

文章编号: 2095-4980(2019)06-1060-06

具有谐波抑制功能的共面波导轻薄整流天线

刘一麟, 李 路, 李 君, 黄卡玛*, 杨 阳

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为解决对无人机、平流层飞艇等空中移动目标无线输能时机载接收端整流天线质量大, 占居飞行器有效载荷多的难题, 设计了一种具有谐波抑制功能的共面波导轻薄圆极化整流天线。该整流天线采用集中式整流方式, 通过将整流电路直接集成在微带天线接地板上, 实现了质量轻, 尺寸小, 剖面低, 易共形的圆极化整流天线。该天线工作在5.8 GHz, 采用共面波导耦合馈电, 并在馈线上直接加载共面波导谐振结构进行谐波抑制, 具有较宽的工作带宽。整流电路采用倍压整流形式, 利用贴片电容作为直通滤波器进行直流滤波, 电路结构简单。该整流天线结构紧凑, 质量仅6.28 g, 剖面厚度0.5 mm, 最佳整流效率63.84%, 测试结果与仿真结果吻合良好, 验证了该设计的可行性。

关键词: 整流天线; 轻薄; 圆极化; 共面波导; 谐波抑制

中图分类号: TN822⁺.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1060

Light weight rectenna fed by CPW with function of harmonic suppression

LIU Yilin, LI Lu, LI Jun, HUANG Kama*, YANG Yang

(School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A novel circularly polarized rectenna with function of harmonic suppression is designed. The rectifier is directly integrated on the ground plane of the receiving antenna. The circularly polarized rectenna has the characteristics of light weight, compact size, low profile, and is easy to be conformed with the surface of aero-crafts. The rectenna works at 5.8 GHz and is fed by Coplanar Waveguide(CPW) coupling, which results in a broad working bandwidth. A Compact CPW Resonant Cell(CCRC) is directly loaded into the feeding to suppress the high order harmonics. The designed rectifier circuit adopts voltage doubling, and uses two chip capacitors for DC filtering and has a simple structure. The proposed rectenna has a compact structure and a 0.5 mm thick profile. Furthermore, the mass of the proposed design is only 6.28 g and the optimum rectification efficiency is 63.84%. The test results are in good agreement with the simulation results, which verifies the feasibility of the design.

Keywords: rectenna; lightweight; circularly polarization; coplanar waveguide; harmonic suppression

微波无线能量传输(Microwave Power Transmission, MPT)是一种以微波作为能量传输媒介, 进行远距离无线输能的系统, 可广泛用于地对地、地对空无线充电及无线传感网络中。随着 MPT 系统的发展, 地对地的定点无线输能系统已趋向完善, 越来越多的研究开始倾向于对移动目标, 如平流层飞艇、无人机等临近空间飞行器的无线输能。由于这类飞行器的载荷普遍有限, 并且在不断运动, 因此要求搭载的整流天线具有圆极化、高增益、质量轻、体积小以及易于飞行器表面共形等特点^[1-2]。圆极化天线可以接收任意线极化及同样旋向圆极化的入射电磁波, 保证飞行器在移动时不间断供能^[3-5]。为了增加整流天线的功率质量比, 最直观的方式是减小天线尺寸并降低天线剖面厚度。传统的微带馈电整流天线在天线剖面厚度降低时, 工作带宽会相应下降, 其轴比带宽往往不足 1%。同时传统微带天线通常将接收天线及整流电路置于介质板同一侧, 这样的好处是整流天线设计难度低, 但缺点是接收天线与整流电路之间容易相互干扰, 影响整流天线性能。为克服微带天线低剖面时带宽不足的缺点, 可以使用具有宽带特性的宽缝天线或印刷单极子作为接收天线^[6-10]。但这类天线具有双向辐射特性, 增益普遍较低, 不利于整流效率提升。同时, 双向辐射特性也更容易干扰临近电子设备, 从而导致系统整流效率的下降。

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61701326); 装备预研教部联合基金(青年人才)资助项目(6141A02033506)

*通信作者: 黄卡玛 email: huangkamascu@21cn.com

为保证整流天线在拥有充足工作带宽的同时拥有足够的增益, 本文采用共面波导设计接收天线及整流电路。共面波导馈电背馈微带天线类似于口径耦合天线^[11], 其结构更加简单, 不需要使用多层板, 整体结构仅需双面金属的单层介质板。电磁能量由下层金属版上的槽线缝隙耦合到上层金属贴片, 由于接地板开缝的原因, 上下两层金属版构成的腔体对电磁波的束缚能力降低, 腔体的品质因数下降, 从而可以提供更宽的工作带宽^[12]。

为方便与接收天线集成, 整流电路同样采用共面波导结构, 并使用集总元件进行匹配及滤波。由于共面波导信号导带与接地板处于同一平面, 极大地方便了集总原件的焊接, 不需要采用过孔及绕线等接地方式, 一定程度上降低了电路寄生参数, 提升了整流效率^[13]。整流电路直接集成在接收天线接地板上构成整流天线, 避免了 SMA 接头的使用。接收天线辐射贴片的接地面同时也是馈电网络及整流电路的载体, 这样的结构可以最大限度利用现有空间, 有利于减小天线质量并使天线结构更为紧凑, 非常适合载荷有限的飞行器使用。

1 圆极化接收天线设计

文献[12]中成功设计了一款共面波导馈电的 2×2 圆极化天线阵列。该阵列采用共面波导—槽线转换结构, 实现天线馈电网络, 具有宽带, 尺寸小, 剖面厚度低等特点。但该阵列采用双馈法实现圆极化, 因此馈电网络较为复杂, 同时其为非标准矩形阵列, 阵因子较不稳定, 不利于扩展为更大规模的接收阵列。该阵列天线不具备谐波抑制功能, 不能直接作为整流天线接收端使用。本文优化了阵列馈电网络结构, 采用单馈微扰法实现圆极化辐射, 阵列天线馈电网络更为简单紧凑。同时, 对阵列天线的高次谐波进行抑制, 并进一步降低天线剖面厚度, 使其更便于与飞行器表面共形。为抑制天线的高次谐波, 在天线馈线中直接插入共面波导谐振结构(CCRC)^[14-15], 在不增加天线尺寸的同时成功抑制了二次及三次谐波。加载 CCRC 的圆极化整流天线使用 0.5 mm 厚度, 介电常数为 4.4 的 TP2-440 型介质板设计, 其结构见图 1。

共面波导谐振结构见图 2, 具有简单对称、插入损耗低等优点。调整其长度 L_1 , 可以有效抑制二次谐波。为改善对三次谐波的抑制, 在 CCRC 后再加入一段 U 型槽缝, U 型缝隙的总长度($L_2 + 2 \times L_3$)近似于三次谐波在介质板中的传输波长。最终的 CCRC-U 型谐振结构可以直接加载在天线阵列的馈线中而不用改变天线其余结构参数, 其 S 参数仿真结果见图 3。加载 CCRC-U 后的天线阵列 S_{11} 结果见图 4。通过测试, 二次与三次谐波处的实测反射系数分别为 -0.91 dB 与 -2.01 dB, 谐波抑制情况良好, 测试与仿真误差来源于柔性介质板的形变以及 SMA 接头焊接带来的寄生参数影响。天线在 5.8 GHz 处的 S_{11} 低于 -20 dB, 阻抗带宽约为 460 MHz(5.61~6.07 GHz)。

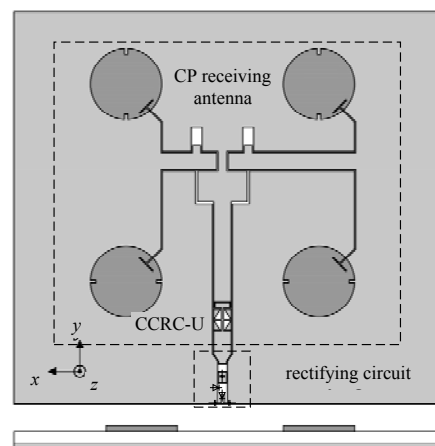


Fig.1 Basic structure of the rectenna
图1 整流天线基本结构

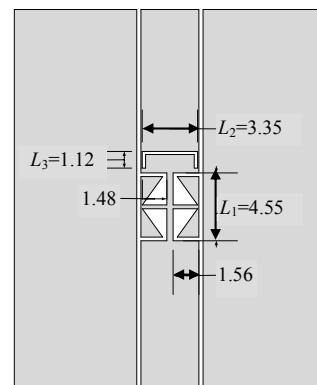


Fig.2 Structure of the CCRC-U
图2 紧凑型共面波导谐振结构

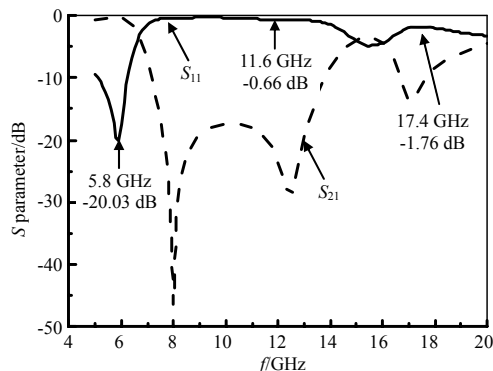


Fig.3 Simulated S parameters of the CCRC-U
图3 CCRC-U S 参数仿真结果

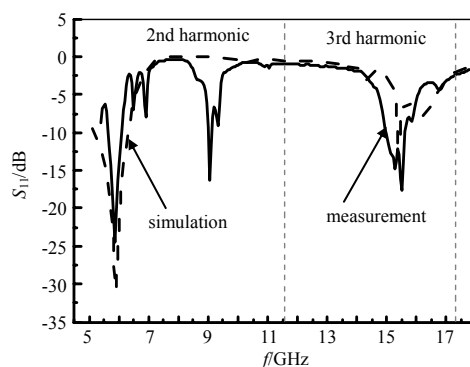


Fig.4 Simulated and measured S_{11} of the proposed CP antenna
图4 圆极化接收天线 S_{11} 仿真与测试结果仿真结果

圆极化天线的轴比(Axial Ratio, AR)、增益与方向图在微波暗室通过标准线极化喇叭测得。其轴比与增益情况见图 5, 天线 3 dB 轴比带宽约为 170 MHz(5.70~5.87 GHz), 5.8 GHz 时的实测增益为 9.45 dBi, 具有高增益与宽带的优点。天线在 $x-o-z$ 与 $y-o-z$ 两个平面的方向图见图 6, 其主辐射方向略偏于 z 轴正方向, 这是由天线馈电网络的不对称性导致的。

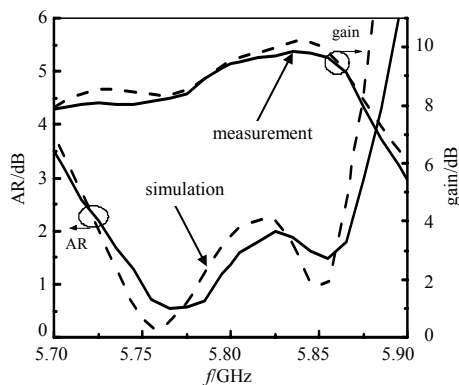


Fig.5 Ratio of axis versus frequency
图 5 轴比随频率变化的曲线图

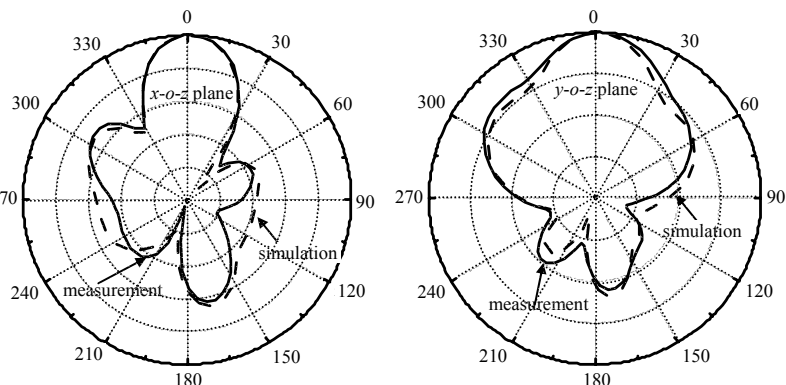


Fig.6 Radiation pattern
图 6 辐射方向图

2 倍压整流电路设计

当一些场合需要用到较高的电压, 但单只二极管又无法提供足够电压时, 可以使用倍压整流电路。由于共面波导信号导带与接地板共处同一平面, 倍压整流电路可以通过集总元件很容易地实现, 其 ADS 仿真原理图与结构图分别见图 7 和图 8。电路使用 2 个并联电容构成直通滤波器, 通过调整二极管后端共面波导的特性阻抗(W_3)与传输线长度(L_6)使得直通滤波器只允许直流通过, 抑制高次谐波, 直通滤波器后连接负载电阻; 在二极管前段为高低阻抗匹配电路, 取消了前置低通滤波器, 滤波功能可由具有谐波抑制功能的接收天线代替, 这样可以最大程度缩小电路尺寸。

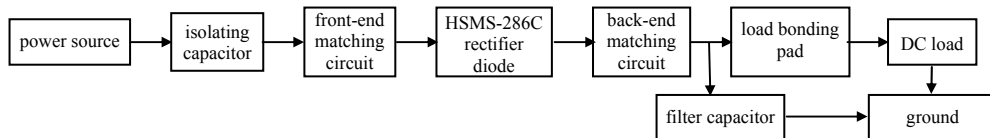


Fig.7 Schematic diagram of simulation
图 7 整流电路仿真原理图

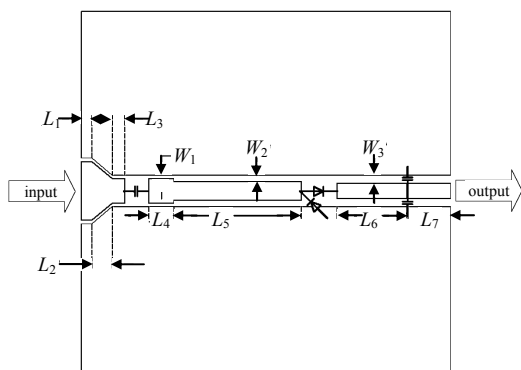


Fig.8 Layout of the rectifying circuit
图 8 整流电路版图

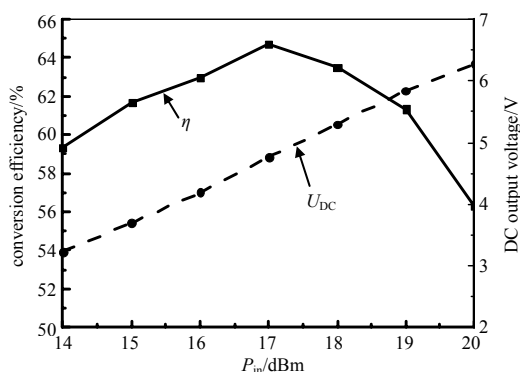


Fig.9 Measured results of the proposed rectifying circuit
图 9 倍压整流电路整流效率与直流电压测试结果

图 9 为频率为 5.8 GHz、负载 R_L 为 700 Ω 时电路的整流效率和直流电压随输入功率的变化曲线。可以看出, 随着输入功率的增加, 直流输出电压增大, 当输入功率为 17 dBm 时, 整流效率达到最大值 64.71%。当输入功率大于 17 dBm 时, 直流输出电压增加减缓, 整流效率开始下降。

3 圆极化整流天线设计

将圆极化接收天线与倍压整流电路相结合, 可得到圆极化集中式整流天线。采用厚度 0.5 mm 的 TP2-440 介

质板(介电常数 4.4, 损耗角内切 0.000 3)加工, 为了抑制共面波导奇模式, 将接收天线与整流电路连接处共面波导两侧的接地板短接, 以保证天线与电路正常工作。整流天线工作在 5.8 GHz, 总重 6.28 g, 天线面密度 0.095 g/cm²。

整流天线的射频—直流转换效率为终端负载 R_L 上得到的直流功率与接收天线接收到的射频功率 P_r 的比值:

$$\eta = \frac{U_{DC}^2 / R_L}{P_r} \times 100\% \tag{1}$$

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R} \right)^2 \mu G_r G_t \tag{2}$$

式中: U_{DC} 为终端负载 R_L 上测得的直流电压; λ_0 为工作频率在自由空间中的波长; G_r 与 G_t 分别为接收天线与发射天线的增益; R 为两者之间的距离; μ 为极化失配因子。

整流天线在微波暗室中测试, 发射天线使用标准增益喇叭, 整流天线放置在喇叭天线远场。为验证天线的圆极化性能, 将接收天线绕轴线旋转不同角度(0°, 45°, 90°)进行测量。图 10 为整流天线旋转角度为 45°, 在不同负载 R_L 时, 实测整流效率与直流输出电压随输入功率密度变化曲线。可以看出, 整流天线效率随输入功率密度增加而增加, 达到最大值后开始下降。天线最佳匹配负载约为 1 kΩ, 最佳整流效率为 62.70%。固定 R_L 为 1 kΩ, 整流天线旋转角度为不同值时的测试结果见图 11。其中旋转角为 0° 时有最佳整流效率 63.84%。

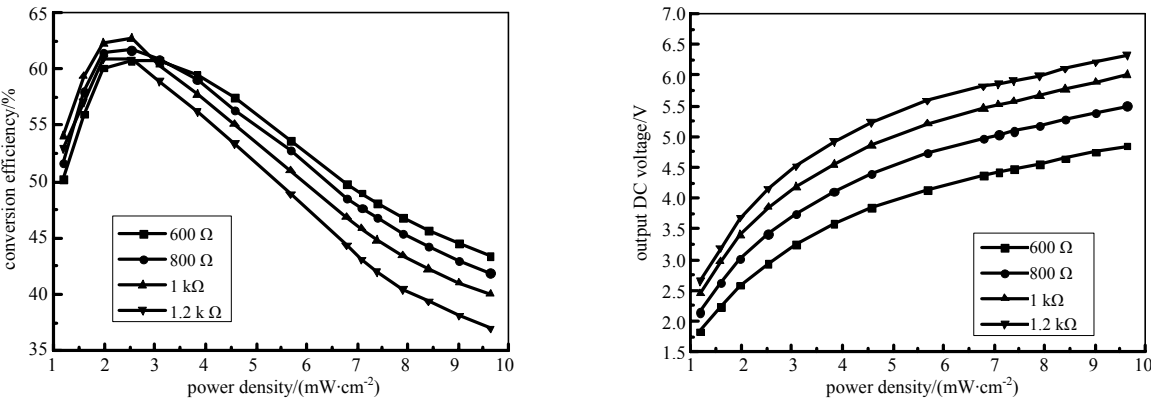


Fig.10 Measured conversion efficiency and DC voltage versus receiving power for various resistive loadings
图 10 整流天线整流效率与直流输出电压随功率密度变化关系

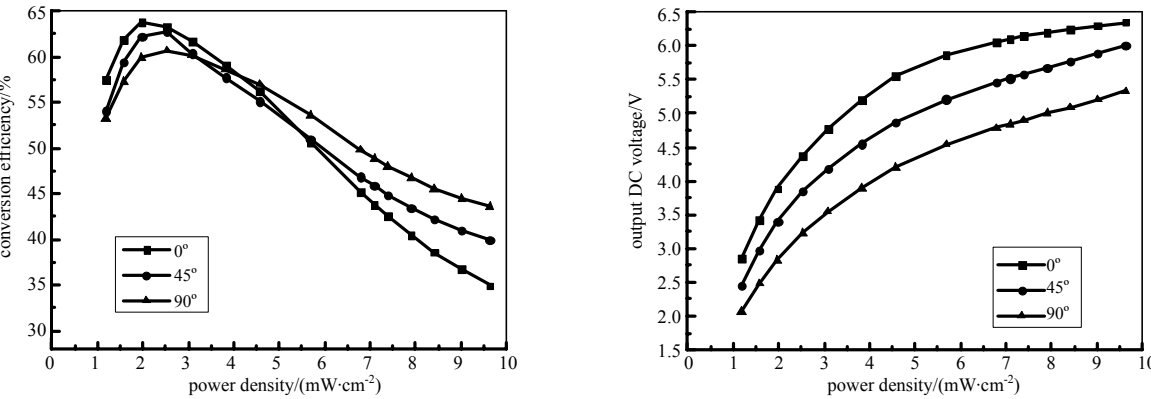


Fig.11 Measured conversion efficiency and DC voltage versus receiving power for various rotation angles
图 11 不同放置角度时整流效率与直流输出电压随功率密度变化关系

表 1 对比了本设计与其他文献中整流天线的各项数据, 可以看出本文设计的整流天线为圆极化天线, 相较线极化天线更适合于移动目标的无线供能。同时, 该设计具有更低的剖面厚度与较宽的工作带宽。本文设计的整流效率较低, 这是由于整流电路为倍压整流形式, 使用了大量的集总元件。集总元件焊接带入的寄生参数会降低电路性能, 可通过设计更好的电路结构来获得更高的整流效率。

表 1 整流天线性能对比

Table1 A comparison of the proposed design with other rectennas					
	working frequency/GHz	polarized	impedance bandwidth/%	thickness	conversion efficiency/%
this work	5.80	CP	8.0	0.010 λ_0	63.84
Ref. [10]	5.80	LP	3.0	0.015 λ_0	72.50
Ref. [11]	5.80	LP	8.0	0.091 λ_0	68.50
Ref. [13]	2.45	LP	28.6	0.200 λ_0	72.00

4 结论

本文提出了一种轻薄共面波导圆极化整流天线, 天线采用共面波导耦合馈电, 相比较传统微带结构的圆极化天线具有更好的鲁棒性。通过在接收天线后端加载倍压整流电路构成了圆极化整流天线, 天线剖面厚度 0.5 mm, 质量仅 6.28 g, 最佳整流效率达到 63.84%。该设计具有结构紧凑、轻薄、整流效率高等优点, 非常适合于载荷有限的近地飞行器使用。

参考文献:

- [1] TAKHEDMIT H, CIRIO L, BELLA S, et al. Compact and efficient 2.45 GHz circularly polarised shorted ring-slot rectenna[J]. Electronics Letters, 2012, 48(5): 253–254.
- [2] LEE C H, CHANG Y H. Design of a broadband circularly polarized rectenna for microwave power transmission[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(3): 702–706.
- [3] HAROUNI Z, CIRIO L, OSMAN L, et al. A dual circularly polarized 2.45 GHz rectenna for wireless power transmission[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10): 306–309.
- [4] YANG Y, LI L, LI J, et al. A circularly polarized rectenna array based on substrate integrated waveguide structure with harmonic suppression[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(4): 684–688.
- [5] YANG Y, LI L, LI J, et al. A 5.8 GHz circularly polarized rectenna with harmonic suppression and rectenna array for wireless power transfer[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(7): 1276–1280.
- [6] JIA Y, LIU Y, GONG S. Slot-coupled broadband patch antenna[J]. Electronics Letters, 2015, 51(6): 445–447.
- [7] ELLIS M S, ZHAO Z, WU J, et al. Small planar monopole ultra-wideband antenna with reduced ground plane effect[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, 9(10): 1028–1034.
- [8] 李路, 刘一麟, 李君, 等. 一种具有谐波抑制功能的圆极化天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 298–301. (LI Lu, LIU Yilin, LI Jun, et al. Harmonic suppression circularly polarized antenna based on SIW[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(2): 298–301.)
- [9] 李君, 刘一麟, 李路, 等. 具有谐波抑制功能的宽带圆极化宽缝天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1): 101–104. (LI Jun, LIU Yilin, LI Lu, et al. Wideband circularly polarized slot antenna with harmonic suppression[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1): 101–104.)
- [10] CHIN C H K, XUE Q, CHAN C H. Design of a 5.8 GHz rectenna incorporating a new patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4(1): 175–178.
- [11] YU C, TAN F, LIU C. A C-band microwave rectenna using aperture-coupled antenna array and novel Class-F rectifier with cavity[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29(8): 977–991.
- [12] LIU Y, HUANG K, LUO X. Circularly polarized antenna array fed by air-bridge free CPW-slotline network[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2017(5): 1–11.
- [13] NIE M J, YANG X X, TAN G N, et al. A compact 2.45-GHz broadband rectenna using grounded coplanar waveguide[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14): 986–989.
- [14] KURGAN P, FILIPCEWICZ J, KITLINSKI M. Development of a compact microstrip resonant cell aimed at efficient microwave component size reduction[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012, 6(12): 1291–1298.
- [15] XUE Q, MO T T, SHUM K M, et al. Characteristics of a compact CPW resonant cell[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 37(6): 408–410.

作者简介:



刘一麟(1990–), 男, 兰州市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为平流层飞行器无线能量传输系统与电磁兼容, 主攻方向为轻薄共形圆极化天线及高效率整流电路设计。
email: 543786751@qq.com.

黄卡玛(1964–), 男, 重庆市人, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 973 计划首席科学家, 主要研究方向为微波能基础理论与创新应用。

李路(1993–), 女, 河南省安阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线能量传输。

李君(1991–), 女, 河南省濮阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线能量传输。

杨阳(1983–), 男, 重庆市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微波测量、微波化学以及微波功率合成。