwidth and enhanced gain of a low-profile dipole antenna achieved by integrated suspended metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(3): 1540-1544.
- [16] 赵玮琛, 张政权, 张健穹, 等. 侧馈式紧凑型扁波导螺旋阵列天线的设计[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(6): 78-82. (Zhao Weichen, Zhang Zhengquan, Zhang Jianqiong, et al. Design of helical array antenna fed from compact side-feed slab waveguide[J]. *Electronic Components & Materials*, 2018, 37(6): 78-82)
- [17] 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 radome with meander-line polarizer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 053005)