

基于矩形环加载的 UHF 频段宽带圆极化天线设计

王晓天, 刘 敏, 鲁 帆
(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 提出了一种同时提高探针馈电单层圆极化微带天线的增益带宽、阻抗带宽及圆极化轴比带宽的方法, 解决了传统单馈点单层微带天线阻抗及圆极化轴比带宽较窄的问题。基于环形贴片行波圆极化辐射原理, 通过在辐射贴片上方加载一方环形金属贴片, 该贴片内外环与辐射贴片边缘等距设计, 可调参数少, 增加了天线阻抗及轴比带宽, 提高了天线增益, 同时实现低剖面应用。基于此方法, 设计了一款应用于某型号的 UHF 频段宽带圆极化天线, 并加工实物。实测结果表明: 该天线电压驻波比 (VSWR) < 2 的带宽达到 17.2% (370 MHz ~ 440 MHz), 轴比 (AR) 小于 3 dB 的带宽达到 8.4% (395 MHz ~ 430 MHz), 天线带宽内主辐射增益约 7 dB 左右。设计方法对提高单馈圆极化微带天线的轻量化、宽带技术水平具有重大意义, 应用前景广阔。

关键词: UHF 频段; 圆极化; 宽带; 微带天线

中图分类号: V443+.4 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)03-0031-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211109002

引用格式: 王晓天, 刘敏, 鲁帆. 基于矩形环加载的 UHF 频段宽带圆极化天线设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(3): 31-36.

Design of UHF-Band broadband circular polarization antenna based on rectangular ring loading

WANG Xiaotian, LIU Ming, LU Fan

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the problems of narrow impedance bandwidth and axis ratio bandwidth of traditional single-fed single-layer microstrip antenna, a method to improve the gain, standing wave and circularly polarized bandwidth of probe fed single-layer circularly polarized microstrip antenna is proposed. By loading a square ring metal patch above the radiation patch based on the principle of circular polarization radiation of annular patch, the inner and outer rings of the patch are equidistant from the edge of the radiation patch, which increases the impedance and axial ratio bandwidth, improves the antenna gain, realizes low profile application. The measured results show that The bandwidth of VSWR < 2 is 17.2% (370 MHz ~ 440 MHz), and the 3-dB axial-ratio bandwidth is 8.4% (395 MHz ~ 430 MHz). The gain is about 7 dB within the overlapped bandwidth. This method is of great significance to improve the light and miniaturization and broadband technology level of single-fed circularly polarized microstrip antenna, and has broad application prospect.

Key words: UHF band; Circular polarization; Bandwidths; Microstrip antenna

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211109002

Citation: WANG Xiaotian, LIU Ming, LU Fan. Design of UHF-Band broadband circular polarization antenna based on rectangular ring loading[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(3): 31-36.

引 言

微带天线因具有尺寸小、成本低、易加工等特点, 广泛应用于卫星通信及卫星导航领域^[1-3]。特别是圆极化微带天线, 具有很多优点: 可以接收各种极化的来波, 其圆极化辐射波可被任意极化天线接收; 具有旋转正交性, 极化波入射到对称目标反射波变为反旋向等。对圆极化天线来说, 除阻抗带宽指标外, 轴比带宽也是一个非常重要的指标。

传统的单馈点单层微带天线带宽较窄, 文献[4-9]通过增加介质厚度、改变介质介电常数、改变馈电

方式等一些简单的方法扩展阻抗带宽, 但是这些方法对于展宽单馈点单层介质微带天线阻抗带宽有效, 对展宽圆极化轴比带宽没有效果, 一般圆极化轴比带宽只有 1%~3%。文献[10-15]用近似容性耦合馈电、缝隙馈电、多层微带等方法可以得到宽带圆极化天线, 但由于采用双点馈电, 增加了馈电网络及多层微带, 导致天线外形及重量过大, 结构较为复杂。对于工作在 UHF 频段的卫星通信天线, 馈电网络加载多层微带结构的外形尺寸及重量均无法满足卫星轻量化、小型化要求。

为了提高单馈点单层微带天线阻抗及轴比带宽, 同时为了简化设计, 本文设计了一款工作在 UHF 频段宽带圆极化微带天线, 采用在单层辐射片上方加载方环形金属片的方式, 实现了单馈点单层微带天线宽带圆极化设计。环形辐射片作为寄生贴片, 表面可被激励起行波电流分布, 从而实现耦合圆极化辐射, 同时金属片内外环带边缘与辐射贴片边缘等距设计, 可调参数少, 设计简单。测试结果表明, 该天线工作在 370 MHz~440 MHz 频带内, 主辐射增益约为 7 dBi 左右, 轴向轴比小于 3 dB。由于本文设计天线为单馈单层微带天线, 该馈电方式决定其广角圆极化性能一般, 对于广角圆极化性能要求不高的宽带通信天线, 可将此设计作为参考。

1 天线设计原理

为提高单馈点单层介质圆极化微带天线圆极化带宽, 常用的方法是贴片加载法, 即在单层辐射贴片上方一定距离加载一个金属贴片来实现耦合谐振, 通过激励单层辐射贴片及加载贴片的谐振频率, 两个谐振频率接近时会形成一个新的较宽的频带, 因此可以获得比较好的相对带宽。本文的方法不需要增加馈电网络来实现宽带圆极化, 由于采用单点馈电要求加载贴片可以激励起圆极化信号, 环形贴片作为寄生贴片, 表面可被激励起行波电流分布, 从而实现耦合圆极化辐射。下面对环形贴片行波圆极化原理进行分析。

图 1 给出了环形贴片电流源及坐标系定义图, 依据电流积分方程可得环形贴片天线远场辐射场为:

$$\vec{E}(\gamma, \theta, \varphi) = j \frac{60\pi}{\lambda} \frac{e^{-jk r}}{r} \int_{\ell} (\vec{J}_0 \times \hat{r}) \times \hat{r} \cdot e^{-jk \vec{r}' \cdot \hat{r}} d\ell \quad (1)$$

其中, \vec{J}_0 为环上电流矢量, 方向指向环的周向, \hat{r} 为 r 方向的单位矢量, \vec{r}' 为环形电流的位置矢量, k 和 λ 分别为自由空间的波数和波长, ℓ 为沿环周向的积分路径。

依据傅里叶级数, 环形电流 \vec{J}_0 可以表示为:

$$\vec{J}_0 = \hat{\phi} I(\varphi) = \hat{\phi} \sum_{-\infty}^{\infty} I_n e^{jn\varphi} \quad (2)$$

由公式 (1) 和公式 (2) 得出天线的最大辐射方向为 z 向, 在 z 轴方向, 圆极化辐射的条件为:

$$\frac{I(\varphi + \pi/2)}{I(\varphi)} = \pm j \quad (3)$$

由公式 (3) 得出, 当环天线上的电流为幅度均匀的行波电流时, 环天线可实现圆极化辐射, 通过调整环形贴片尺寸及与单层贴片距离, 可以实现环形贴片表面行波电流分布。

单层贴片加载环形贴片实现宽带圆极化的原理可以依据腔模理论^[16], 单层贴片微带天线可以等效成一个谐振腔, 天线的输入阻抗可以等效成对应于各模的并联谐振电路阻抗之和。多层微带天线可以将天线等效成含有初级和次级的耦合谐振电路, 如图 2 所示。

图 2 中, 参数 G_1 为第一层辐射贴片的电导, L_1 为第一层辐射贴片的电感, C_1 为第一层辐射贴片的

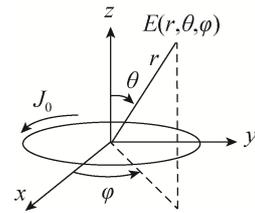


图 1 环形贴片电流源及坐标系定义图

Fig. 1 Diagram of ring patch current and coordinate system

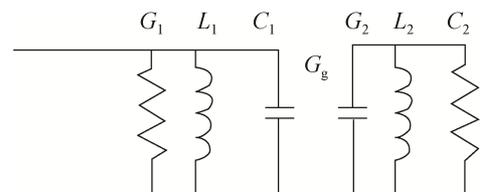


图 2 多层微带天线等效耦合电路

Fig. 2 Equivalent coupling circuit of double layer microstrip antenna

电容； G_2 为耦合贴片电导， L_2 为耦合贴片电感， C_2 为耦合贴片电容； C_g 为第一层辐射贴片与耦合贴片之间的互耦电容。

微带天线通常工作于 TM_{01} 和 TM_{10} 简并谐振频率附近，而远离其他谐振点，根据图 2 的等效电路，其数学模型可表示为：

$$Z_{in} = \frac{1}{G_1 + G_2 + j(\omega C_1 - \frac{1}{\omega L_1}) + j(\omega C_2 + C_g - \frac{1}{\omega L_1})} \quad (4)$$

天线输入阻抗为 50Ω ，通过公式 (4) 求得耦合贴片的等效电路参数，最终反演出耦合贴片的结构参数。

2 天线设计

本文设计的 UHF 频段圆极化天线，采用金属环带加载矩形贴片微带形式，该加载贴片既可实现天线宽带特性，又可以作为天线的寄生单元提高天线增益。微带天线采用 Arlon AD450 介质基材，介电常数 ϵ_r 为 4.5，贴片选用矩形贴片形式，单点馈电。首先通过合理选取馈电点位置与矩形贴片尺寸实现天线圆极化特性，再通过调节方环形加载贴片高度及大小来实现圆极化宽带特性。图 3、图 4 分别给出了天线三维结构图及天线剖视图，其中， G 为介质基材及地板长度， W 、 L 为矩形贴片尺寸， d 为影响方环形贴片尺寸的参数值， a 、 b 为馈电点相对矩形贴片边缘位置， h_1 、 h_2 分别表示介质基材厚度及聚酰亚胺支撑介质高度（方环形贴片相对矩形贴片高度）。

方环形贴片尺寸 d 及距离辐射片的高度 h_2 对天线圆极化及阻抗带宽影响较大，通过优化 d 和 h_2 尺寸实现最优的宽带圆极化特性。图 5 和图 6 分别给出了不同的 d 和 h_2 尺寸对天线带内圆极化轴比及反射系数的影响曲线，可以看出 d 尺寸参数增加或者 h_2 尺寸参数减少会导致圆极化轴比及驻波带宽变宽，但中心频段的圆极化轴比会恶化， h_2 尺寸参数变化对圆极化轴比带宽影响较大， d 尺寸参数变化对圆极化轴比带宽影响较小；图 7 给出了不同的 d 和 h_2 尺寸参数对天线增益带宽影响曲线，可以看出 d 和 h_2 尺寸对天线增益带宽影响较小。为得到最优的宽带圆极化轴比、增益及阻抗带宽，需统筹考虑中心频段圆极化性能，选取合理的 d 和 h_2 尺寸参数。

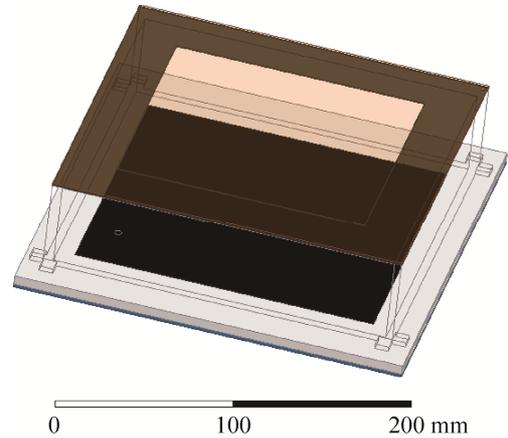


图 3 天线三维结构图
Fig. 3 Antenna 3D structure

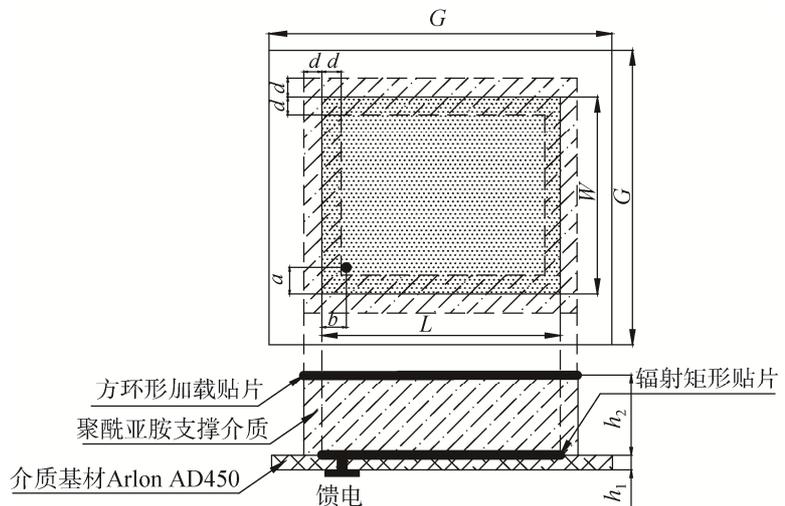
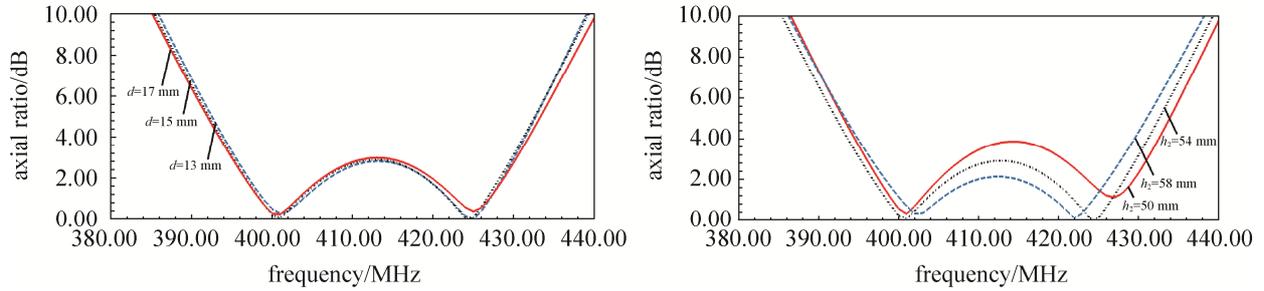
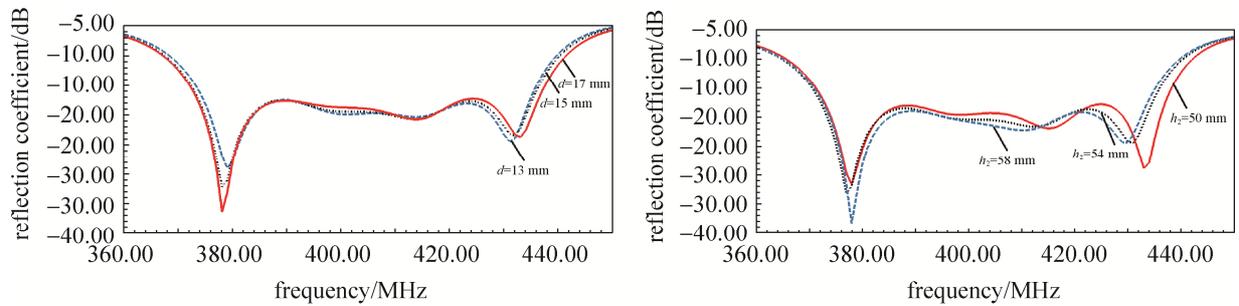
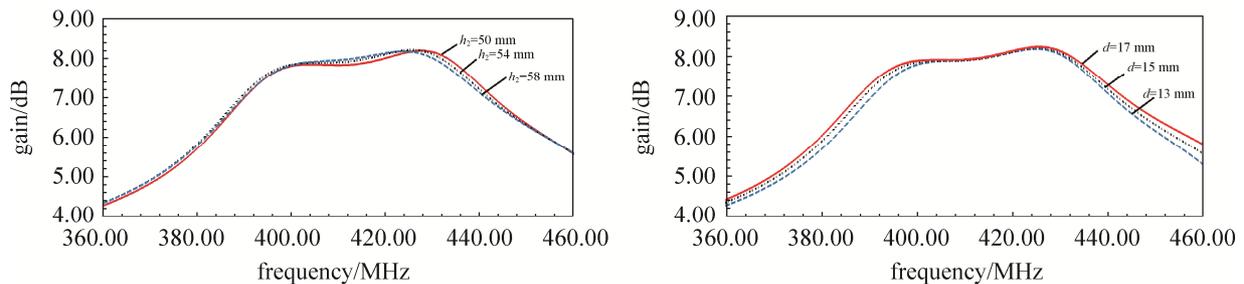


图 4 天线剖视图
Fig. 4 Cutaway view of the antenna structure

图 5 不同方环形贴片尺寸 d 及高度尺寸 h_2 对应天线轴向轴比带宽仿真曲线Fig. 5 Calculated boresight axial ratio of antenna with different size d and h_2 图 6 不同方环形贴片尺寸 d 及高度尺寸 h_2 对应天线反射系数仿真曲线Fig. 6 Calculated reflection coefficient of antenna with different size d and h_2 图 7 不同方环形贴片尺寸 d 及高度尺寸 h_2 对应天线轴向增益带宽仿真曲线Fig. 7 Calculated boresight gain of antenna with different size d and h_2

通过参数优化, 我们选取介质基材及地板尺寸 G 为 $210 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$, 矩形贴片长 L 为 177 mm , 宽 W 为 162 mm , 方环形贴片尺寸 d 为 15 mm , 介质基材高度 h_1 为 3.048 mm , 聚酰亚胺支撑高度 h_2 为 54 mm , 馈电点位置 a 为 17.3 mm , b 为 33 mm 。天线最大外轮廓尺寸为 $210 \text{ mm} \times 210 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 天线重量约 0.6 kg 。

3 天线仿真及测试验证

为进行设计验证, 依据设计的结构尺寸加工天线样机, 并对天线进行测试。图 8 给出了天线的中心频点和两边辐射测试及仿真增益方向比对比图, 可以看出, 实测与仿真结果接近, 整个工作带宽内增益约 7 dB 左右, 个别角域增益实测存在凹点, 主要由于装配过程耦合贴片平面度较差造成, 后续通过控制耦合贴片及支撑结构平面度可以解决该问题。图 9 给出了不同频点轴比测试曲线, 由图 9 可以看出, 该天线轴比 (AR) 小于 3 dB 的带宽约为 8.4% 。图 10 给出了各频点实测轴向增益值, 轴向 7 dB 增益带宽在 13% 以上。图 11 给出了该天线驻波比测试结果, 由图 11 可以看出, 该天线电压驻波比 (VSWR) 小于 2 的带宽达到 17.2% 。

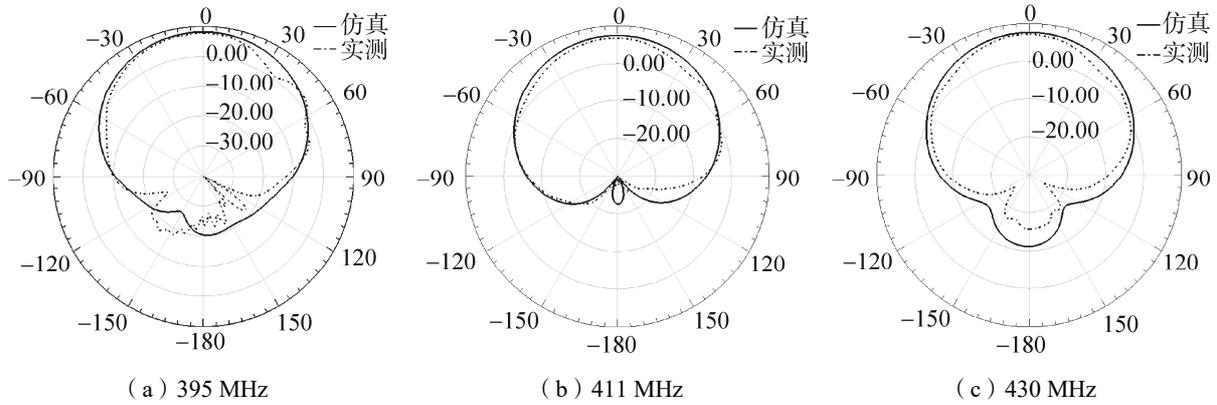


图 8 辐射方向图仿真及测试比对图

Fig. 8 Measured and simulated radiation patterns of the proposed antenna

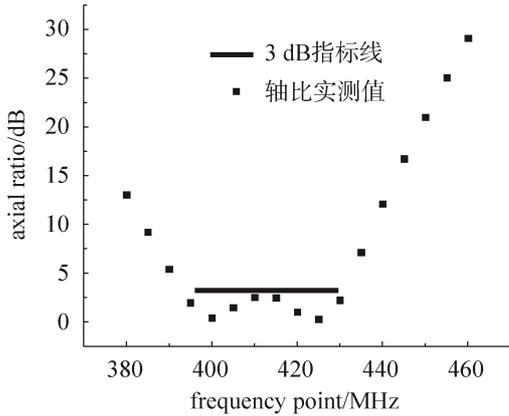


图 9 轴向轴比实测结果

Fig. 9 Measured boresight axial ratio of the antenna

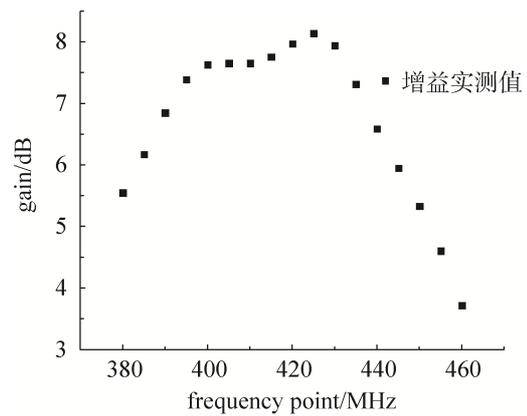


图 10 轴向增益实测结果

Fig. 10 Measured boresight gain of the antenna

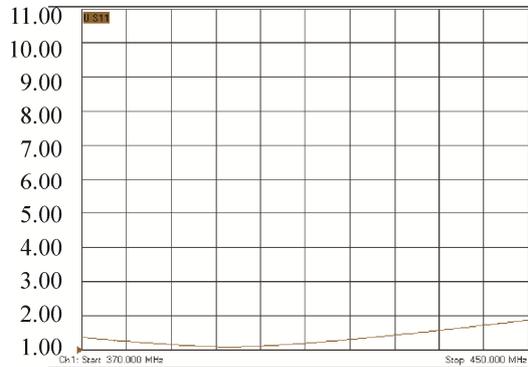


图 11 天线驻波实测结果

Fig. 11 Measured VSWR of the antenna

4 结束语

本文设计了一种工作在 UHF 频段的宽带圆极化微带天线, 该天线为单点馈电、单层介质结构, 并采用方环形贴片加载技术, 大大改善了单馈单层微带天线的增益带宽、阻抗带宽及圆极化轴比带宽。实测结果表明, 天线电压驻波比 (VSWR) 小于 2 的带宽达到 17.2 %, 轴比 (AR) 小于 3 dB 的带宽达到 8.4 %, 天线带宽内主辐射增益约 7 dB 左右, 7 dB 增益带宽在 13 % 以上。本设计天线结构简单、体积小、重量轻, 目前已成功应用于某型号舱外通信天线。

参考文献

- [1] GILL G S, SINGH E H, SINGH Y. A novel dual band patch antenna for WLAN communications[J]. IRJET, 2015, 2(5): 960–963.
- [2] Gao Peng, Xiong Ling, Dai Jianbo, et al. Compact printed wide-slot UWB antenna with 3.5/5.5-GHz dual band-notched characteristics[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 983–986.
- [3] CHATTERJEE S, CHOWDHURY S K, SARKAR P P, et al. Compact microstrip patch antenna for microwave communication[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2013, 51: 800–807.
- [4] 张昕, 杨霁宁, 崔闻, 等. 一种以空气为基板的圆极化微带天线的设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(7): 104–106.
ZHANG Xin, YANG Aining, CUI Wen, et al. Research of circularly polarized microstrip antenna on air substrate[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(7): 104–106.
- [5] AAKASH B, RICHA G. A review on microstrip patch antenna and feeding techniques[J]. International Journal of Information Technology, 2020, 12(1): 149–154.
- [6] CHANDAN R, TAIMOOR K. Single-feed dual-polarized high gain microstrip antenna[J]. Wireless Personal Communications, 2019, 108(3): 1417–1430.
- [7] Chakraborty U, Kundu A, Chowdhury S K. Compact dual-band microstrip antenna for IEEE 802.11a WLAN application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 407–410.
- [8] ROY A, BHUNIA S, SARKAR D C. Slot loaded compact microstrip patch antenna for dual band operation[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2017, 73: 145–156.
- [9] ROY A, BHUNIA S, SARKAR D C. Compact multi-frequency strip loaded microstrip patch antenna with spur lines[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2016, 9: 1111–1121.
- [10] LIU S, WU W, FANG G D. Single-feed dual-layer dual-band E-shaped and U-slot patch antenna for wireless communication application[C]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 468–471.
- [11] CHEN L, ZHANG T L, WANG C, et al. Wideband circularly polarized microstrip antenna with wide beamwidth[C]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 1577–1580.
- [12] KUMAR S, KANAUIA B K, KHANDELWAL M K, et al. Single-feed circularly polarized stacked patch antenna with small-frequency ratio for dual-band wireless applications[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2015, 8(8): 1207–1213.
- [13] NASIMUDDIN, QING X M, CHEN Z N. A wideband circularly polarized stacked slotted microstrip patch antenna[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2013, 55(6): 84–99.
- [14] BAO X L, MAX J A, PATRICK M. Microstrip-fed wide-band circularly polarized printed antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(10): 3150–3156.
- [15] CHUNG K L, MOHAN A S. A systematic design method to broadband characteristics for singly-fed electromagnetically coupled patch antennas for circular polarization[J]. IEEE Transactions on AP, 2003, 51(12): 3239–3247.
- [16] 林昌禄, 聂在平. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[作者简介]

王晓天 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器天线设计。

刘 敏 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器天线设计。

鲁 帆 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天器测控与通信系统设计。

(本文编辑: 杨秀丽)