

双频段环境射频能量采集系统的设计

俞梦缘¹, 温 翾², 游 彬¹

(1. 杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州电子科技大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 提出了一个基于 GSM-1800 和 WiFi 频段的环境射频能量采集系统。该系统由双频圆极化天线、双频整流电路和负载组成。圆极化天线的阻抗带宽为 1 GHz~2.6 GHz, 轴比带宽为 1.78 GHz~1.96 GHz 和 2.37 GHz~2.59 GHz。设计的双频整流器在 1.825 GHz 单频输入 10 dBm 的情况下, RF-DC 最高效率为 44%。在 2.45 GHz 输入功率为 8 dBm 情况下, RF-DC 最高效率为 49%。在双频输入功率为 7.5 dBm 时的最大 RF-DC 转换效率为 53%, 直流电压为 1.73 V。将设计的双频带能量采集系统放在路由器和被拨打的手机附近, 可点亮一个 LED 灯实现其能量采集功能。

关键词: 圆极化; 双频段; 整流天线; 环境能量采集

中图分类号: TN710

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200997

中文引用格式: 俞梦缘, 温翾, 游彬. 双频段环境射频能量采集系统的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 122-125, 130.

英文引用格式: Yu Mengyuan, Wen Xuan, You Bin. Design of dual-band RF energy collection system in environment[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 122-125, 130.

Design of dual-band RF energy collection system in environment

Yu Mengyuan¹, Wen Xuan², You Bin¹

(1. Electronic Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Information Engineering School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper proposed an environmental RF energy acquisition system based on GSM-1800 and WiFi frequency bands. The system consists of a dual-frequency circularly polarized antenna, a dual-frequency rectifier circuit and a load. The impedance bandwidth of the circular polarization antenna is 1 GHz~2.6 GHz, and the axial ratio bandwidth is 1.78 GHz~1.96 GHz and 2.37 GHz~2.59 GHz. The designed dual-frequency rectifier has a maximum RF-DC efficiency of 44% when the 1.825 GHz single-frequency input is 10 dBm. In the case of 2.45 GHz input power of 8 dBm, the highest RF-DC efficiency is 49%. When the dual-frequency input power is 7.5 dBm, the maximum RF-DC conversion efficiency is 53% and the DC voltage is 1.73 V. Placing the designed dual-band energy harvesting system near the router and the phone being called, an LED light can be lit to realize its energy harvesting function.

Key words: circular polarization; dual-band; rectenna; environmental energy harvesting

0 引言

环境射频能量收集是一种为物联网(IoT)中使用的设备供电的潜在应用, 这可能有助于实现如医疗、保健、环境和基础设施管理^[1-2]。随着无线通信基础设施(如 WiFi、蜂窝和广播系统)的部署不断增加, 环境 RF 信号的功率密度通常已变得足够大, 足以支持用于 IoT 应用的自持式和低功率设备^[3]。

目前已经设计了各种单频带采集系统来收集各种频带的 RF 能量, GSM-900^[4]、GSM-1800^[5]、3G^[5]和 WiFi^[6]等。然而, 因为环境射频功率密度极低, 因此可以利用设计多频带的能量采集系统来提高收集效率。如文献[7]提出了一款可收集环境中的 GSM900 和 GSM-1800 频段 RF 能量的系统, 通过增加接收天线的端口来提高采集效率, 该系统可以提供大于 3.2 V 的输出直流电压,

大于 -10 dBm 的输出直流功率以及大于 42% 的 RF-DC 效率。文献[8]提出的双频射频能量采集系统可采集 2.45 GHz WiFi 和 3.5 GHz WiMAX 频段的能量。通过提出的树状天线和引入的两个不同的径向分支组成的匹配网络来提高系统效率。输入功率为 0 dBm 时, 在 2.45 GHz 下, 观察到最大转换效率为 60%; 在 3.5 GHz 下, 最大转换效率为 53%。因此可以从系统的接收天线和匹配电路进行设计。为了最大限度地利用环境射频能量, 可以利用频域来充分利用环境射频环境以及双频^[9-10]、三频^[11]和四频^[5]等已经有学者实现。

本文设计了一个双频段能量采集系统来采集 WiFi 频段和 GSM-1800 频段的能量。其中圆极化天线利用寄生贴片增加天线的阻抗带宽和轴比带宽, 通过在天线上加载缝隙减小双频段处的 S11。在双频整流电路中利用

提出的匹配网络来增加双频带带宽,使用单阶倍压电路提高整流效率。整个系统可实现采集环境中的 GSM-1800 和 WiFi 频段的能量。

1 双频段能量采集系统设计

双频段能量采集系统由接收天线、阻抗匹配网络、整流器、直通滤波器和负载五部分构成,如图 1 所示。本设计将整个系统分为两大模块进行测试,即双频段圆极化天线设计和双频整流电路设计。

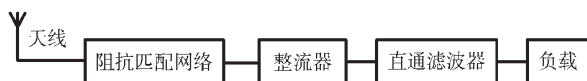


图 1 射频能量采集系统结构框图

1.1 双频段圆极化天线设计

常规的单极天线提供线性极化和窄带功能。本文设计的圆极化天线能接收圆极化波,在 $z>0$ 的情况下为右旋圆极化,在 $z<0$ 的情况下为左旋圆极化。该天线具有较宽的阻抗带宽且具有双频带的轴比带宽。圆极化天线相比其他极化方式的优势有高灵敏度且易接收空间电磁波,同时还能抑制雨雪反射杂波的干扰^[12],更能适应实际的应用环境。图 2 展示了用于收集射频能量的圆极化天线的布局。微带馈线和矩形微带辐射器印在基板的顶面上,镂空的接地结构印在底面上,对称槽由沿对角轴的两个菱形部分组成。在顶层有一个矩形寄生贴片和两个类似 L 形的寄生贴片,在底层蚀刻了一个缝隙,其目的是增加天线的阻抗带宽且使其轴比带宽可以包含 GSM-1800 频段和 WiFi 频段。图 3 为天线的反射系数,

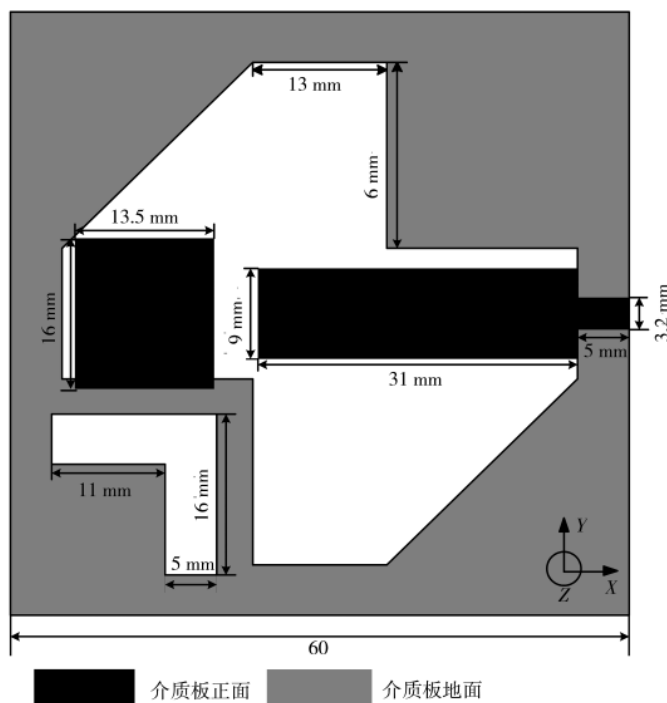


图 2 设计的圆极化天线的布局

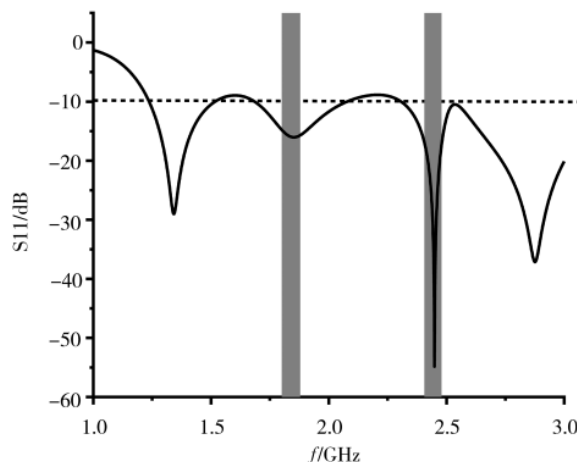


图 3 设计的圆极化天线的反射系数

可以看出 GSM-1800 频段的最小 S11 为 -16 dB, WiFi 频段的最小 S11 为 -54 dB,两个频段的 S11 都能小于 -15 dB。

图 4 为所设计圆极化天线的轴比和增益。可以看出在双频段上的增益 >0 dBic,轴比带宽 <3 dB,满足天线的圆极化条件。图 5 显示了 xoz 平面和 $yozy$ 平面中 1.825 GHz 和 2.45 GHz 的天线归一化辐射方向图。在 $+z$ 方向上 1.825 GHz 和 2.45 GHz 处测得的 RHCP 和 LHCP 之间的交叉极化显示良好的隔离度。从图中可以得知,在 $z>0$ 的情况下为右旋圆极化,在 $z<0$ 的情况下为左旋圆极化。

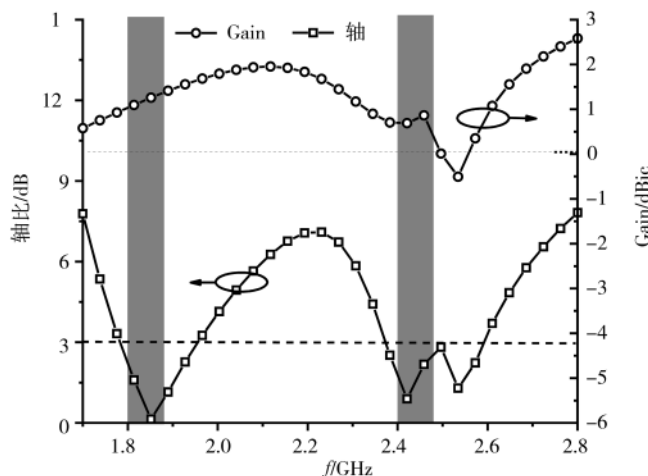


图 4 双频段圆极化天线的轴比和增益

1.2 双频整流电路设计

双频整流电路由匹配网络、整流器、直通滤波器和负载 RL 组成。

1.2.1 匹配网络设计

本文设计了一个匹配网络来匹配 GSM-1800 和 WiFi 频段如图 6 所示,该网络分为 2 部分。

已知中心频率 f_1 为 1.825 GHz, f_2 为 2.45 GHz。part I 将匹配网络右侧的电路看成输入阻抗 $Z_{inA}(f_1)$ 和 $Z_{inA}(f_2)$,使用传输线 TL1 使 Z_{inA} 的实部几乎恒定,而虚部在两个

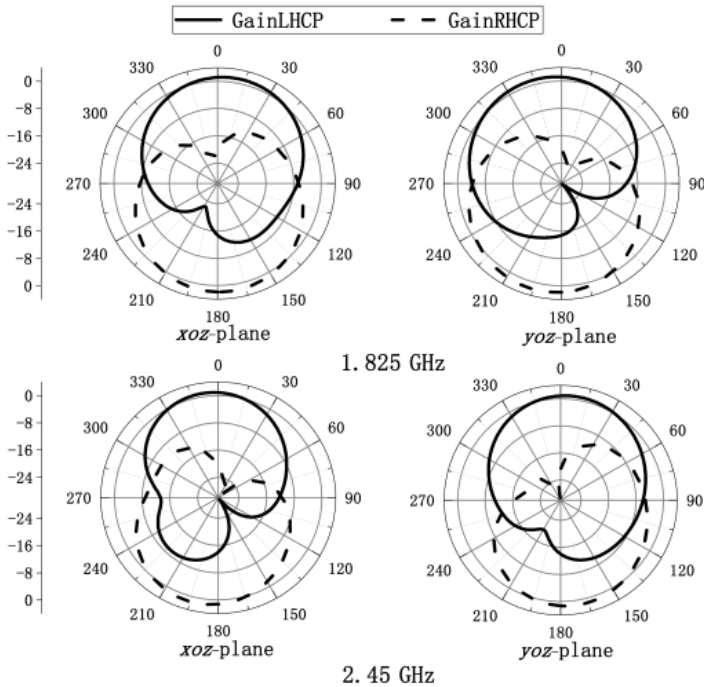


图5 双频圆极化天线在1.825 GHz和2.45 GHz的归一化辐射方向图

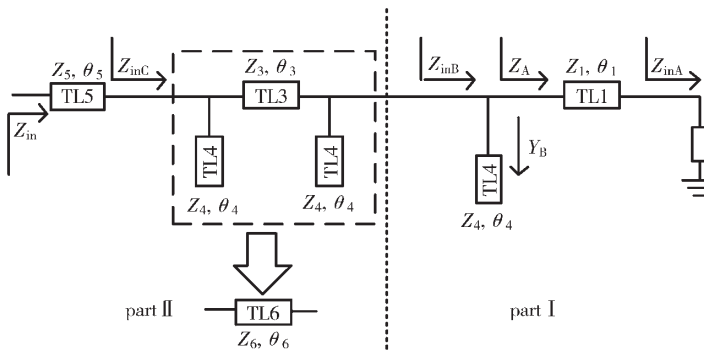


图6 匹配网络的设计

工作频率下共轭,即 $\text{Im}[Z_A(f_1)] = -\text{Im}[Z_A(f_2)]$ 。假如传输线 TL1 可将 Z_{inA} 转换为阻抗 Z_A , 其特性阻抗为 Z_1 和 θ_1 , 则 f_1 和 f_2 处的 Z_A 可表示为:

$$Z_A(f_i) = Z_1 \frac{Z_{inA}(f_i) + jZ_1 \tan \theta(f_i)}{Z_1 + jZ_{inA}(f_i) \tan \theta(f_i)}, \quad i=1, 2 \quad (1)$$

通过以上公式可计算出当 $Z_A(f_1) = [Z_A(f_2)]^*$ 时的 Z_1 和 θ_1 。

导纳 Y_A 可以表示为:

$$Y_A(f_1) = G + jB \quad (2)$$

$$Y_A(f_2) = G - jB \quad (3)$$

并联一个短路短截线 TL2 可消除 Z_A 的虚部, 同时保持其实部不变。TL2 的特性阻抗为 Z_2 和 θ_2 , 可通过以下公式获得:

$$Y_B(f_1) = \frac{-jZ_2}{\tan \theta_2} = jB \quad (4)$$

$$Y_B(f_1) = \frac{-jZ_2}{\tan(k\theta_2)} = -jB \quad (5)$$

利用 part I 的配置消除了 Z_{inB} 的虚部, 只留其实部。

Part II 由一个传输线 TL5 和一个 II 型网络组成, 其设计是为了拓宽双频带整流器 GSM-1800 频段的带宽。将虚线框中 II 型网络等效为传输线 TL6, TL6 在两个工作频率下具有相同的特性阻抗 Z_6 和 θ_6 。可通过分别构建 TL7 和 II 型网络的 ABCD 矩阵获得 TL3 和 TL4 的参数^[13]。传输线 TL6 在两个工作频率下将 Z_{inC} 匹配到 50Ω 的阻抗值。图 7 是加了 II 型网络和未加之间的对比。从图中可以看出 GSM-1800 频段明显拓宽, 而 WiFi 频段可保持带宽不变。

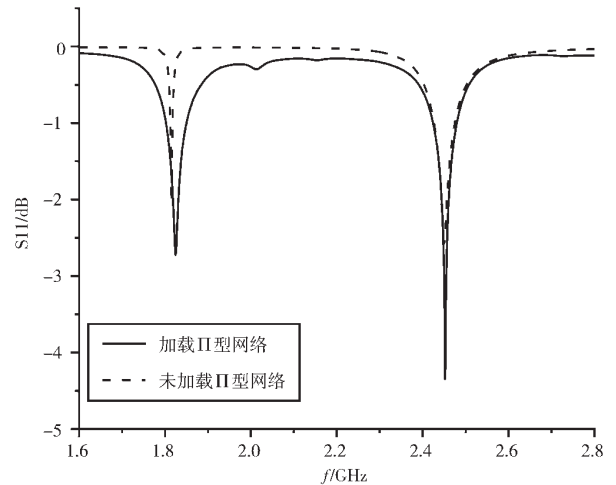


图7 II型网络对带宽的影响

1.2.2 单阶倍压整流器和直通滤波器设计

双频带整流电路的整流器和直通滤波器设计如图 8 所示。整流器选择的是单阶倍压整流器, 二极管 D1、D2 为肖特基二极管 HSMS-2852。在低功率输入下, 该单阶倍压整流器可进行整流增压。直通滤波器由四个短路短截线组成。通常的直通滤波器由电容构成, 但是只适用于单频带电路。因为其无法滤除基波和二次谐波分量, 会影响整流效率。设计的四枝节直通滤波器可解决这个问题, 使 TLA 短截线谐振于 1.825 GHz, TLB 短截线谐振于 2.45 GHz, TLC 短截线谐振于 3.65 GHz, TLD 短截线谐振于 4.9 GHz。由此可以确定直通滤波器的初始结构。

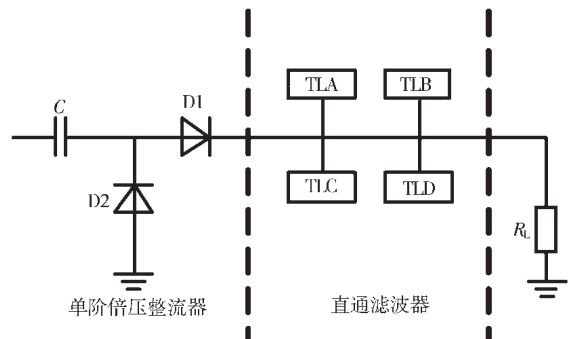


图8 整流器和直通滤波器的结构

2 仿真和测试结果

基于设计的双频圆极化接收天线和带有复杂匹配网络的整流器,通过 SMA 转换头将整流器和天线直接相连来制造能量采集系统如图 9 所示。天线尺寸为 60 mm×60 mm,整流器的尺寸为 117 mm×75 mm。隔直电容选择的是 150 pF 的村田电容。整流二极管为 Avago 公司的 HSMS-2852 型号,封装为 SOT-23。负载电阻选择的是 1 000 Ω 的环形电阻。整流天线选用的介质板是 FR-4 材料,其介电常数为 4.4,损耗角为 0.02,厚度为 1.6 mm。

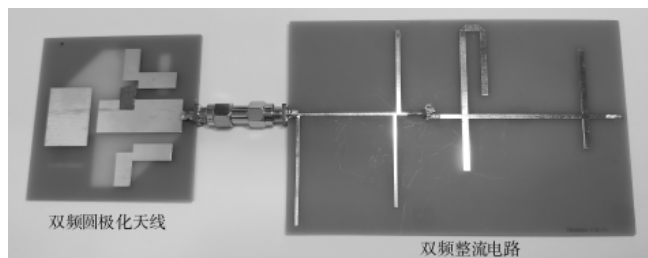


图 9 双频段能量采集系统实物图

2.1 双频整流电路的 RF-DC 转换效率测试

RF-DC 转换效率为整流器最重要的一个指标,为整流电路将射频能量转换为直流功率的能力体现。可以通过以下公式计算获得^[10]:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{DC}^2}{R_L \cdot P_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

其中 P_{DC} 为输出直流功率, P_{in} 为输入功率, V_{DC} 为输出直流电压, R_L 为负载电阻。

图 10 比较了单频输入和双频输入时 RF-DC 转换效率和直流电压随着输入功率变化的曲线。从图中可以看出,输入频率为 1.825 GHz 时,最大的 RF-DC 转换效率 44% 出现在输入功率 9.6 dBm 时。输入频率为 2.45 GHz 时,最大的 RF-DC 转换效率 48.5% 出现在输入功率为 9 dBm 时。双频输入功率为 7.5 dBm 时的最大 RF-DC 转换效率为 53%。比单频输入 1.825 GHz 时高了 9%,比单

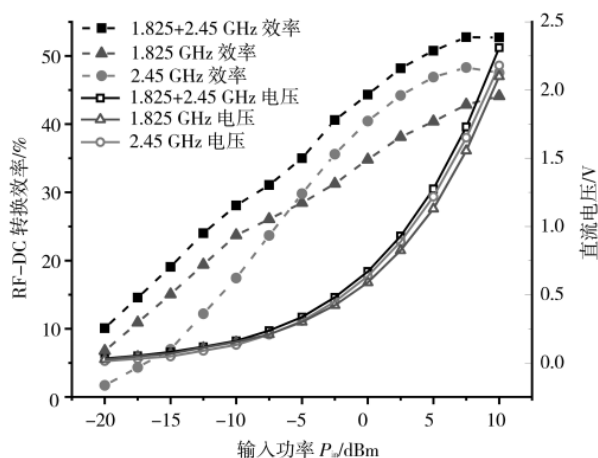


图 10 RF-DC 转换效率和直流电压随着输入功率变化图

频输入 2.45 GHz 时高了 4.7%。直流电压趋势都是随着输入功率增加而增大。当输入功率为 7.5 dBm 时,双频输入所得电压值为 1.73 V,比单频输入 1.825 GHz 和 2.45 GHz 时分别高 0.175 V 和 0.08 V。因为环境中的 GSM-1800 和 WiFi 频段的能量非常小,当双频输入功率为 -20 dBm 时,RF-DC 转换效率也有 10%,直流电压为 0.032 V。通过以上比较可以得到结论,增加频带来采集环境 RF 能量是可行的。

2.2 双频段能量采集系统的测试

用一个发光二极管代替整流电路中的负载,将其进行如图 11 所示的测试。将双频段能量采集系统放置于忙碌的路由器或者被呼叫的手机周围,得到的结果如表 1 所示。



图 11 双频段能量采集系统测试

表 1 双频段能量采集系统的实测结果

实测环境	采集频段	发光二极管状态
路由器附近(空闲状态)	WiFi 频段	不发光
路由器+1 部手机下载	WiFi 频段	时断时续
路由器+2 部手机下载	WiFi 频段	发出稳定的光
1 部被呼叫的手机	GSM-1800 频段	时断时续
路由器+1 部手机下载+1 部手机被呼叫	WiFi 频段	发出稳定的光
	GSM-1800 频段	

通过以上的实测可以再次验证,所设计的双频整流天线可采集环境中的 GSM-1800 和 WiFi 能量,且采集双频能量的能力比采集单频能量更好。

3 结论

本文提出了一个由双频圆极化天线和双频整流电路组成的双频段射频能量采集系统。双频圆极化天线通过增加寄生贴片和在地面开槽来增大阻抗带宽和轴比带宽,使其带宽涵盖 GSM-1800 和 WiFi 频段。基于单阶的倍压整流电路,设计了一个分为两部分的匹配网络使整流电路呈现双频带特性。仿真结果表明,圆极化天线的阻抗带宽为 1 GHz~2.6 GHz,轴比带宽为 1.78 GHz~

(下转第 130 页)

- [2] HANSEN P. Developments in high power longwave radio: A brief history[C]. Antennas and Propagation (APSURSI), 2016 IEEE International Symposium, 2016.
- [3] OWENS K. DARPA proposes portable antenna for under-water drone communication. Defence Systems, 2017.
- [4] 丁宏. DARPA 机械天线项目或掀起军事通信革命[J]. 现代军事, 2017, 4: 71-73.
- [5] MADANAYAKE A, CHOI S, TAREK M. Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles[C]. Engineering Research Conference (MERCon), 2017.
- [6] GOLKOWSKI M, PARK J, BITTLE J, et al. Novel mechanical magnetic shutter antenna for ELF/VLF radiation[C]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting,

20186.

- [7] KEMP M A, FRANZI M, HAASE A, et al. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter[J]. Nature Communication, 2019.
- [8] GONG S, LIU Y, LIU Y. A rotating-magnet based mechanical antenna (RMBMA) for ELF-ULF wireless communication[J]. PIER M, 2018, 72: 125-133.
- [9] 王晓煜, 张雯厚, 周鑫, 等. 旋转磁偶极子式超低频发射天线辐射特性研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2055-2062.
- [10] 周强, 施伟, 刘斌, 等. 一种基于旋转磁偶极子的机械式低频天线[C]. 2018 对潜通信技术学术交流会论文集, 2020.

(下转第 134 页)

(上接第 125 页)

1.96 GHz 和 2.37 GHz~2.59 GHz。设计的双频整流器在双频输入功率为 7.5 dBm 时的最大 RF-DC 转换效率为 53%, 直流电压为 1.73 V。将设计的双频段能量采集系统放在路由器和被拨打的手机附近, 可点亮一个 LED 灯实现其能量采集功能。因此, 该系统可采集环境中的 GSM-1800 和 WiFi 能量。

参考文献

- [1] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. The Internet of Things: a survey[J]. Computer Networks, 2010, 54(15): 2787-2805.
- [2] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [3] PINUELA M, MITCHESON P D, LUCYSZYN S. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(7): 2715-2726.
- [4] JIE A M, NASIMUDDIN, KARIM M F, et al. A wide-angle circularly polarized tapered-slit-patch antenna with a compact rectifier for energy-harvesting systems[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2019, 61(2): 94-111.
- [5] PALAZZI V, HESTER J, BITO J, et al. A novel ultra-lightweight multiband rectenna on paper for RF energy harvesting in the next generation LTE bands[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(1): 366-379.
- [6] QASIM A, YANG J, TARIQ C H, et al. A compact rectenna system with high conversion efficiency for wireless energy harvesting[J]. IEEE Access, 2018, 6: 35857-35866.
- [7] SHEN S, ZHANG Y, CHIU C Y, et al. An ambient RF energy harvesting system where the number of antenna ports is dependent on frequency[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(9): 3821-3832.

- [8] WANG M, FAN Y, YANG L, et al. Compact dual-band rectenna for RF energy harvest based on a tree-like antenna[J]. Microwaves, Antennas & Propagation, IET, 2019, 13(9): 1350-1357.
- [9] SHEN S, CHIU C Y, MURCH R D. A broadband L-probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting[C]. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017.
- [10] 徐力翔, 游彬, 华富春. 双频段环境能量采集电路设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(9): 54-57.
- [11] LIU Z, ZHONG Z, GUO Y X. High-efficiency triple-band ambient RF energy harvesting for wireless body sensor network[C]. 2014 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series RF Wireless Technologies for Biomedical Healthcare Appl (IMWS-Bio), 2014.
- [12] 徐冉, 林先其, 樊勇. X 波段圆极化大功率整流天线研究[J]. 空间电子技术, 2020, 17(2): 51-56.
- [13] HUANG M, LIN Y L, OU J H, et al. Single- and dual-band RF rectifiers with extended input power range using automatic impedance transforming[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2019, 67(5): 1974-1984.
- [14] ERKMEN F, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Scalable electromagnetic energy harvesting using frequency-selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2018, 66(5): 2433-2441.

(收稿日期: 2020-10-12)

作者简介:

俞梦缘(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 射频能量采集系统的设计与实现。

温翹(1974-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 射频电路与系统。

游彬(1974-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 微波器件研究, E-mail: youbin@hdu.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