

一种超宽带能量收集整流天线设计

薛亮,白雪,徐雷钧

(江苏大学 电气信息工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:为了更好地利用空间无线电波 RF 能量,设计了一款覆盖谐振频率为 1~14 GHz 宽带天线,并针对 2.4 GHz 进行整流天线设计。天线主体为一个圆形贴片,在地面通过开圆形槽的方式,改变辐射单元表面电流强度,实现宽带谐振和增强辐射的作用。天线在 2.4 GHz 处为最佳谐振点,此频段对应的最大增益为 6.26 dBi。为了使整流天线小型化,将匹配整流电路与收集天线一体化设计。经过测试:整流天线在 2.4 GHz 时最大转换效率为 56.76%,对应的最大输出直流电压为 2.61 V。

关键词: 能量收集;整流效率;宽带整流天线

中图分类号: TN710

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211742

中文引用格式: 薛亮,白雪,徐雷钧. 一种超宽带能量收集整流天线设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 96-100.

英文引用格式: Xue Liang, Bai Xue, Xu Leijun. Design of an ultra-wideband energy harvesting rectifier antenna[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 96-100.

Design of an ultra-wideband energy harvesting rectifier antenna

Xue Liang, Bai Xue, Xu Leijun

(College of Electrical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to make better use of RF energy of space radio waves, a broadband antenna covering resonant frequency from 1 to 14 GHz is designed, and a rectified antenna is designed for 2.4 GHz. The main part of the antenna is a circular patch. By opening a circular slot on the ground, the surface current intensity of the radiation unit is changed to achieve broadband resonance and enhance radiation. The antenna is the best resonant point at 2.4 GHz, and the maximum gain corresponding to this frequency band is 6.26 dBi. In order to miniaturize the rectifier antenna, the matching rectifier circuit and the collecting antenna are integrated. After testing: the maximum conversion efficiency of the rectifier antenna at 2.4 GHz is 56.76%, and the corresponding maximum output DC voltage is 2.61 V.

Key words: energy harvesting; rectifier efficiency; ultra-wideband rectifier antenna

0 引言

无线通信技术日新月异,已经成为人们日常生活的一个组成部分。人们可以很容易接收到电视、蜂窝网络和 Wi-Fi 信号。通过射频能量收集技术,这些信号可以为一些低功耗设备供电。因此,射频能量收集被认为是一种越来越重要的技术^[1]。射频能量收集的原理是通过天线接收空间无线电波,对无线电波能量进行整流,转换成直流能量储存在大电容中,从而实现能量获取的目的^[2]。随着 5G 的普及,环境中的频谱资源日益丰富,作为接收射频能量的天线受到广泛关注^[3-4]。同时,能够覆盖多频率范围的宽频天线成为人们的研究热点^[5]。

文献[6]在 0.85~1.94 GHz 的频段内有较好的性能但带宽很窄;文献[7]通过给天线开槽,实现宽带;文献[8]通过增加介质层数,实现宽带;文献[9]则采用阵列天线实现宽频,但结构复杂,占用面积大,设计难度增加。

文献[10]中频宽为 1.7 GHz,整流电路效率仅为 8%,而文献[11]中,频宽 0.3 GHz,整流效率却提高到了 15%。文献[12]设计了一种改进型双槽天线,带宽为 0.866~1.41 GHz 和 1.7~3 GHz。文献[13]设计了一种新型三支整流电路,最大整流效率为 61.7%。文献[14]设计了一种双频段带通 LC 实现双频化。文献[15]设计了一种新型三支整流电路,最大整流效率为 61.7%。因此,需要从多个窄频带做整流电路,而不是从整个宽频带。本文设计了一款能够覆盖 3G、4G、Wi-Fi 频段的宽频高增益天线,在天线的接地板通过开圆形槽的方式,增加天线带宽,另一方面,提高了天线在工作频段内的增益。该天线在 1~14 GHz 时 $S_{11} < -10$ dB,在最大辐射方向增益可达 6.26 dBi。天线在整个工作频段内特性稳定,在宽带范围内可进行能量收集。并且在性能最佳的 2.4 GHz 频带内在天线上做整流电路,设计了一款小型化高转换效率

整流天线。

1 天线结构的仿真设计

本文设计的天线结构和尺寸如图 1 所示,天线印制在一块厚度为 1.6 mm,介电常数 $\epsilon_r=4.7$ 的 FR4 基板上。天线正面的圆形贴片为辐射单元,馈电采用了侧馈的形式,由圆形贴片引出一条微带线。天线的背面通过开圆环槽的方式,在辐射贴片上激励出更大的电流,增大辐射。

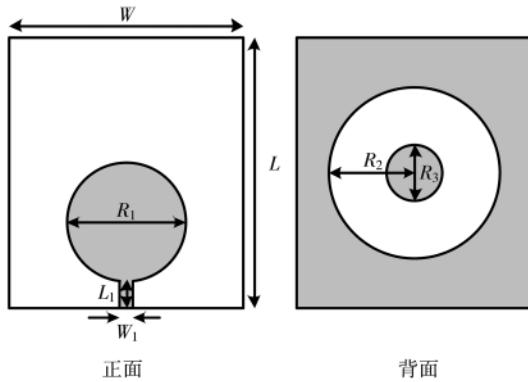


图 1 天线结构示意图

最终设计的天线整体尺寸为 50 mm×50 mm×1.6 mm,经过 HFSS 软件优化仿真后,得出了天线的最终尺寸: $W=50$ mm, $L=50$ mm, $R_1=9.2$ mm, $R_2=21.5$ mm, $R_3=6$ mm。天线的工作频段为 1~14 GHz。图 2 为开槽前后 S_{11} 参数的对比图,可以从图中看出, -10 dB 阻抗带宽从未开槽的窄带展宽到了 13.2 GHz。

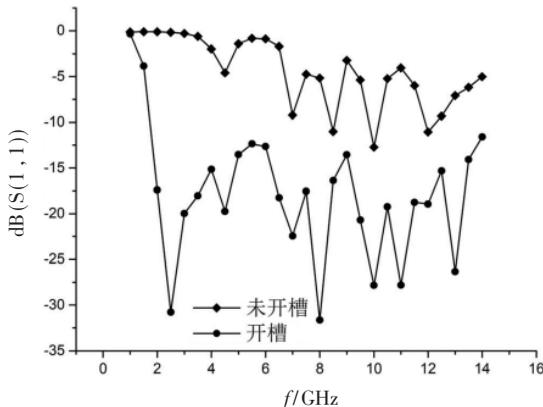
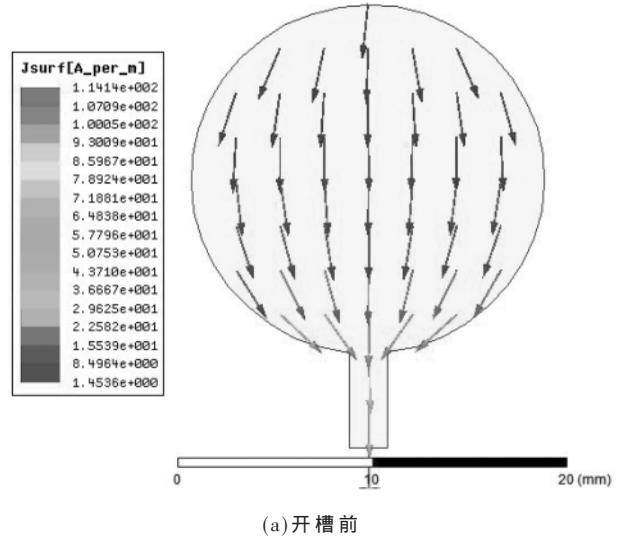


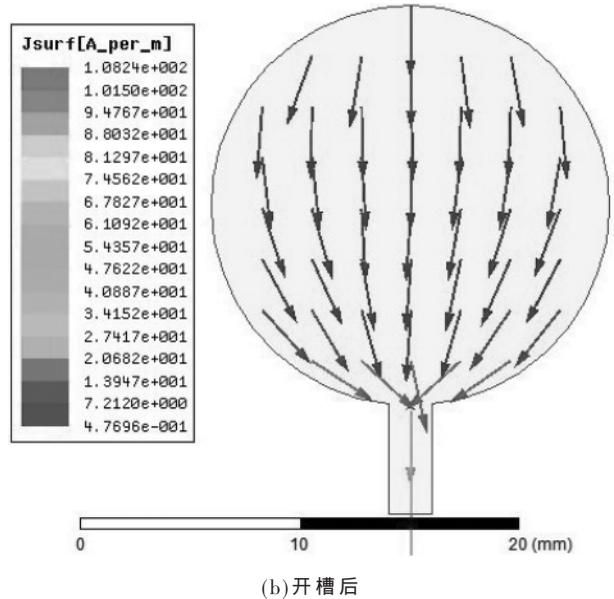
图 2 开槽前后 S_{11} 变化图

为了分析地板开槽对天线性能的影响,图 3 给出了天线圆形贴片在 2.4 GHz 时的表面电流分布图。通过对开槽前后电流分布以及大小对比分析:在 2.4 GHz 时,开槽对电流分布影响较小,开槽的主要影响为激励出更大的表面电流。这说明,开槽之前天线的信号吸收效率低,辐射性能差;而开槽后,能够较好地提高天线的性能。综合图 2 和图 3 可以看出,不仅天线的带宽得到扩展,天线的辐射性能也得到了提升。

图 4 为开槽天线增益仿真结果图,在低频 1~4 GHz



(a)开槽前



(b)开槽后

图 3 开槽前后辐射贴片表面电流分布

范围,天线的 E 面和 H 面方向性较好且在 H 面为全向, E 面为“8”字型辐射,具有很好的对称性。在高频段 5~14 GHz 的频段内,天线的最大方向增益虽然有所提升,但是方向性变差。

针对射频能量收集天线来说,方向性良好的接收天线可以尽可能多地收集环境中的射频能量。从图 4(a)可以看出,虽然此频段的辐射效率稍低(最大辐射方向增益为 6.26 dBi),但是在 X-O-Y 平面表现出良好的全向性,有利于在多样性的环境能量分布中,更好地满足实际需求。

2 整流电路仿真设计

整流电路用于将天线接收到的电磁波能量(RF)转换为直流电能(DC)。整流电路的主要设计目标是在一定的功率和负载下获得最大的转换效率。肖特基二极管由于较低的导通电压、较大的反向击穿电压和低功耗,常

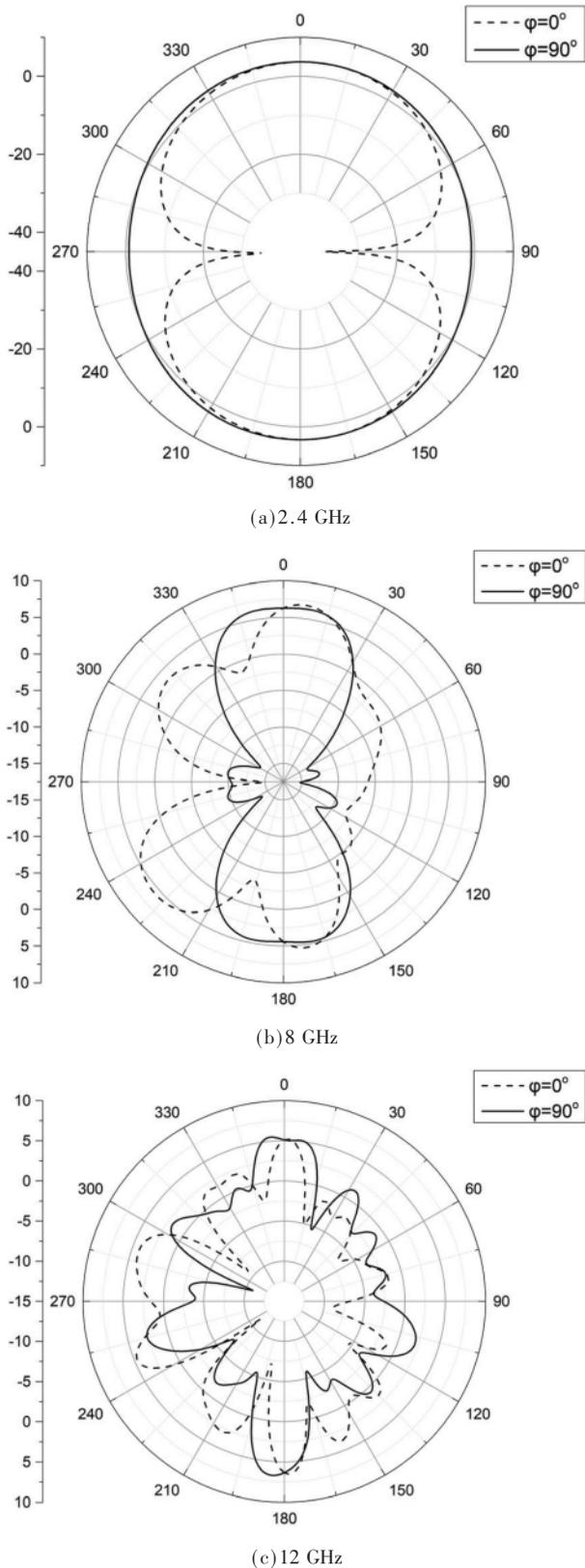


图4 开槽天线增益图

被选为微波整流器件。使用 SMS7630 作为整流二极管，该肖特基二极管具有较低开启电压，十分适用于射频能量收集。本设计采用二倍压整流电路，获取较高的

输出电压，如图5所示。

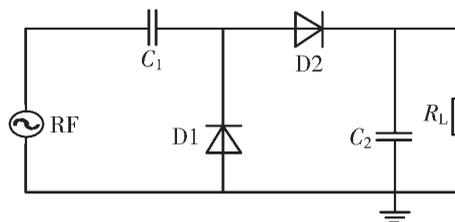


图5 二倍压整流电路拓扑图

假设输入射频信号为 V_{in} ，该信号在负半周时，D1 进行整流，能量储存在 C_1 中，正半周时，D2 进行整流，能量储存在 C_2 中，在下个周期开始时，电容 C_1 中储存的能量会传输到 C_2 中，给负载 R_L 供电。输出电压可用式(1)表示。其中 V_{out} 为负载两端电压， V_D 为二极管正向导通电压。使用过多的整流二极管，会导致整流效率降低。

$$V_{out} = 2(V_{in} - V_D) \quad (1)$$

图5中 C_2 起到滤波作用，确保负载上只有直流信号通过。使用 ADS 仿真软件对二极管进行谐波平衡仿真，确定整流电路的最佳负载以及输入阻抗。最终确定负载 $R_L = 1.2 \text{ k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$ 。在频率为 2.4 GHz、输入功率为 2.3 dBm 下，此时整流电路的输入阻抗为 $118.5 - j52.95 \Omega$ 。

匹配电路用分立器件 T 型匹配，如图6所示，其中 $L_1 = 5.5 \text{ nH}$ ， $L_2 = 9.4 \text{ nH}$ ， $C_1 = 0.85 \text{ pF}$ 。利用史密斯圆图进行匹配后，可通过式(2)进行 RF-DC 效率的计算。

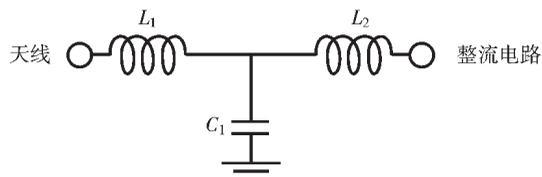


图6 T型匹配电路图

$$\eta \% = \frac{V_{OUT}^2}{R_L} \times \frac{1}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 η 表示转换效率， V_{OUT} 指负载 R_L 两端电压， P_{in} 表示输入的射频能量。

图7为匹配后的整流效率，在输入功率为 2.3 dBm 时，整流效率最高为 71%。

3 实物测试分析

单独测试天线部分：用矢量网络分析仪测量天线的反射系数与仿真结果进行对比如图8所示。从图中可以看出：测试结果与仿真结果吻合较好，实测图在工作频段内有稍有偏差，存在偏差的主要原因是测试环境、SMA 街头的焊接、天线加工的尺寸精度和介质基板介电常数不均匀等因素。但实测结果与仿真结果总体吻合良好，偏差在可接受范围内。图9为一体化整流天线实物图，在经过调试后，匹配电路中的 $L_1 = 5.5 \text{ nH}$ ， $L_2 = 9 \text{ nH}$ ， $C_1 = 0.8 \text{ pF}$ 。

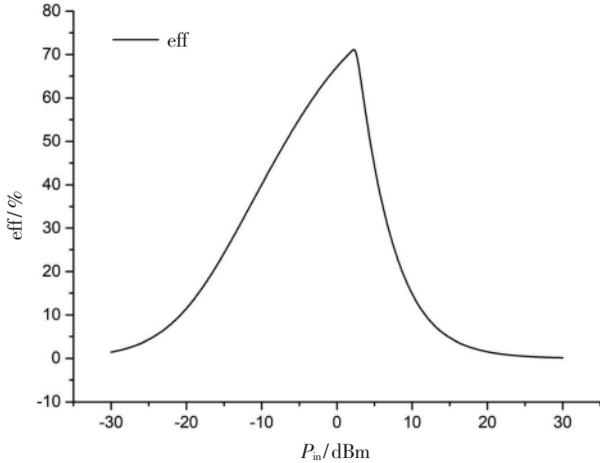


图7 整流效率图

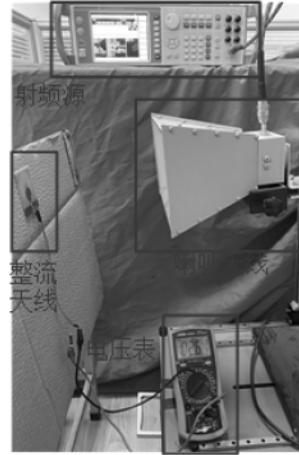


图10 整流天线系统测试图

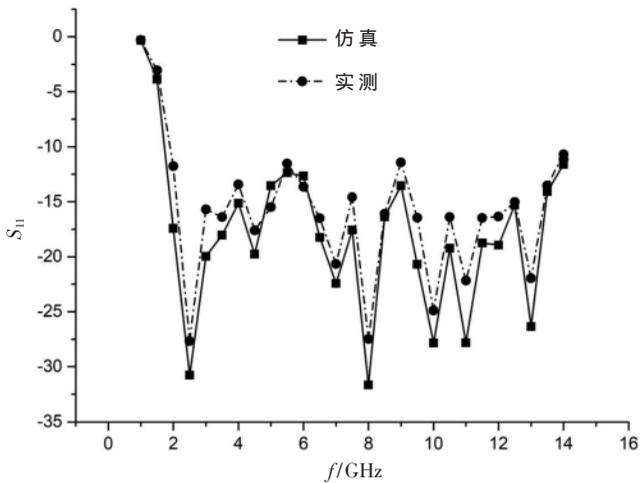


图8 反射系数仿真实测对比图

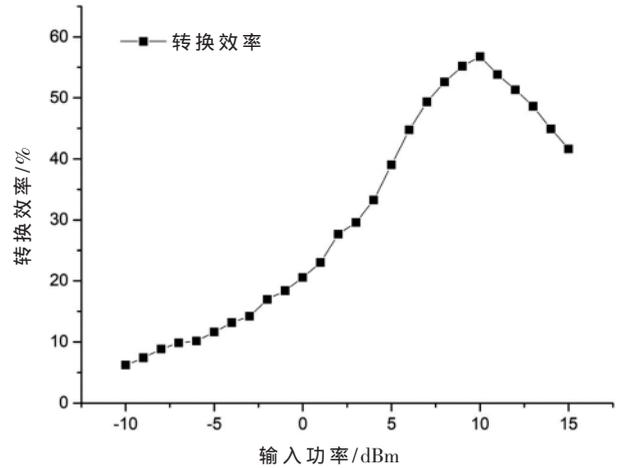


图11 转换效率图

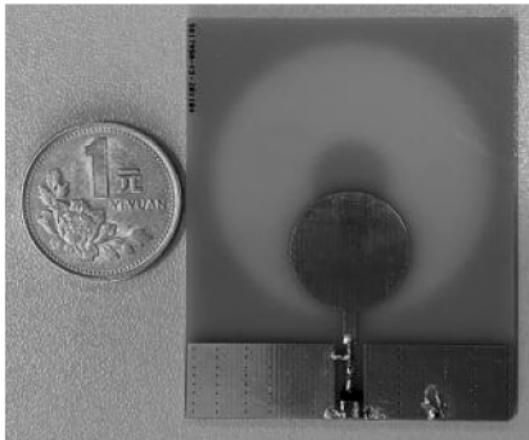


图9 整流天线实物图

整流天线系统测试图如图10所示,射频源发出一个2.4 GHz、输入功率为-10 dBm~15 dBm的信号,通过增益为13 dBi的标准喇叭天线发射信号,整流天线在距离发射天线0.3 m处接收信号,在调整到整流天线最大辐射方向时,在10 dBm时有最大输出电压为2.61 V,转换效率为56.76%。图11为不同输入功率下的转换效率。

4 结论

本文设计了一款地板开槽超宽带天线,该天线采用侧馈结构,具有结构简单、加工制作容易、性能良好、易于微波电路集成等优点。通过采用圆环型地板开槽的方式,使天线在宽带有较好的阻抗带宽。该天线在2.4 GHz时,有良好的方向性以及较高的增益。该天线在低频(1~4 GHz)可用于环境的射频能量收集,在实验室环境下,2.4 GHz时最大转换效率为56.76%,对应的最大输出直流电压为2.61 V。在高频(5~14 GHz)可用于稍远距离的能量传输。

参考文献

- [1] Xue Bai, Han Wanyang, Xu Leijun, et al. A radio frequency and vibration energy harvesting antenna based on piezo-electric material[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(8): e22251.
- [2] ZHANG J W, BAI X, HAN W Y, et al. The design of radio frequency energy harvesting and radio frequency-based wireless power transfer system for battery-less self-sustaining applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019, 29(1): e21658.

[3] 万菁晶, 陆怡琪, 田梦倩, 等. 面向 5G 无线通信系统中若干物理层技术探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 962-969.

[4] 刘志伟, 结顺利, 吴喜亮, 等. 一种具有双缝隙结构的双频宽带 MIMO 天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6): 1048-1053.

[5] Chen Jianxin, Wang Xueying, Huang Yexin, et al. A low-profile circularly polarized dielectric patch antenna with bandwidth expansion[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2021, 31(3).

[6] SHYNU S V, ONS M J R, MCEVOY P, et al. Integration of microstrip patch antenna with polycrystalline silicon solar cell[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(12): 3969-3972.

[7] AHMED A, MOSTAFA E, MAHMOUD S F, et al. Decoupling of closely stacked patch antennas for airborne radio altimeter applications[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 128.

[8] Wan Guochun, Kang Wenhao, Wang Chao, et al. Separating strain sensor based on dual-resonant circular patch antenna with chipless RFID tag[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(1).

[9] 张广海, 汪立新, 陈茂洋. 一种六边形形宽带天线的的设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 74-78.

[10] 汤杭飞, 王虎, 郭晓静, 等. 利用负磁导率材料提高宽带微带天线增益[J]. 现代雷达, 2011, 33(4): 58-61.

[11] 张丞皓, 陈星. 集成于太阳能电池板的高增益分形天线设计[J]. 无线电工程, 2017(6): 48-51.

[12] KHEMAR A, KACHA A, TAKHEDMIT H, et al. Design and experiments of a 3G-band rectenna for radio frequency energy harvesting [J]. Rev Roum SCI Tech-El, 2017, 62(5): 82-86.

[13] SONG C, HUANG Y, ZHOU J, et al. A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3486-3495.

[14] LI Z, ZENG M, TAN H Z. A multi-band rectifier with modified hybrid junction for RF energy harvesting[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2018, 60(4): 817-821.

[15] 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 Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(7): 3160-3171.

(收稿日期: 2021-05-11)

作者简介:

薛亮(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 射频能量收集。

白雪(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 太赫兹无损探测技术、农业物联网和射频与振动复合能量收集器设计。

徐雷钧(1976-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 太赫兹集成电路与射频电磁波能量收集电路设计, E-mail: xlking@ujs.edu.cn。



扫码下载电子文档

(上接第 95 页)

势分析[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 736-742, 612.

[7] 杨蜀冀, 胡杨承钰, 宋红喜, 等. 海洋可控源电磁探测系统概述[J]. 电气时代, 2018(4): 118-120.

[8] 底青云, 薛国强, 殷长春, 等. 中国人工源电磁探测新方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1219-1227.

[9] 徐震寰, 李予国. 时频方向谱分析在海洋电磁数据处理中的应用[J]. 地球物理学报, 2019, 62(12): 4874-4885.

[10] ZHANG P F, DENG M, JING J E, et al. Marine controlled-source electromagnetic method data de-noising based on compressive sensing[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 177.

[11] 鲁瑶, 曹杨, 孙卫斌. 大功率海洋可控源电磁勘探系统装备性能及应用[J]. 物探装备, 2018, 28(6): 412-416.

[12] 邓明, 魏文博, 盛堰, 等. 深水大地电磁数据采集的若干理论要点与仪器技术[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3610-3618.

[13] 陈凯, 景建恩, 赵庆献, 等. 海底可控源电磁接收机及其水合物勘查应用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4262-4272.

[14] 汪海峰, 邓明, 陈凯. 海底电磁接收机新进展[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 809-815.

[15] 邓明, 沈高山, 余平, 等. 基于麦克斯韦理论的海底大地电磁探测技术[J]. 海洋技术, 2003(2): 44-47.

(收稿日期: 2021-04-23)

作者简介:

刘兰军(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式技术与智能仪器、海洋探测技术与装备、水声通信与网络。

周亚涛(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式技术与智能仪器、海洋探测技术与装备。

陈家林(1988-), 通信作者, 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向: 嵌入式技术与智能仪器、海洋探测技术与装备, E-mail: chenjalina@ouc.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所