



·高功率微波技术·

宽带 Ka 波段平面反射阵列天线设计*

张治强¹, 赵加宁^{2,3}, 李 芳^{2,3}, 傅 城², 张海川¹

(1. 西北核技术研究所, 高功率微波技术重点实验室, 西安 710024; 2. 桂林理工大学 信息科学与工程学院, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学 广西嵌入式技术与智能系统重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 平面反射阵列天线的发展受到了带宽与功率容量两方面限制。为此, 本文首先基于多谐振技术提出了一种新型平面反射阵列单元结构, 相比于传统单元, 所提出单元结构具有功率容量高、剖面低且相移曲线线性度好的特点。其次利用所提出单元, 通过优化阵面特性在 Ka 波段设计了包含 20×20 个单元的平面反射阵列天线。最后利用电磁仿真软件进行模拟计算, 结果显示在中心频点 35 GHz 处, 天线峰值增益为 27.58 dBi, 口径效率为 52.33%, 副瓣小于 -16.08 dB, 并且在 30.41~39.64 GHz 频率范围内(相对带宽 26.37%)天线增益跌落小于 3 dB, 并且所设计平面反射阵列天线最大功率容量可以达到 13.99 MW, 功率密度为 218.54 W/mm²。

关键词: 平面反射阵列天线; 毫米波; 多谐振; 宽带; 高功率容量

中图分类号: TN822.8

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220037

Design of a broadband Ka-band reflectarray antenna

Zhang Zhiqiang¹, Zhao Jia'ning^{2,3}, Li Fang^{2,3}, Fu Cheng², Zhang Haichuan¹

(1. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;
2. College of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
3. Guangxi Key Laboratory of Embedded Technology and Intelligent System, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The development of reflectarray antenna is limited by bandwidth and power capacity. In this paper, a novel reflectarray element based on multi-resonant technique is proposed firstly. Compared with the traditional element, the proposed element structure has the characteristics of high-power capacity, low profile, and good linearity of phase shift curve. Secondly, a reflectarray antenna with 20×20 elements is designed in Ka band by using the proposed element and optimizing the array characteristics. Finally, the electromagnetic simulation software is used to simulate the antenna, The results show that at the center frequency of 35 GHz, the peak gain of the antenna is 27.58 dB, the aperture efficiency is 52.33%, the sidelobe is less than -16.08 dB, and the antenna gain drop is less than 3 dB in the frequency range of 30.41—39.64 GHz (the relative bandwidth is 26.37%). Moreover, the power capacity of the designed reflectarray reaches 13.99 MW and the power density is 218.54 W/mm².

Key words: reflectarray antenna, millimeter wave, multi-resonant, broadband, high power capacity

平面反射阵列天线不仅在物理结构上具有低剖面、易加工集成、低成本等优势, 而且在电性能上由于阵面上各单元反射相位可独立调控, 在实现波束扫描^[1-2]、共口径多频^[3-4]、共形^[5-6]等方面具有显著优势。因此, 近年来平面反射阵列天线逐渐成为高增益天线领域中研究热点, 但是平面反射阵列天线存在两个固有的技术难题: 一是自身带宽窄; 二是有限的功率容量。对于前者, 主要原因在于离散移相机制以及单元谐振移相方式。为了拓展平面反射阵列天线带宽, 国内外学者开展了大量工作^[7-15], 也取得了显著的成效。但是目前平面反射阵列天线的国内外针对同一频段的带宽拓展研究工作主要集中于 X 波段或者 Ku 等相对低波段, 而且通常引入一定高度的空气层, 增加了天线阵面的剖面化高度, 不利于紧凑化设计。随着第五代无线通信技术发展以及商用化, 如何在 Ka 波段等毫米波波段有效拓展平面反射阵列天线成为亟待解决的问题。从目前的工作来看, Ka 波段平面反射阵列天线在带宽、口径效率以及副瓣等性能方面仍有提升空间。对于后者, 其主要原因在于平面反射阵列天线多采用微带贴

* 收稿日期: 2022-01-29; 修订日期: 2022-04-19
联系方式: 张治强, xidian6971045@yahoo.com.cn。
通信作者: 赵加宁, zjn317253663@126.com。

片单元结构,其贴片表面电场通常较为集中,特别是在谐振尺寸附近,容易在空气中发生击穿。因此,如何匀化表面电场是提升平面反射阵列天线功率容量的关键问题。

综上所述,本文将在Ka波段设计一种新型宽带平面反射阵列单元,通过多谐振技术来扩大单元移相范围以及优化相移曲线的线性度,为了避免单元辐射贴片表面场强过于集中而导致其在空气中击穿,通过加载介质基板,大幅度提升了单元的功率容量,并且分析入射角度及各项参数对单元移相特性的影响。在此基础上,通过优化阵面特性设计一种适用于高功率应用场景且宽带宽的平面反射阵列天线,为平面反射阵列天线发展提供技术支持。

1 单元结构的设计与分析

设计的平面反射阵列单元结构示意图如图1(a)所示,阵列单元由介质基板、金属辐射贴片层以及金属地板层组成。其中金属辐射贴片由3个开口圆环组成,圆环半径由里向外分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 ,它们之间关系为 $r_2=r_1+g$, $r_3=r_2+g$,其中 g 为圆环之间间隙,每个圆环宽度均是 w , α 为开口圆环的张角,通过改变 α 可以使单元产生多次谐振,改变谐振点位置可以避免相位的剧烈变化,从而使单元移相曲线的线性度更高。考虑到单元之间互耦作用以及避免天线中出现栅瓣,单元周期大小 P 为4 mm(约为 0.47λ , λ 为中心频点35 GHz所对应的波长),为了降低介质损耗,单元的介质基板采用Rogers 5880材料,介电常数为2.2,正切损耗值约为 9×10^{-4} ,金属辐射贴片右侧介质基板厚度为 h ,左侧介质基板厚度为 h_u 。为了使所设计单元移相精度高,采用电磁仿真软件HFSS中周期性边界条件对 g 、 w 、 h 、 h_u 等参数进行优化扫描,得到最优化参数值为: $g=0.6$ mm, $w=0.2$ mm, $h=1.026$ mm, $h_u=3.175$ mm。在优化后的参数下,单元的反射相位与幅值如图1(b)所示。从图中可知,当张角 α 从 30° 变化到 160° 时,单元反射相位变化可达到 360° 全域范围,并且单元的反射幅度大于 -0.1 dB,这说明电磁波经过所设计单元反射之后,幅值可近似认为与初始状态保持一致,即回波损耗非常低。

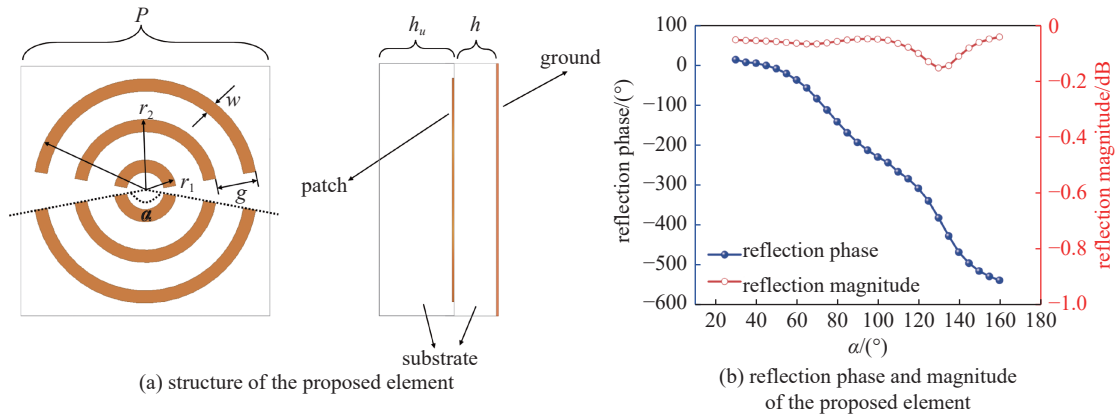


Fig. 1 Structure and reflection characteristics of the proposed element

图1 单元结构与反射特性图

图2为单元加载与未加载上层介质基板时单元金属辐射贴片表面处电场分布图,从图可知,当单元未加载上层介质基板时,单元表面处最大场强为 E_{max} 为315840 V/m,而空气的击穿阈值 E_d 为3 MV/m,此时单元在不发生击

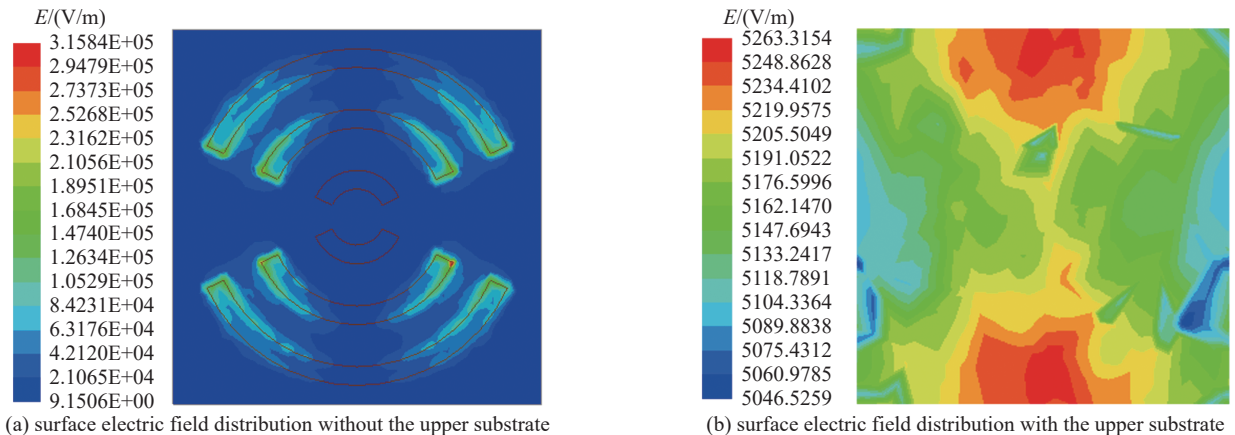


Fig. 2 Surface electric field distribution of the proposed element

图2 所提出单元表面电场分布图

穿时所能承受的最大功率容量 P_C 可由公式(1)进行计算,此时,单元功率容量 P_C 仅为 90.22 W。当单元加载上层介质基片之后,单元表面处最大场强值 E_{\max} 为 2204.30 V/m,此时,单元功率容量 P_C 可以达到 1.70 MW。因此,在无限周期条件下,未加载介质基片的辐射贴片由于场强过于集中,导致其易于在空气中击穿,限制了其最大承受功率容量,而在辐射贴片上加载介质后可以有效匀化表面电场分布,从而大幅度提升单元的功率容量。

$$P_C = \frac{(E_d)^2}{(E_{\max})^2} \quad (1)$$

根据平面反射阵列天线工作原理可知,阵面通过调整不同位置处单元结构对初级馈源辐射波束相位进行调控,这说明初级馈源照射至阵面各单元角度是随着位置的变化而变化的,图 1(b)中单元反射相位与幅度特性是在垂直入射的情况下获得,因此,为了使后续天线获得良好的辐射特性,需考虑斜入射状态下单元移相特性的变化情况。图 3 为单元入射角 θ 从垂直入射到 40° 斜入射单元移相曲线的变化情况,从图中可知,当入射角度在 40° 以内变化时,单元移相误差小于 20° ,这说明入射角度对单元移相特性影响可近似忽略,这为后续天线获得高方向性波束奠定了基础。为了保证后续所设计平面反射阵列天线在频段范围内具有稳定增益,在单元设计时需考虑频率变化对移相特性的影响。图 4 为频率从 30 GHz 变化至 40 GHz 单元移相特性变化情况,从图中可知,随着频率的改变,单元移相曲线在主要工作区域基本保持稳定的变化趋势,这说明工作频率改变所产生的相位误差将对天线整体性能影响较小,也说明所设计单元具有宽带特性。

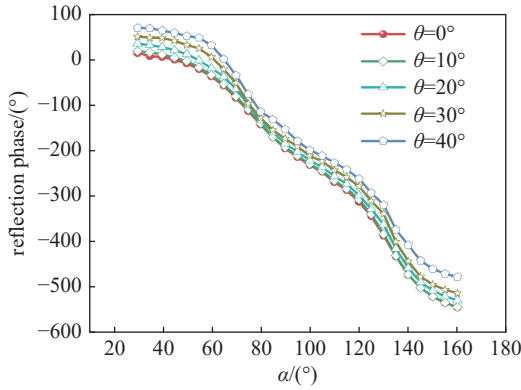


Fig. 3 Reflection phase with different incident angles

图 3 入射角对单元移相特性的影响

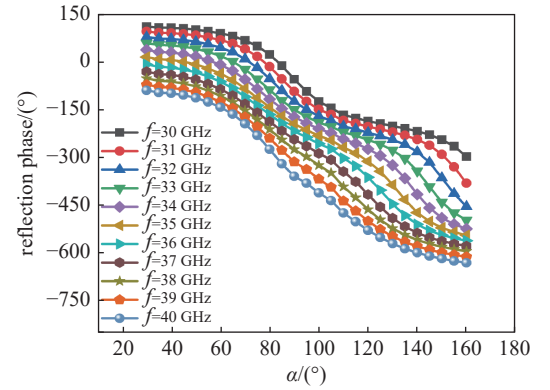


Fig. 4 Reflection phase with different frequencies

图 4 频率对单元移相特性的影响

2 Ka 波段平面反射阵列天线的设计与仿真分析

为了验证所设计单元的有效性,接下来将设计一款 20×20 个单元的 Ka 波段平面反射阵列天线。平面反射阵列天线的增益

$$G = D \cdot \eta_a = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \eta_i \cdot \eta_s \quad (2)$$

式中: D 为方向性系数, η_a 为平面反射阵列天线口径效率, A 为阵面的物理口径面积, η_s 和 η_i 分别为天线的截获效率与照射效率,其中, η_s 和 η_i 均与初级馈源方向图函数 ($\cos^{2q} \theta$) 有关。因此,为了保证天线具有高增益或者高口径效率,天线焦径比约为 1, $q=3.65$ 。为了减小由初级馈源带来的遮挡,初级馈源以 15° 角度对阵面进行馈电,天线辐射主波束方向为 $+Z$ 轴,如图 5 所示,为了实现预先设定的主波束方向,阵面上各单元需要补偿的相位大小为

$$\phi_{mn} = k \times (d_{mn} - \mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r}_{mn}) \pm 2\pi N, \quad N = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (3)$$

式中: k 为自由空间中电磁波的传播常数, d_{mn} 代表的是馈源到阵面上任意一单元的距离, \mathbf{r}_{mn} 为阵面上各单元的位置矢量,天线辐射波束的单位矢量为 \mathbf{r}_0 。根据式(3)可计算出阵面上各单元需补偿的相位,如图 6(a)所示,结合图 1(b)中单元

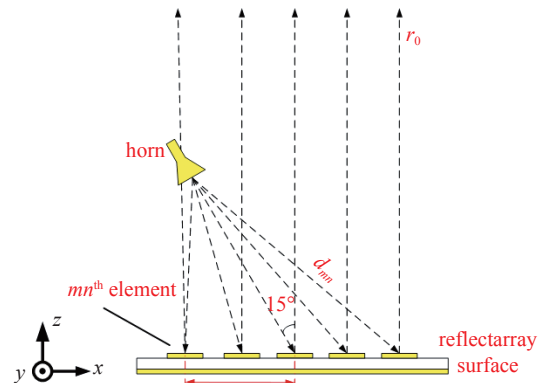


Fig. 5 Model of Ka-band reflectarray antenna

图 5 Ka 波段平面反射阵列天线模型示意图

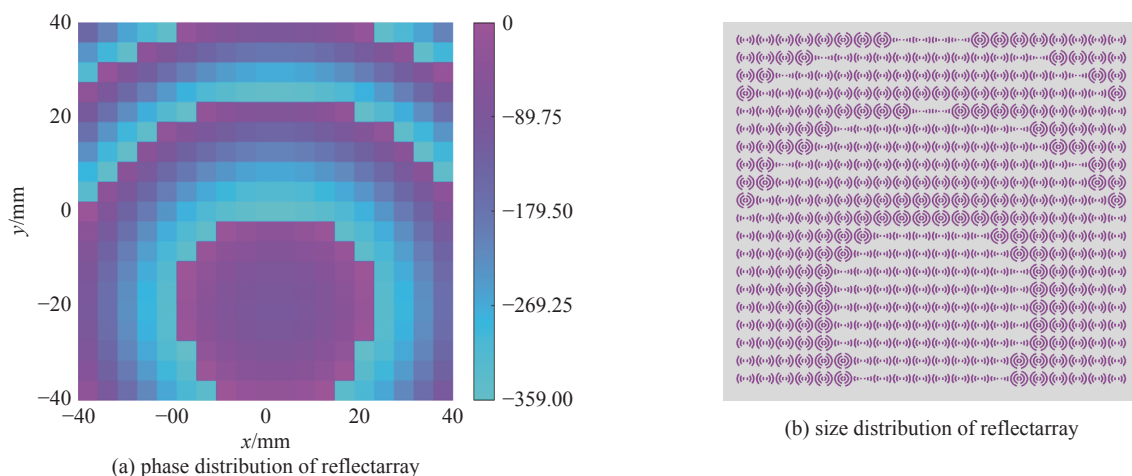


Fig. 6 Phase and size distribution of the designed reflectarray

图6 阵面的相位分布以及各单元尺寸分布图

的移相曲线,即可获得阵面上各单元的尺寸分布,如图6(b)所示。

接下来利用电磁仿真软件对所设计的天线的辐射特性进行了仿真计算,图7(a)是所设计的平面反射阵列天线在中心频点 35 GHz 处的辐射方向图,从图中可以看出波束辐射主方向与预定的 0° 是相吻合的,这验证了单元以及天线设计的正确性。天线在该频点峰值增益为 27.58 dBi,口径效率约为 52.33%,波束在两个主平面主瓣宽度分别为 6.11° 与 6.32° ,具有良好的对称性,最高副瓣电平约为 -16.08 dB。这说明所设计天线具有良好的辐射特性。图7(b)为天线峰值增益与相应的口径随频率变化图,从图中可知,在 30.41~39.64 GHz 频率范围内(相对带宽 26.37%)天线增益跌落小于 3 dB,这说明所设计天线在频带范围内具有稳定的增益,实现了宽带特性。

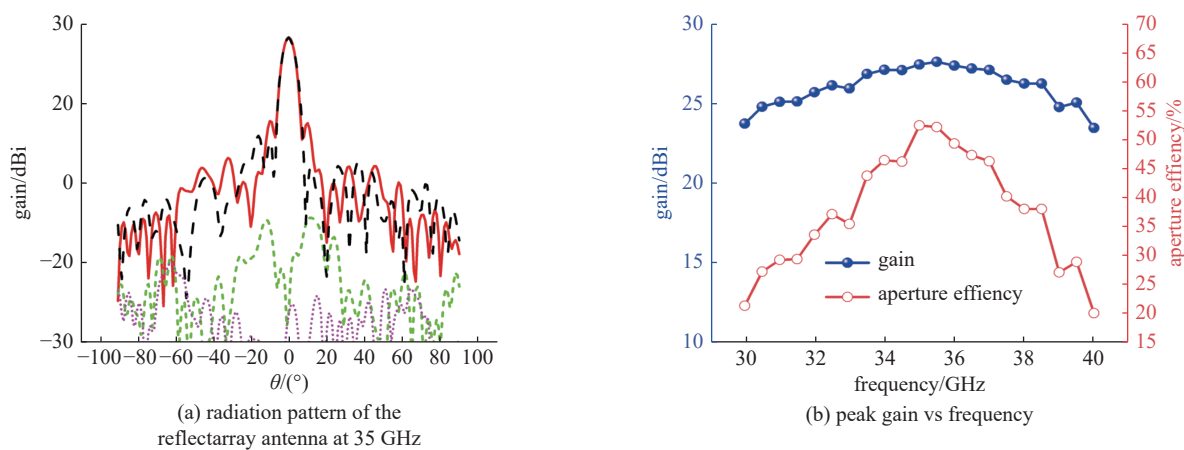


Fig. 7 Radiation pattern and gain bandwidth of the reflectarray antenna

图7 设计的平面反射阵列天线辐射方向图以及增益带宽图

最后对天线的功率容量进行分析,图8是所设计天线阵面加载介质基片与未加载介质基片时的表面电场分布,从图中可知,未加载介质基片时天线阵面表面处最大场强 E_{\max} 为 7248.40 V/m,由公式(1)可知,此时天线所能承受的最大功率 P_C 约为 171 300 W,而加载介质基片之后,天线阵面表面处最大场强 E_{\max} 为 802.17 V/m,最大功率容量约为 13.99 MW,功率密度约为 218.54 W/mm²。从以上分析可知,在有限周期条件下,加载介质基片可以有效地提升平面反射阵列天线的功率容量,也说明平面反射阵列天线适用于高功率场景。

3 结论

本文利用多谐振技术设计了一种新型的平面反射阵列单元,该单元在没有引入空气层的基础上实现了 360° 相位全域变化范围,在现有的加工工艺下,降低了加工难度与成本,并且经过参数优化,单元移相特性受入射角度与频率影响较小。由此,利用该单元设计一款 15° 偏馈的平面反射阵列天线,仿真结果表明,天线在中心频点 35 GHz 处峰值增益为 27.58 dBi,口径效率为 52.33%,副瓣小于 -16.08 dB,并且在 30.41~39.64 GHz 频率范围内(相对带宽 26.37%)天线增益跌落小于 3 dB,天线在整个频带范围内具有高方向性波束,并且通过加载介质基片,天线功率容

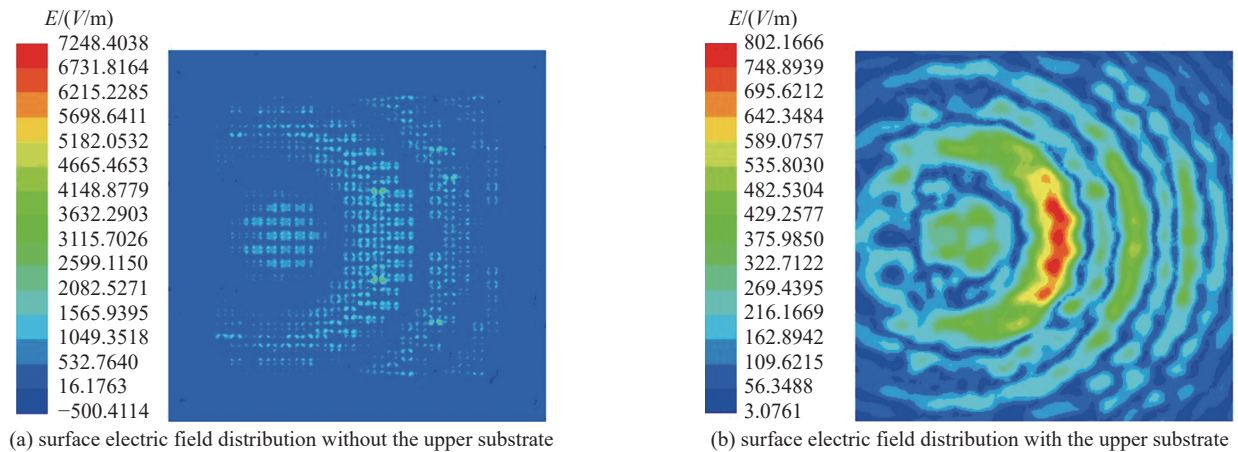


Fig. 8 Electric field distribution of the designed reflectarray surface

图 8 所设计平面反射阵列天线阵面电场分布图

量提升了约 82 倍,说明本文所设计的天线适用于高功率和宽带的应用场景,为毫米波宽带高功率天线提供了一种新的技术途径,具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] Hum S V, Okoniewski M. An electronically tunable reflectarray using varactor diode-tuned elements[C]//Proceedings of 2004 IEEE Antennas and Propagation Society Symposium. 2004: 1827-1830.
- [2] Xiong Fuqin, Romanofsky R R. Study of behavior of digital modulations for beam steerable reflectarray antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(3): 1083-1097.
- [3] Hasani H, Peixeiro C, Skrivervik A K, et al. Single-layer quad-band printed reflectarray antenna with dual linear polarization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5522-5528.
- [4] Yang Fan, Kim Y, Yu A, et al. A single layer reflectarray antenna for C/X/Ka bands applications[C]//Proceedings of 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. 2007.
- [5] Beccaria M, Pirinoli P, Orefice M. Investigation on convex conformal reflectarray antennas exploiting double parameter technique[C]//Proceedings of the 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016.
- [6] Nayeri P, Yang Fan, Elsherbeni A Z. Radiation characteristics of conformal reflectarray antennas[C]//Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). 2011.
- [7] Martinez-de-Rioja E, Encinar J A, Barba M, et al. Dual polarized reflectarray transmit antenna for operation in Ku- and Ka-bands with independent feeds[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3241-3246.
- [8] Han C, Rodenbeck C, Huang J, et al. A C/Ka dual frequency dual layer circularly polarized reflectarray antenna with microstrip ring elements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(11): 2871-2876.
- [9] Deng Ruyuan, Xu Shenheng, Yang Fan, et al. An FSS-backed Ku/Ka quad-band reflectarray antenna for satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(8): 4353-4358.
- [10] Encinar J A. Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(10): 1403-1410.
- [11] Vosoogh A, Keyghobad K, Khaleghi A, et al. A high-efficiency Ku-band reflectarray antenna using single-layer multiresonance elements[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 891-894.
- [12] Fan Chong, Choi W W, Yang Wanchen, et al. A low cross-polarization reflectarray antenna based on SIW slot antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 333-336.
- [13] Dahri M H, Jamaluddin M H, Seman F C, et al. A novel asymmetric patch reflectarray antenna with ground ring slots for 5G communication systems[J]. *Electronics*, 2020, 9: 1450.
- [14] Li Xiaoyu, Wan Yinglu, Liu Juan, et al. Broadband electronically scanned reflectarray antenna with liquid crystals[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(3): 396-400.
- [15] Mahmoud A, Kishk A A, Hao Zhangcheng, et al. Ka-band circularly polarized reflectarray: using a double-layers cross slot[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58(4): 60-68.