

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.014

一种轻薄型共面波导圆极化整流天线

刘一麟, 黄卡玛, 李路, 李君

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 本文设计了一款应用于近地飞行器的轻薄圆极化整流天线, 飞行器普遍载荷有限, 且在不断地运动, 因此要求整流天线具有圆极化、重量轻、体积小、剖面低、易与飞行器表面共形等特点. 本文设计的整流天线工作在 5.8 GHz, 采用共面波导耦合馈电, 具有较宽的工作带宽. 后端整流电路采用串联二极管形式, 并利用共面波导低通滤波器进行直流滤波, 不需要使用任何集总元件. 该整流天线结构紧凑, 全重仅 1.98 g, 剖面厚度 0.5 mm, 最佳整流效率 71.22%. 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: 共面波导; 圆极化; 低剖面; 轻薄; 低通滤波器

中图分类号: TN822+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0739-06

CPW-Fed light-weight circularly polarized rectenna

LIU Yi-Lin, HUANG Ka-Ma, LI Lu, LI Jun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In this paper, a thin circular polarization rectenna for near space aircrafts is designed. Since aircrafts are generally limited in load and moving continuously, the rectenna should have the characteristics of circular polarization, light weight, small volume, low profile, and is easy to be conformed to the surface of aircrafts. The rectenna designed in this paper works at 5.8 GHz and is fed by coplanar waveguide (CPW), which has a wide bandwidth. The rectifier circuit adopts series diode form, and uses CPW low-pass filter for DC filtering without using any lumped elements. The designed rectenna, which only weighs 1.98 g, has a compact structure and a 0.5 mm thick profile, and the optimum rectification efficiency is 71.22%. The test results are in good agreement with the simulation results, which verifies the feasibility of the design.

Keywords: Coplanar waveguide; Circular polarization; Low profile, Light weight; Low pass filter

1 引言

微波无线能量传输 MPT (Microwave Power Transmission) 作为无线能量传输方式的一种, 以微波作为能量传输媒介, 广泛应用于太阳能卫星电站、分布式可重构卫星系统、临近空间飞行器供能和无线传感网络中. 在地对空无线输能时, 为了避免发射天线与接收天线之间因极化失配造成的能

量损失, 天线多采用圆极化型式^[1,2]. 圆极化整流天线可以接收任意线极化及同样旋向的圆极化的入射电磁波, 不需要接收天线与发射天线的严格极化对准, 可以保证对近地飞行器不间断供能^[3]. 为了降低整流天线的重量与尺寸, 提升天线的功质比, 最直接的方式是降低天线的剖面厚度, 使天线结构尽量紧凑, 同时保证足够的定向辐射性. 在此前提下, 传统微带结构的整流天线受限于其强谐

收稿日期: 2017-12-01

基金项目: 装备预研教部联合基金(青年人才)(6141A02033506)

作者简介: 刘一麟(1990-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 主要研究方向为无线能量传输. E-mail: 543786751@qq.com

通讯作者: 黄卡玛. E-mail: kmhuang@scu.edu.cn

振、高 Q 值的特点,不能提供足够的工作带宽及鲁棒性,很难满足工程需求. 为了克服上述困难,本文将共面波导应用于圆极化整流天线设计中,共面波导相比微带线具有更加良好的色散特性,有利于提升天线的工作带宽^[4];同时,共面波导特性阻抗对介质板厚度变化不明显,有利于降低天线剖面厚度;最后,共面波导信号导带与接地板处于同一平面,不需要使用额外的过孔与绕线结构,有利于降低整流电路中的寄生参数,提升电路整流效率.

目前,整流天线多为传统的微带线型式^[5-6],基于共面波导结构的整流天线较少,仅有的研究也均为线极化的背覆金属共面波导 GCPW(Grounded Coplanar Waveguide)型式^[7,8]. GCPW 与微带线类似,具有上下两层金属接地板,两层接地板之间需要金属过孔短接来抑制平行板模式,金属使用量较大,不利于天线的轻质化^[9]. 本文设计的圆极化整流天线基于常规单金属层共面波导 CPW(Coplanar Waveguide),结构简单紧凑,功质比高,非常适合载荷有限的飞行平台使用.

2 整流天线基础结构与原理

整流天线由具有谐波抑制功能的接收天线、整流电路以及负载组成^[10,11]. 接收天线一般抑制二到三次谐波,用于接收微波能量,整流电路用于将接收到的微波能量转换为直流能量并提供稳定的直流输出,由于接收天线已经起到了低通滤波功能,因此整流电路的尺寸得以缩减^[12]. 根据整流电路中二极管的连接方式,需要选择合适的接收天线类型. 当整流电路中的二极管为并联连接时,接收天线端口处应该为直流断路情况,否则直流分量被天线短路,负载上得不到直流输出;当整流电路中的二极管为串联连接时,天线端口处应该为直流短路情况,与二极管、直流负载构成直流回路,使整流电路正常工作,输出直流电压. 如果此时天线端口为直流断路情况,可以通过在整流电路中添加直通电感或者短路枝节的方式构成直流回路,使整流电路正常工作^[13]. 本文设计的整流电路采用串联二极管型式,整流天线基本结构图如图 1 所示.

3 整流天线设计

3.1 圆极化接收天线设计

圆极化辐射单元的结构如图 2 (a) 所示,天线辐射单元与共面波导-槽线馈电网络分别置于介质板正反两侧,采用共面波导-槽线 T 型功分对圆形

贴片进行馈电,通过调节两根槽线的长度,使得两个槽线输出端口的相位相差 90° ,即可以在圆形贴片上激励起两个幅度相等,相位相差 90° 的正交模式,实现圆极化辐射. 天线采用圆形辐射贴片,自身具有一定的谐波抑制功能,其仿真与测试的 S 参数如图 2 (b) 所示,实测天线的阻抗带宽约为 150 MHz(5.72 GHz ~ 5.87 GHz),在 11.6 GHz 与 17.4 GHz 处的反射系数分别为 -1.02 dB 与 -1.46 dB,可以一定程度抑制高次谐波. 辐射单元设计使用厚度 0.5 mm,介电常数为 3.5 的介质板,并通过 HFSS 进行仿真优化.

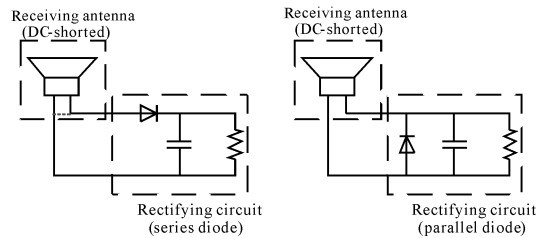
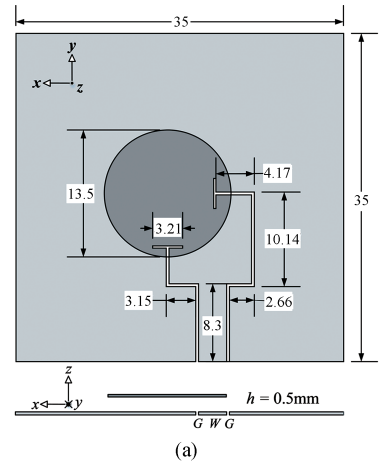
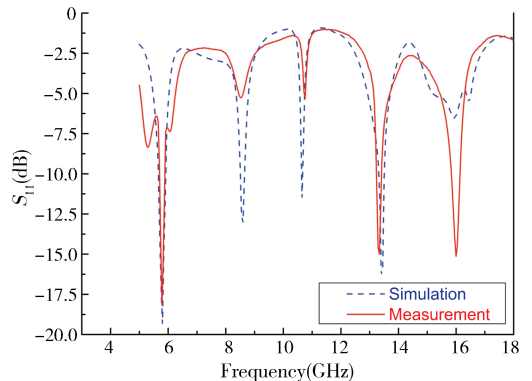


图 1 整流天线基本结构

Fig. 1 Basic structure of rectenna



(a)



(b)

图 2 天线结构图与回波损耗随频率变化曲线

Fig. 2 Antenna structure diagram and return loss versus frequency

圆极化天线的轴比与方向图通过椭圆极化分解理论在微波暗室中测得,通过测试三个或更多不同的角度的极化分量,即可得到天线的轴比信息,天线仿真与测试的轴比与频率的关系曲线如图 3 所示.天线的轴比带宽约为 46 MHz(5.776 GHz~5.822 GHz).天线方向图如图 4 所示,天线主辐射方向略偏于 z 轴正方向,这是由于馈电网路的不对称性导致的.天线拥有很低的后瓣辐射,很高的前后比以及很高的极化纯度,达到设计目的.

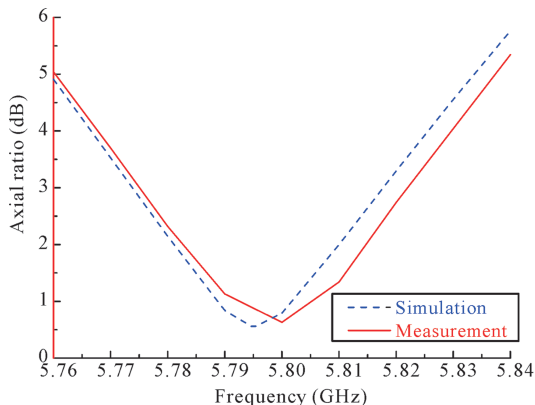


图 3 天线轴比测试与仿真结果

Fig. 3 Measured and simulated axial ratio of the antenna

3.2 共面波导整流电路设计

本文采用 HSMS-286C 串联二极管形式的整流电路.第 3.1 节中的圆极化天线在天线馈线端为直流短路,为后端电路提供了直流通路,因此可以省去串联二极管整流电路的并联电感部分.同时,放弃使用电容作为直通滤波器,采用共面波导直通滤波器,进一步减少了集总元件的使用,可以降低集总元件封装以及焊接引入的寄生参数,提升了整流电路效率.提出的共面波导直通滤波器如图 5 所示,其主要由两对“L”型狭缝构成,狭缝槽的间距主要产生电容效应,而被狭缝所分离的窄共面波导线则表现为电感特性.因此每对“L”型狭缝可以等效为一个并联的电容电感网络,可以实现其谐振频率上的传输零点.“L”型狭缝可以蚀刻在共面波导导带上,也可以对称蚀刻在两边接地板上.导带上较短的“L”型狭缝用来抑制 11.6 GHz 的二次谐波,而两侧接地板上较长的狭缝用来抑制 5.8 GHz 的基波.为了减小滤波器尺寸,对接地板上狭缝进行弯折处理.ADS 仿真结果表示,在基波与二次谐波处的反射系数均高于 -0.2 dB,而直流分量可以顺利通过滤波器,滤波器性能良好.

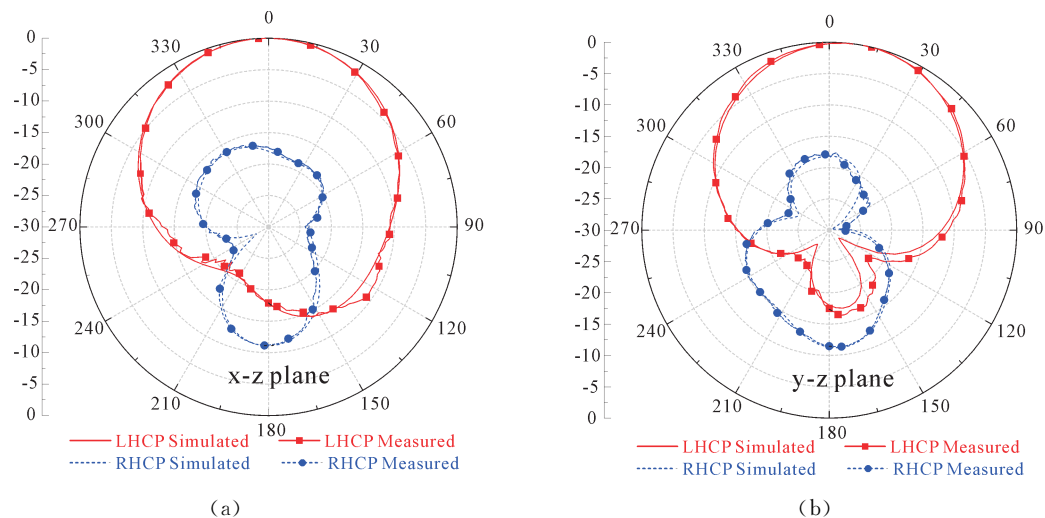


图 4 5.8 GHz 时圆极化天线在 $x-z$ 平面与 $y-z$ 平面的辐射方向图

Fig. 4 Radiation patterns of the circularly polarized antenna in $x-z$ plane and $y-z$ plane

共面波导整流电路由匹配电路、二极管、输出直通滤波器和直流负载四部分组成.具有谐波抑制功能的圆极化接收天线除了接收自由空间中的微波能量,同时也作为整流电路的前端低通滤波器,其与后端直通滤波器的作用在于反射由二极管非线性效应产生的高次谐波分量,使它们反复经过二极管整流以增加直流输出功率,提高整流效率.

整流电路 ADS 仿真原理图如图 6 所示,在仿

真时,使用一个理想电感模拟天线输入端直流短路.通常情况下,为了方便匹配,天线的输入阻抗与整流电路的输入阻抗均选取 50Ω .实际情况中,二者输入阻抗很难设计为纯实数,往往含有虚部成分,可通过 HFSS 软件提取天线输入阻抗后导入 ADS 软件中 DAC 元件进行联合仿真,使天线与整流电路之间达到最佳匹配.为了使之后的整流天线更加紧凑,在整流电路前段加入一个共面波导直角

弯折结构,降低整流天线的纵向长度.通过 ADS 优化电路整流效率后与圆极化接收天线相结合,合理布局后的整流天线版图如图 7 所示.

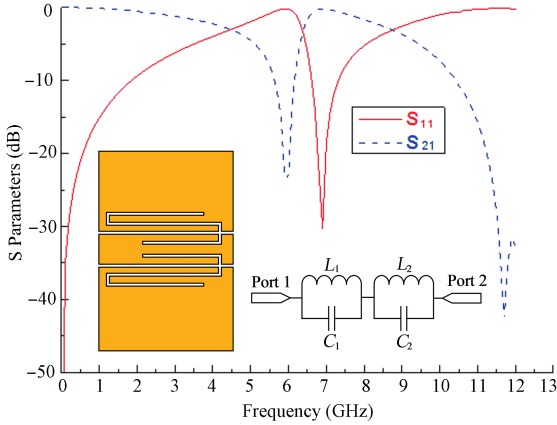


图 5 共面波导直通滤波器及 S 参数仿真结果
Fig. 5 CPW DC pass filter and the simulated S parameters

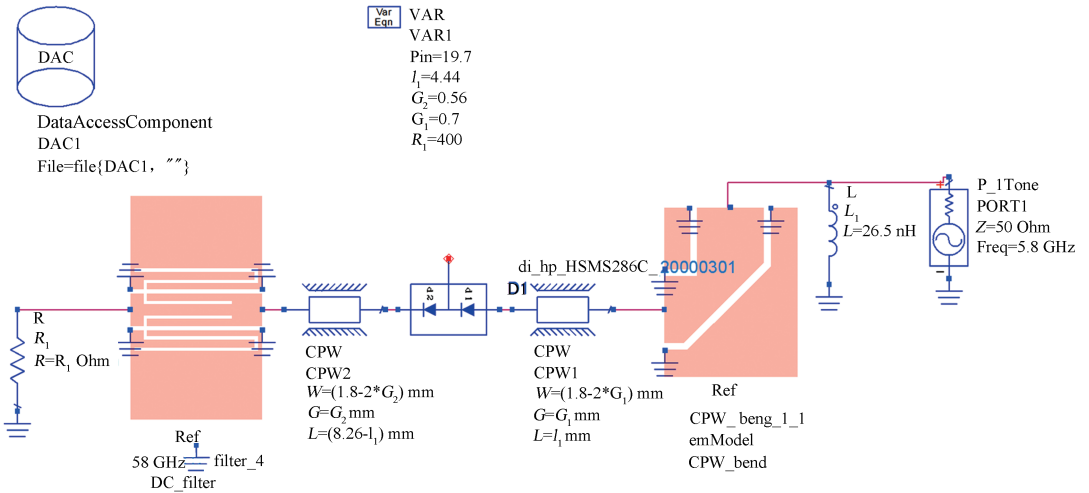


图 6 整流电路 ADS 仿真原理图
Fig. 6 ADS simulation schematic diagram of the rectifier circuit

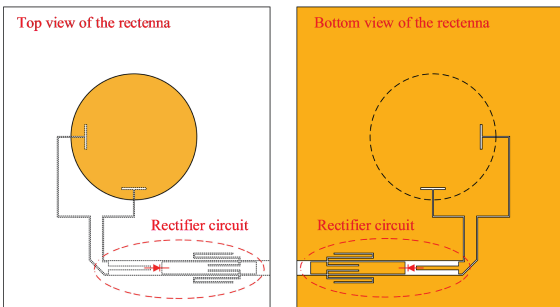


图 7 整流天线版图
Fig. 7 Layout of the proposed rectenna

4 圆极化整流天线测试结果

制作完成后的整流天线如图 8 所示,整流天线结构简单,除串联 HSMS-286C 二极管外不使用任何表面器件,最大限度降低了集总元件带来的寄生参数,同时利用共面波导直通滤波器进行直流滤波,提升了整流效率.在共面波导直角弯折的两个端口加载短路导线将两侧接地板短路,以抑制共面波导奇模式,保证圆极化天线与整流电路正常工作.同样,直流输出端的共面波导两侧接地板也通过导线短路,以保证两侧平行接地板的电势平衡.整流天线剖面厚度 0.5 mm,总重 1.98 g,天线面密度 0.162 g/cm².

整流天线的射频-直流转换效率为终端负载 R_L 上的到的直流功率与接收天线接收到的射频功率 P_r 的比值.

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

其中, P_r 可以通过 Friis 传输公式得到; V_{DC} 为终端负载 R_L 上测得的直流电压.

整流天线在微波暗室中进行测试,测试系统如图 9 所示.发射天线使用线极化标准增益喇叭,微波功率源的输出功率经过放大器放大后经过定向耦合器馈入喇叭天线.整流天线放置在喇叭天线远场,为了验证天线的圆极化性能,将接收天线绕轴线旋转不同角度 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 进行测量.

$$\eta_{MW-DC} (\%) = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{P_r} \times 100\% \quad (1)$$

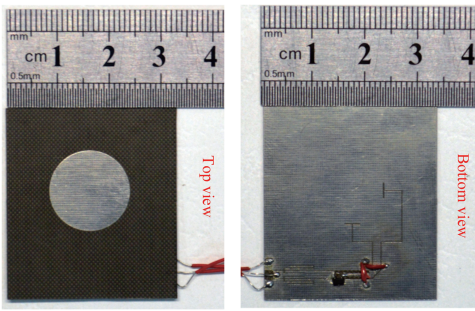


图 8 整流天线实物图

Fig. 8 Photo of the proposed rectenna

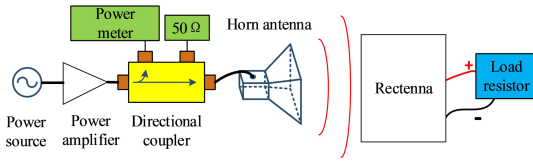
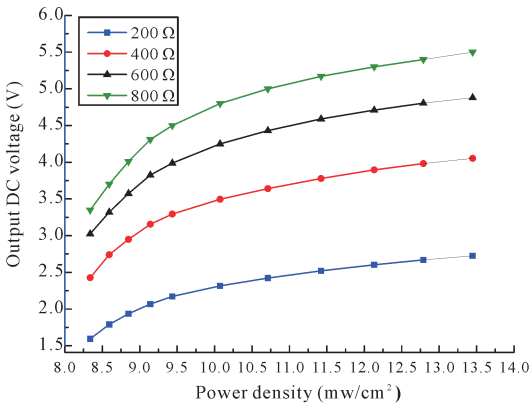


图 9 整流天线测试系统

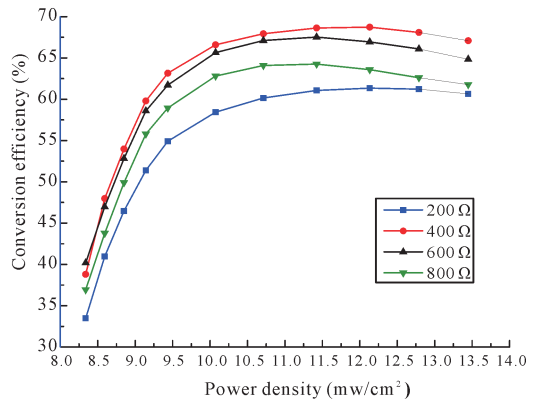
Fig. 9 Measurement setup of the proposed rectenna

图 10 给出了当整流天线旋转角度为 45° , 在不同负载 R_L 时, 直流输出电压与整流效率的测试结果随输入功率密度变化曲线. 可以看出, 整流天线输出电压随功率密度与直流负载电阻值增加而增加, 最佳匹配负载约为 400Ω , 最佳整流效率为 68.73% , 对应的直流输出功率为 37.959 mW . 固定终端负载为 400Ω , 整流天线旋转角度为不同值 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 时的测量结果如图 11 所示. 其中旋转角为 0° 时有最佳整流效率 71.22% , 对应直流输出 47.99 mW .

表 1 对比了本设计与其他文献中整流天线单元的各项数据, 可以看出, 本文设计的整流天线具有紧凑的结构与较低剖面厚度, 同时具有较高的整流效率, 实现了圆极化整流天线的小型化与轻薄化.



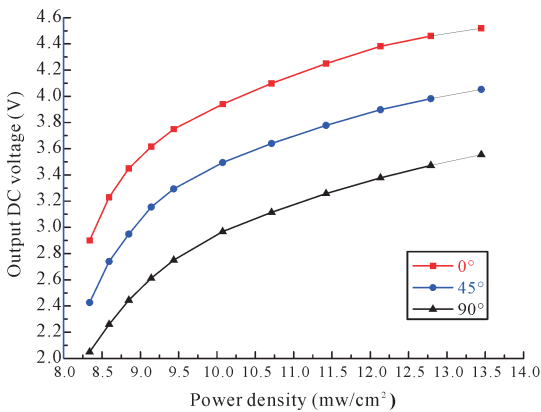
(a)



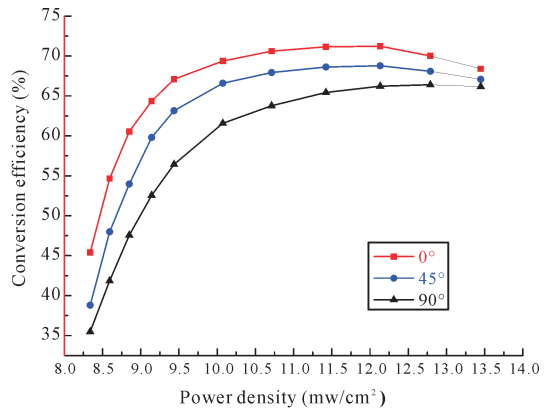
(b)

图 10 不同负载时整流天线直流输出电压与整流效率随功率密度变化关系

Fig. 10 Measured DC voltage and conversion efficiency versus receiving power for various resistive loading



(a)



(b)

图 11 不同放置角度时直流输出电压与整流效率随功率密度变化关系

Fig. 11 Measured DC voltage and conversion efficiency versus receiving power for various rotation angle

表 1 整流天线性能对比

Tab. 1 A comparison of the proposed design with other rectifiers

天线类型	工作频率 (GHz)	整流效率 (%)	剖面厚度 (mm)
本文设计	5.8	71.2	0.5
文献 [7]	2.45	72.5	1.5
文献 [8]	5.8	68.5	0.76
文献 [10]	5.8	72.0	4.7
文献 [11]	5.8	82.0	0.25

5 结 论

综上所述,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,并使用双馈点法实现圆极化辐射,相比较传统微带结构的圆极化天线具有更宽的工作带宽及更好的鲁棒性。通过在接收天线后端加载串联二极管整流电

路构成了圆极化整流天线,天线剖面厚度 0.5 mm,全重仅 1.98 g,最佳整流效率达到 71.22%。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] Song C, Huang Y, Carter P, *et al.* A novel six-band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2016, 64: 3160.
- [2] Mei H, Yang X, Han B, *et al.* High-efficiency microstrip rectenna for microwave power transmission at Ka band with low cost[J]. *IET Microw Antenn P*, 2016, 10: 1648.
- [3] 朱文静,张海平,赵鹏,等. 低剖面宽带圆极化天线阵列[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, 15: 622.

- [4] Li W M, Liu B, Zhao H W. The U-shaped structure in dual-band circularly polarized slot antenna design [J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2014, 13: 447.
- [5] Lu P, Yang X S, Wang B Z. A Two-Channel frequency reconfigurable rectenna for microwave power transmission and data communication [J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2017, 65: 6976.
- [6] Shen S, Chiu C Y, Murch R D. A Dual-Port Triple-Band L-Probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting[J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2017, 16: 3071.
- [7] Nie M J, Yang X X, Tan G N, *et al.* A compact 2.45-GHz broadband rectenna using grounded coplanar waveguide[J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2015, 14: 986.
- [8] Chin C H K, Xue Q, Chan C H. Design of a 5.8-GHz rectenna incorporating a new patch antenna [J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2005, 4: 175.
- [9] Khan O, Meyer J, Baur K, *et al.* Hybrid thin film antenna for automotive radar at 79 GHz[J]. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2017, 65: 5076.
- [10] Yu C, Tan F, Liu C. A C-band microwave rectenna using aperture-coupled antenna array and novel Class-F rectifier with cavity[J]. *J Electromagnet Wave*, 2015, 29: 977.
- [11] McSpadden J O, Fan L, Chang K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna[J]. *IEEE Trans Microw Theory*, 1998, 46: 2053.
- [12] Huang F J, Yo T C, Lee C M, *et al.* Design of circular polarization antenna with harmonic suppression for rectenna application [J]. *IEEE Antenn Wirel Pr*, 2012, 11: 592.
- [13] 冯小平,黄卡玛. 基于多层板过孔互连结构的小型化微波整流电路设计[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2017, 54: 1217.

引用本文格式:

中文:刘一麟,黄卡玛,李路,等. 一种轻薄型共面波导圆极化整流天线[J]. *四川大学学报:自然科学版*, 2018, 55: 739.

英文: Liu Y L, Huang K M, Li L, *et al.* CPW-Fed light-weight circularly polarized rectenna [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2018, 55: 739.