

DOI: 10.11991/ykj.202001020

一种用于微波无线能量传输的 S 波段圆极化整流天线设计

李勋勇, 许立强, 余泽, 刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

摘 要:在针对移动目标的微波输能 (wireless power transmission, WPT) 系统中, 适应移动目标方位变化是急需解决的问题。圆极化微波整流天线可以减小或避免极化失配对微波输能效率的影响。本文提出了一款新型共面带线 (coplanar stripline, CPS) 结构的高效微波整流电路, 与一对金属交叉偶极子直接连接, 组成 S 波段圆极化整流天线。该整流天线结构紧凑, 避免了同轴和微带结构, 提高接收整流效率。实验结果表明: 在 2.45 GHz, 圆极化天线 $|S_{11}|$ 为-13 dB, 轴比为 1.76 dB, 半功率波瓣宽度为 85.6°; 整流电路在输入功率为 16.3 dBm 和负载 250 Ω 时, 效率达到了 71.6%。该整流天线具有低成本、圆极化、易组阵等优点, 在移动目标 WPT 领域具有应用潜力。

关键词:微波无线能量传输; 交叉偶极子; 圆极化; 整流天线; 巴伦; CPS 传输线; 肖特基二极管; 整流效率

中图分类号: TN828.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)01-0055-05

Design of an S-Band circular polarized rectenna applied to microwave wireless power transmission

LI Xun Yong, XU Li Qiang, YU Ze, LIU Chang Jun

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In microwave wireless power transmission (WPT) systems for moving object, one of the problems to be urgently solved is to adapt to azimuthal angle variation of a moving object. Circular polarization rectenna is an efficient way to reduce or avoid the polarization mismatch in a WPT system. A novel high-efficiency rectifier based on coplanar strips (CPS) is presented. It connects a pair of crossed metal dipoles, forming a circular polarized antenna of S-band. No microstrip or coaxial interface is used, which leads to a facilitated structure with high conversion efficiency. The experiments show that the circular polarized antenna's $|S_{11}|$ is -13 dB at 2.45 GHz with an axial ratio of 1.76 dB. Its half power lobe width is 85.6°. The rectification circuit has an efficiency of 71.6% with the input power of 16.3 dBm and the load of 250 Ω . The rectenna has advantages of low cost, circular polarization, and easy array forming. It has potential applications in WPT systems for moving objects.

Keywords: microwave wireless power transmission; cross dipole; circular polarization; rectenna; balun; CPS transmission line; Schottky diode; rectification efficiency

微波无线能量传输 (wireless power transmission, WPT) 是将微波作为能量传输的载体, 用于实现能量无线传输的一种技术。在空间太阳能电站、空间电磁能量回收和移动无线充电等领域具有良好的应用前景^[1-3]。WPT 系统通常包括微波源、发射天线和整流天线, 其中整流天线是系统的核心器件之一, 核心指标是微波到直流的转化效率。

传统整流天线常采用天线和整流电路的分离设计, 天线多采用线极化天线。分离设计会导致

整流天线体积大^[4]; 极化匹配状态对线极化整流天线的效率影响很大^[5-6]。尤其在针对移动目标的无线能量传输应用中, 极化匹配的影响更高^[7]。因此, 迫切需要整流天线的一体化和圆极化设计。

本文提出了一款结构紧凑的基于 CPS 传输线的微波整流电路, 直接与交叉偶极子组成的圆极化天线连接, 实现了结构轻巧的圆极化整流天线。由于没有微带线和同轴结构, 避免了平衡与非平衡的变换, 该圆极化整流天线具有结构紧凑和效率高的特点。

1 圆极化天线设计

将一对偶极子交叉放置组成交叉偶极子天

收稿日期: 2020-01-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61931009).

作者简介: 李勋勇, 男, 硕士研究生;
刘长军, 男, 教授, 博士.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

线,具有结构简单、紧凑、重量轻等优点^[8-11]。偶极子天线的电长度 $\lambda/2$ 时,阻抗接近纯阻;当电长度大于或小于 $\lambda/2$ 时,其阻抗分别表现为感性或容性。偶极子上对应电流的相位存在滞后或者超前。优化尺寸使得偶极子上的电流相位差满足 90° ,可实现圆极化辐射。

交叉偶极子天线为平衡式结构,测量其天线性能时需要巴伦实现平衡变换。本文设计加工了一个巴伦,通过 CPW-CPS-CPW 背靠背的结构,进行测试。其模型和实物以及回波损耗仿真与实测对比如图 1 所示。巴伦使用 RF4 介质板,厚度为 0.6 mm,主要参数 w_{cpw} 、 g_{cpw} 、 s_{cpw} 和 w_{cps} 分别为 3.0、7.5、0.4 和 3.0 mm。

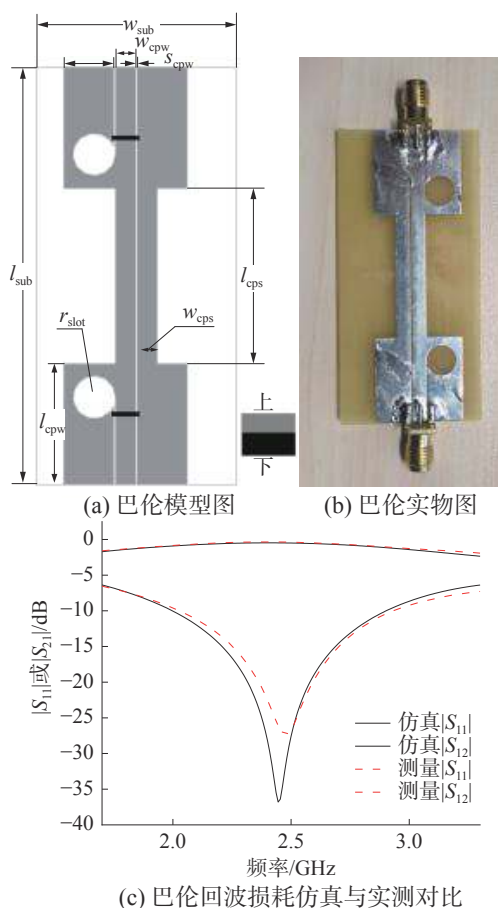


图1 巴伦模型和实物及回波损耗仿真和测量对比

本文设计的交叉偶极子天线辐射体采用直径为 1.2 mm、厚度为 0.2 mm 的空心铜管,具有导电性好、重量轻、机械强度高优点。利用偶极子长度和阻抗的关系,将两个不同长度的偶极子并联,使得它们在 2.45 GHz 产生 90° 的相位差,实现圆极化辐射。

在天线的下方约四分之一波长处添加了反射面,提高天线的增益,减小测量中环境对天线极化纯度的影响。金属反射面采用 PCB 工艺实现。天线的模型和实物如图 2 所示,天线最终的

尺寸经过 HFSS (high frequency structure simulator) 优化得到,其关键参数 l_1 、 l_2 、 l_{ref} 和 l_{cps} 分别为 27、34.5、120 和 16.5 mm。

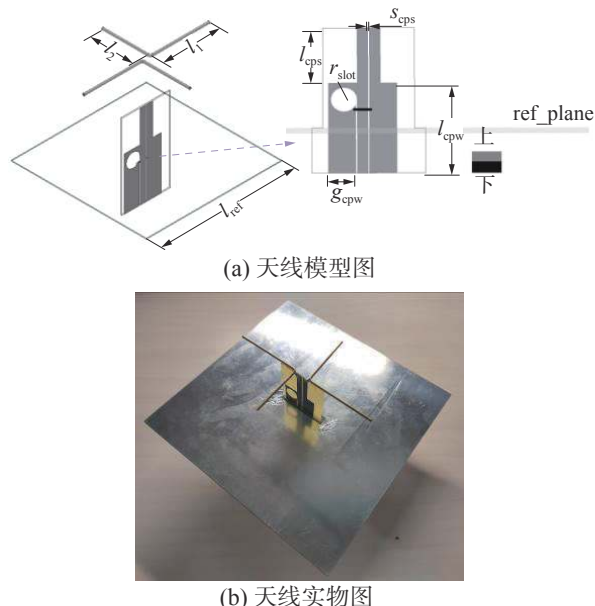


图2 天线的模型和实物

图 3 给出了天线 $|S_{11}|$ 和轴比的仿真和实测对比结果,由图 3(a)可知,在 2.03~3.08 GHz 的范围内 $|S_{11}|$ 均低于-10 dB,测试和仿真结果基本吻合。天线在 2.45 GHz 处,轴比随角度 θ 的变化如图 3(b)所示,其中 θ 为 0° 时,轴比为 1.76 dB。

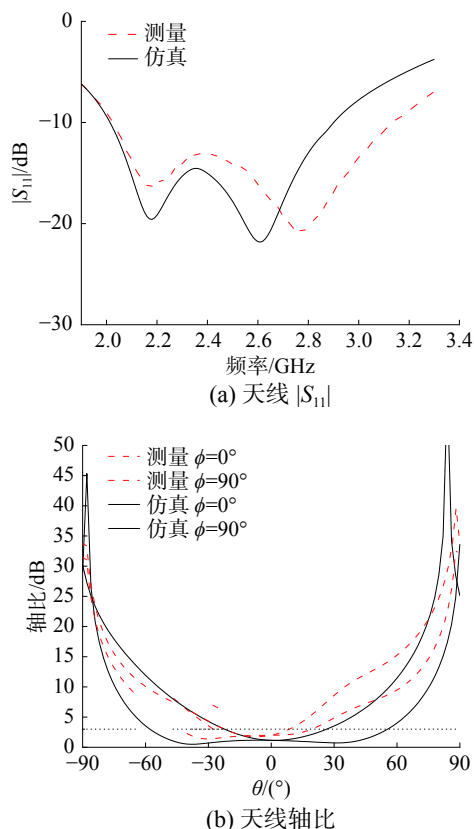


图3 天线 $|S_{11}|$ 及轴比仿真与测量

图 4 为天线 E-面和 H-面方向图的仿真和实测对比图。由于微波暗室测量过程中测量装置遮挡, 背向辐射测量值相比仿真值偏低。该天线在 2.45 GHz 处的增益为 5.64 dBi, 半功率波瓣宽度为 85.6°。

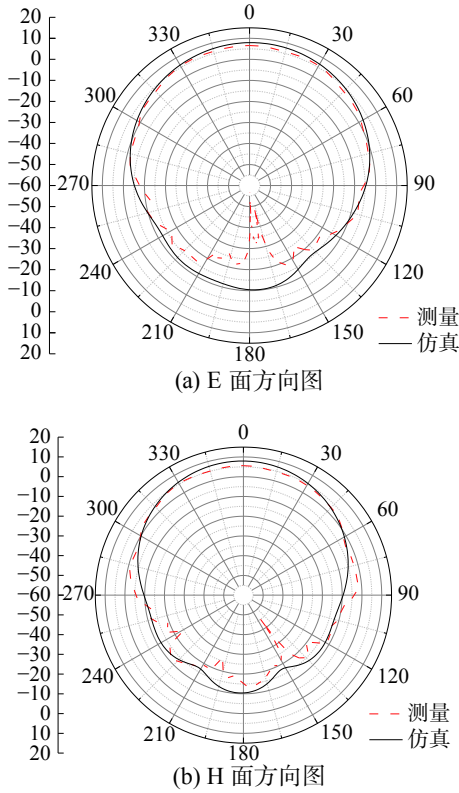


图 4 2.45 GHz 处方向图

2 CPS 结构整流电路设计

CPS 传输线是一种平面的双线传输线, 非常方便与贴片器件连接。基于 CPS 传输线设计整流电路, 直接与交叉偶极子天线连接, 省去平衡非平衡变换。CPS 传输线是一种平衡结构, 很方便与偶极子等平衡型天线直接连接。CPS 传输线的特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{120\pi^2}{\sqrt{\frac{1}{2}(\epsilon_{\text{eff}} + 1)}} \ln^{-1} \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) \quad (1)$$

其中 ϵ_{eff} 为等效介电常数, s 和 w 分别为 CPS 传输线的间隔和宽度, $k' = \sqrt{1 - \left(\frac{s}{s + 2w} \right)^2}$ 。CPS 传输线的间隔 s 对阻抗影响较大。

并联式拓扑结构在 CPS 设计的整流电路中具有电路紧凑、结构简单等优势。由于偶极子天线对直流为开路结构, 传统微波整流电路前端的隔直电容可以省去。

整流电路模型如图 5 所示, 由天线 ANT、CPS 传输线、两个电容 C_1 和 C_2 、肖特基二极管 D 和负

载 R_L 构成。利用二极管 D 的非线性特性将微波转换成直流, 输出到负载 R_L , 完成微波整流。天线 ANT 将接收的空间电磁波辐射, 转化为导行波传输给二极管 D。本文提出一种简洁的 CPS 整流电路结构。采用同一种特征阻抗的 CPS 传输线实现整流电路, 线的宽度和间距保持不变, 方便加工设计也简化结构。

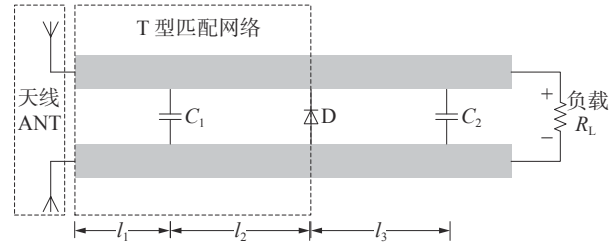


图 5 CPS 结构整流电路

为了实现阻抗匹配和谐波回收, 整流电路引入了 2 个并联电容 C_1 和 C_2 。电容 C_1 和其前后的 2 段 CPS 传输线构成一个传输线并联电容的 T 型的匹配网络, 用于实现天线和整流电路的匹配。 C_2 距离二极管 D 约 $\lambda_g/4$ 。 C_2 形成一个微波的短路点, 经过 $\lambda_g/4$ 转换为开路点, 从而不影响二极管 D 的阻抗。 C_2 实现直通滤波, 可以将微波的基频和谐波都反射回到二极管 D 进行谐波回收利用, 而只允许直流传到负载 R_L 。整流电路中二极管选用 HSMS-286F ($R_s=6 \Omega$, $V_{br}=7 \text{ V}$, $V_{fr}=0.65 \text{ V}$)。该二极管封装了 2 个相同的二极管, 但设计时仅使用了其中的一个二极管。

在 ADS (advanced design system) 中建立版图模型, 并将主要尺寸参数化, 导入原理图中进行版图和原理图的联合仿真分析。将全波电磁场仿真软件 HFSS 分析得到的天线阻抗值, 替换掉 ADS 仿真电路中的源阻抗, 其阻抗为 $100 + j97 \Omega$, 最终经过迭代分析出效率最佳时的各个参数值。分析发现效率最佳时, $C_1=0$ 和 $C_2=100 \text{ pF}$, l_1 加上 l_2 的长度为 5.5 mm, l_3 的长度为 23.5 mm。此时二极管 D 上基波分量比负载 R_L 基波分量高 17 dB, 表明整流电路中的谐波经过 C_2 之后, 得到有效回收。

在从单整流天线扩展到整流天线阵列时, 可将所有整流天线的输出直接并联或者串联起来。由于整流电路没有接地, 不影响整流天线输出的串联和并联。因此, 比微带整流电路更具有简洁和灵活的优势。

3 圆极化整流天线

在实际设计中, 由于肖特基二极管 D 的阻抗为容性, 故设计交叉极化天线的阻抗为感性, 以

便与二极管的阻抗匹配。HSMS286 分析的阻抗为 $166-j122\ \Omega$ 。综合考虑天线和传输线,选取天线阻抗和 CPS 传输线阻抗为 $100\ \Omega$ 作为初始值进行优化。

通过优化天线的阻抗、CPS 传输线的阻抗和长度,利用天线感性和肖特基二极管容性阻抗的匹配,可以不使用电容 C_1 , 直接实现阻抗匹配。

设计结果: CPS 传输线的间距 s 和宽度 w 分别设置为 $1.7\ \text{mm}$ 和 $3\ \text{mm}$, 此时 CPS 传输线的阻抗为 $164\ \Omega$ 。天线的阻抗为 $100+j97\ \Omega$ 。

图 6 给出了最终的整流天线模型和实物,交叉偶极子天线与 CPS 传输线直接相连,天线下方四分之一波长处添加一个金属反射面,CPS 传输线后用直线连接负载。CPS 传输线上仅使用一个二极管和一个电容,天线和电路具体的参数如前文所述,其中 $l_1=5.5\ \text{mm}$, $l_2=23.5\ \text{mm}$, 电容 $C=100\ \text{pF}$ 。

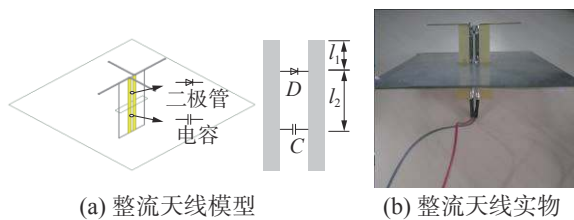


图 6 整流天线模型和实物

4 测量结果与分析

4.1 测试系统

测试系统如图 7 所示,包括 HMC-T2220 微波信号发生器、微波固态放大器、 $2.45\ \text{GHz}$ 标准增益天线、环行器、匹配负载、定向耦合器、功率计、整流天线和直流负载等。标准喇叭天线的增益为 $12.9\ \text{dBi}$, 尺寸为 $15\ \text{cm} \times 20\ \text{cm}$, 根据远场计算公式可求得该天线的远场距离约为 $1\ \text{m}$, 因此测量系统中标准喇叭和整流天线的距离设置为 $1.6\ \text{m}$, 满足远场测试环境。

整流天线的效率为负载端的直流功率与整流天线接收的微波功率之比,其中直流功率为直流负载两端电压的平方和负载的比值,微波功率由 Friis 公式进行计算得到。故整流天线的转换效率计算公式可以表示为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_{\text{out}}^2}{P_r R_{\text{load}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_r 为整流天线接收到的功率; P_t 为喇叭天线的辐射功率; G_r 标准喇叭的增益; G_t 为整流天线的增益; λ 为辐射电磁波的波长; R 为发射的喇叭

天线与整流天线的距离; V_{out} 为负载端的输出电压; R_{load} 为直流负载值。

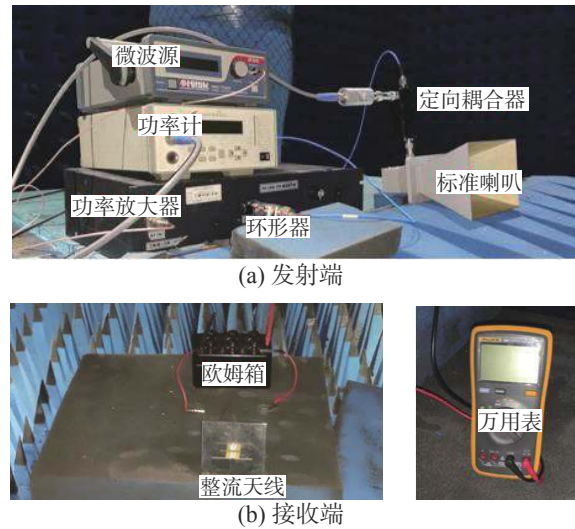
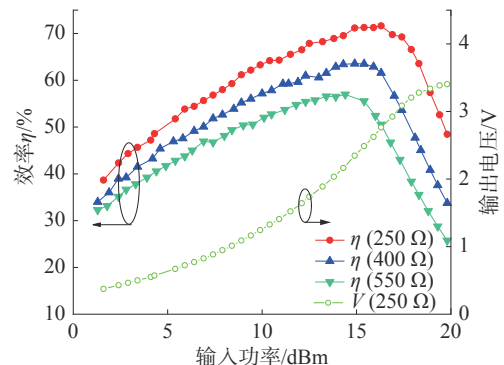


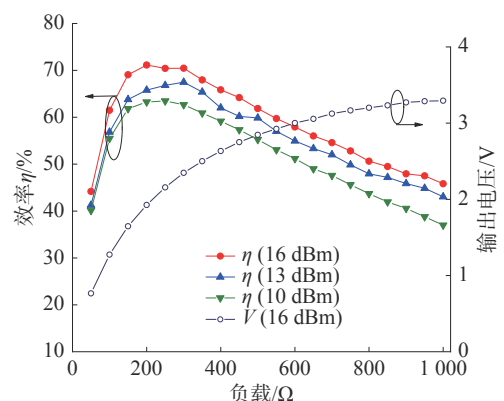
图 7 整流天线测试系统

4.2 测试结果

图 8 是整流天线在给定条件下,转换效率和输出电压随输入功率和直流负载的变化曲线。由图可知,在一定范围内,当输入功率或者负载值增大时,转换效率会先增大后减小,输出电压会逐渐增大。整流天线在输入功率为 $10\sim 16\ \text{dBm}$, 负载为 $100\sim 450\ \Omega$ 的范围内,转换效率均高于 50% 。在输入功率为 $16.3\ \text{dBm}$, 负载为 $250\ \Omega$ 时,转换效率最高,为 71.6% 。



(a) 效率和输出电压随输入功率的变化



(b) 效率和输出电压随负载的变化

图 8 效率和输出电压随输入功率和负载的变化

图 9 给出了转换效率随转动角度的变化曲线, 可知在 $\pm 40^\circ$ 的范围内, 转换效率均高于 50%, 但是在 $\pm 90^\circ$ 的范围内, 转换效率不如预期, 这是由于巴伦的影响, 整流天线的轴比相比天线产生了一些恶化, 使得当偏转角度增大之后, 效率大幅下降。

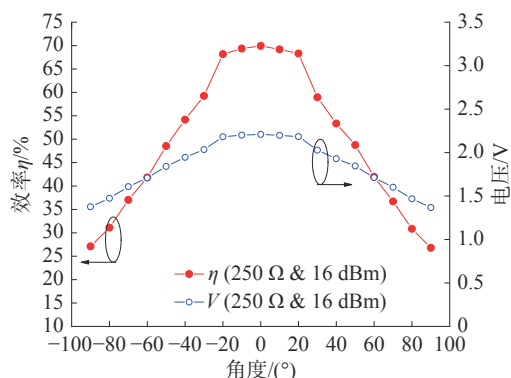


图9 效率和输出电压随角度的变化曲线

表 1 给出了近几年相关的整流天线对比, 文献 [5], [12] 均为线极化, 在针对移动目标的 WPT 领域应用受限; 相比文献 [13]-[14] 的圆极化整流天线, 本文提出的整流天线转换效率更高。

表1 整流天线对比

参考文献	板材	极化方式	二极管选型	最大整流效率/%
[5]	F4B	LP	SMSA3923	69.3
[12]	FR4	LP	SMS7930-79	62.4
[13]	F4B	CP	2862	48.9
[14]	F4B	CP	286C	71.2
本文	FR4	CP	286F	71.6

5 结论

本文设计了一款 S 波段圆极化整流天线。

1) 该整流天线采用交叉金属偶极子和 CPS 传输线设计而成, 具有低成本, 质量轻, 半功率波束宽度宽等优点。该整流天线为圆极化整流天线, 能够有效抑制因极化失配带来的能量损失。

2) 该整流天线在输入功率为 16.3 dBm 和负载为 $250\ \Omega$ 时, 转换效率可达 71.6%, 在 WPT 领域具有应用价值。

参考文献:

[1] STRASSNER B, CHANG Kai. Microwave power transmission: historical milestones and system components[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6): 1379–1396.

[2] ZENG Yong, CLERCKX B, ZHANG Rui. Communications and signals design for wireless power transmission[J]. *IEEE transactions on communications*, 2017, 65(5): 2264–2290.

[3] COSTANZO A, MASOTTI D. Smart solutions in smart spaces: getting the most from far-field wireless power transfer[J]. *IEEE microwave magazine*, 2016, 17(5): 30–45.

[4] HUANG Wen, ZHANG Biao, CHEN Xing, et al. Study on an S-band rectenna array for wireless microwave power transmission[J]. *Progress in electromagnetics research*, 2013, 135: 747–758.

[5] 杨弋澜, 刘长军. 一种新型微带贴片微波整流天线设计[J]. *应用科技*, 2017, 44(4): 60–63.

[6] 和历阳, 严安, 李勋勇, 等. 一款小型化 2.45 GHz 整流天线的设计[J]. *应用科技*, 2019, 46(5): 63–66.

[7] IOANNIS P, SOMBRIN J, DELHOTE N, et al. Channel capacity estimation of stacked circularly polarized patch antennas suitable for drone applications[C]//European Test and Telemetry Conference. Toulouse, France, 2015.

[8] TA S X, PARK I, ZIOLKOWSKI R W. Crossed dipole antennas: a review[J]. *IEEE antennas and propagation magazine*, 2015, 57(5): 107–122.

[9] LIU Ying, YI Hao, WANG Fuwei, et al. A novel miniaturized broad-band dual-polarized dipole antenna for base station[J]. *IEEE antennas wireless propagation letters*, 2013, 12(4): 1335–1338.

[10] WANG Lei, YANG Hongchun, LI Yang. Design of a new printed dipole antenna using in high latitudes for inmarsat[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2011, 10: 358–360.

[11] CHOI E C, LEE J W, LEE T K. Modified S-band satellite antenna with Isoflux pattern and circularly polarized wide beamwidth[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2013, 12: 1319–1322.

[12] YE Heng, CHU Qingxin. A broadband rectenna for harvesting low-power RF energy[C]//2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Okinawa, Japan, 2016: 46–47.

[13] GUO Chengfang, ZHANG Wenmei. A wideband CP dipole rectenna for RF energy harvesting[C]//2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Taiyuan, China, 2019: 1–3.

[14] LIU Yilin, HUANG Kama, YANG Yang, et al. A low-profile lightweight circularly polarized rectenna array based on coplanar waveguide[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(9): 1659–1663.

本文引用格式:

李勋勇, 许立强, 余泽, 等. 一种用于微波无线能量传输的 S 波段圆极化整流天线设计[J]. *应用科技*, 2021, 48(1): 55–59.

LI Xun Yong, XU Liqiang, YU Ze, et al. Design of an S-Band circular polarized rectenna applied to microwave wireless power transmission[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(1): 55–59.