

DOI: 10.11991/yykj.202010013

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210825.1639.014.html>

## 一种低功耗无线携能通信中整流电路集成上行链路的研究

孙雪曼, 武鹏德, 刘长军

四川大学电子信息学院, 四川成都 610064

**摘要:**为减少无线携能通信 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 中信息发射的功耗, 提出在射频整流电路中集成上行无线链路, 实现射频整流和上行通信的同时进行。该结构主要由可重构缺陷地带阻滤波器 and 整流电路组成。利用整流产生的二次谐波作为上行无线链路载波, 通过基带信号控制可重构带阻滤波器, 实现对载波的幅度调制。在  $-20$  dBm 的射频输入功率下, 上行通信数据速率达到了 100 kbps, 调制所需的平均直流功耗仅为  $2.35 \mu\text{W}$ , 并且整流电路的转换效率几乎不受基带信号调制的影响, 证实了提出的低功耗上行通信方法的可行性。该结构将有望应用到无线传感网络的节点, 并且在无线携能通信低功耗场景中具有良好的应用前景。

**关键词:**整流电路; 可重构缺陷地结构; 幅度调制; 带阻滤波器; 无线传感器网络; 无线携能通信; 上行无线通信; 低功耗  
**中图分类号:** TN836      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-671X(2021)05-0060-05

## Study on the integrated uplink of rectifier circuit in a low-power wireless energy-carrying communication

SUN Xueman, WU Pengde, LIU Changjun

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

**Abstract:** In order to reduce power consumption of information transmission in simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), an integration of uplink wireless link in RF rectifier circuit is proposed to realize simultaneous RF rectification and uplink communication. The structure mainly consists of a reconfigurable band stop filter (BSF) based on a defected ground structure (DGS) and a rectifier circuit. The second harmonic generated by the rectifier serves as an uplink carrier modulated in amplitude, which is realized by the re-configurable BSF controlled by uplink baseband signals. The feasibility of the proposed low-power uplink communication method has been verified. At  $-20$  dBm RF input power, an uplink data rate of 100 kbps has been demonstrated with an average DC power consumption of  $2.35 \mu\text{W}$ . Meanwhile, the conversion efficiency of rectifier circuit is hardly affected by the modulation of the baseband signal, which is validated through experiments. The structure is expected to be applied to the wireless sensor networks (WSNs), and has a great engineering application prospect in low-power SWIPT.

**Keywords:** rectifier circuit; reconfigurable DGS; amplitude modulation; BSF; WSNs; SWIPT; wireless uplink communication; low power

随着物联网 (internet of things, IoT) 的快速发展, 无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 作为其“感知层”最主要的组成部分得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。目前, 传感器大多使用容量和寿命有限的电池供电, 其维护成本高, 且废旧电池还会破坏生态环境<sup>[3-5]</sup>。因此, WSNs 节点的能量供给是一个迫在眉睫的问题。

无线携能通信 (simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 是解决上述问题的有效方法之一。SWIPT 是无线信息传输和无线能量传输相交叉、结合的产物, 旨在实现信息与能量的并行传输<sup>[6]</sup>。SWIPT 的相关技术中, 通过减少传感器的收发机功耗、充分利用整流产生的谐波能量, 能在实现低功耗无线通信和远距离读取的同时使无电池成为可能<sup>[7]</sup>。

在谐波通信的应用中, 文献 [8] 利用三次谐波来进行天线极化方向的对准。文献 [9] 提出一种利用二次谐波相位变化编码温度信息的无源无线温度传感器。文献 [10] 提出了应用于 5G 物联网

收稿日期: 2020-10-18. 网络出版日期: 2021-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62071316).

作者简介: 孙雪曼, 女, 硕士研究生.

刘长军, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

应用的无源谐波转发机。文献 [11] 提出了低功耗远距离传输的谐波转发器。为减少通信中信息解码的功耗, 文献 [12–13] 提出了一种兼具接收信息和收集能量作用的整流接收集成结构。文献 [14] 提出了一种不采用任何有源器件的接收集成电路结构用于实现接收能量和通信信号的同时进行。本文提出的整流发射集成结构 (integrated rectifier-transmitter, IRT) 利用整流产生的二次谐波作为上行基带信号的载波, 并通过可重构带阻滤波器 (band stop filter, BSF) 对二次谐波调幅实现无线上行携能通信。

### 1 整流发射集成原理

本文提出的 IRT 结构是由工作于  $f_0$  的整流电路、 $2f_0$  的可重构 BSF 和直流负载组成, 其整体结构原理如图 1 所示。IRT 结构传回基站的上行链路信号是通过整流产生的二次谐波进行调幅实现的。

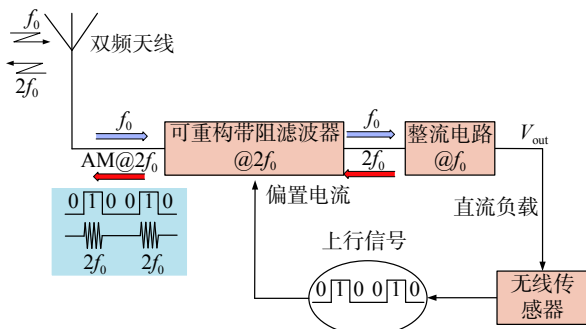


图1 IRT 结构原理

如图 1 所示, 当天线接收到来自基站的正弦信号  $f_0$  后, 会将其传输给 IRT 结构, 通过整流电路将射频能量转换成直流输出给无线传感器, 而传感器采集的数据将用于二次谐波信号的幅度调制。

由于整流电路在工作时会产生高次谐波, 其中二次谐波携带的能量最大, 选其作为上行基带信号的载波。通过可重构 BSF 对二次谐波调幅后,  $2f_0$  的信号会由天线传回基站, 实现低功耗无线上行通信。

为减少二次谐波调制对整流电路转换效率的影响, BSF 在  $f_0$  的插入损耗应越小越好。本文选择的 BSF 使用在通带具有低损耗的可重构缺陷地结构 (defected ground structure, DGS)。

## 2 系统设计及实验测量

### 2.1 可重构带阻滤波器

BSF 由 2 个蚀刻在金属地的对称耦合 DGS 谐

振器组成, 通过  $50 \Omega$  微带线馈电, 其谐振单元可以等效为 LC 并联谐振器, 等效电路如图 2 所示。

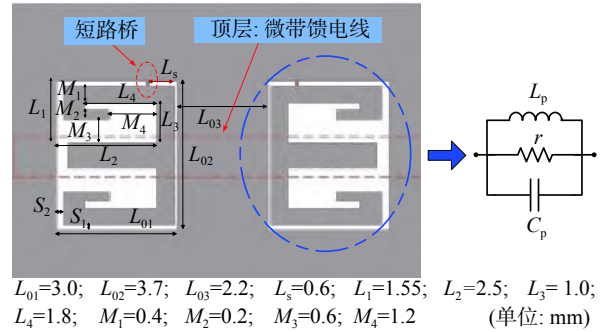


图2 DGS 版图及其单元等效图

图中  $L_p$  和  $C_p$  的值可以通过式 (1) 和式 (2) 确认<sup>[15]</sup>:

$$L_p = \frac{25}{C_p(\pi f_p)^2} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{5fc}{\pi[f_p^2 - f_c^2]} \quad (2)$$

式中:  $f_c$  是 3 dB 的阻带截止频率;  $f_p$  是谐振频率。

通过放置短路桥在如图 2 所示的位置来模拟 BSF 的可重构性。当放置短路桥时, 谐振器的槽长度减少, 谐振频率增加。可重构 BSF 的  $|S_{21}|$  仿真结果如图 3 所示, 在没有短路桥时, BSF 的谐振频率为 4.8 GHz, 而放置短路桥后其谐振频率增加到了 7.95 GHz。

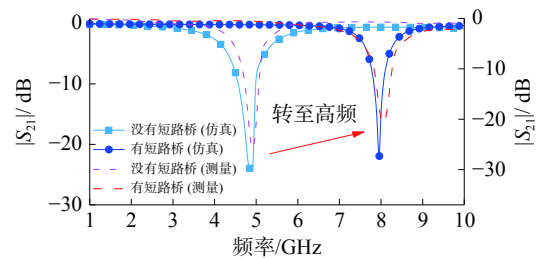


图3 放置/不放置短路桥的  $|S_{21}|$

实验采用 Rogers 4350B 的介质基板, 介电常数 3.66, 损耗正切 0.002。图 3 还给出了 1 GHz 和 6 GHz 2 种状态下可重构 BSF 的  $|S_{21}|$  测量结果, 其插入损耗在 0~3.2 GHz 时小于 0.2 dB; 在放置 2 个短桥后, 以 4.8 GHz 为中心的阻带被消除。从图 3 可以看出, 仿真与测量结果基本吻合。

### 2.2 BSF 可调谐的实现

通过使用 PIN 二极管替代上述 2 个短路桥来实现 BSF 的可调谐。配置有 PIN 二极管和偏置电路的可重构 BSF 如图 4 所示, 这些二极管的位置与图 2 中短路桥的放置位置大致相同, 所需偏置由金属过孔提供, 该过孔连接了基板上表面的射频扼流圈和下表面的 DGS 谐振器。BSF 利用

0.15 mm 的缝隙切断可重构 DGS 和金属地面的直  
流联系,再通过 2 个贴片电容来恢复 DGS 的射频  
回路。

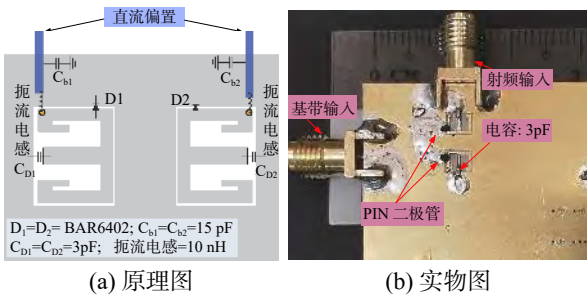


图4 带有 PIN 二极管和偏置电路的 BSF

可重构 BSF 的电路响应变化如图 5 所示,图  
中给出了 0、10、100 和 1 000  $\mu\text{A}$  偏置电流下的  
 $|S_{21}|$  测量结果。从图 5 可以看出,随着偏置电流的  
增大,4.8 GHz 附近的阻带逐渐消失。

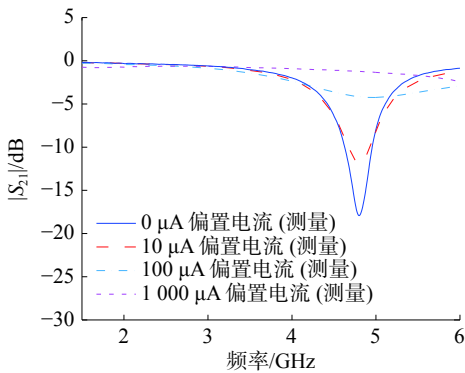


图5 4 种偏置电流下 DGS 的 $|S_{21}|$

### 2.3 整流电路的设计

从图 5 可知可重构 BSF 的最佳衰减范围在  
4.8 GHz,因此 IRT 结构中整流电路的工作频率设  
置为 2.4 GHz,提高可重构 BSF 对整流产生的二次  
谐波的调幅深度。图 6 给出了整流电路的设计原  
理图,使用终端短路枝节  $Z_L$  和集总电感  $L_M$  来抵消  
整流二极管的虚部阻抗,再利用电感  $L_L$  和电容  
 $C_{L1}$ 、 $C_{L2}$  组成的低通滤波器过滤射频信号,实现直  
流输出。

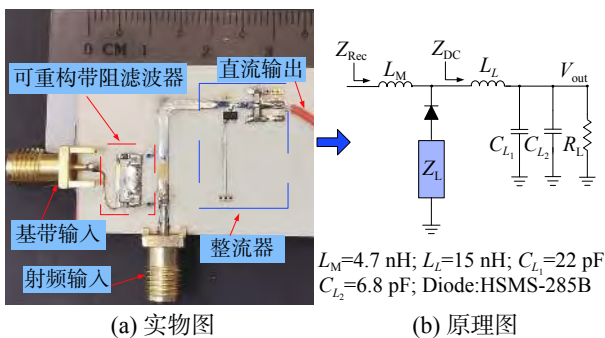


图6 整流电路原理

### 3 结构的实现和实验结果

图 4 和图 6 还给出了 IRT 结构的实物图,实  
验采用介电常数为 3.66、正切损耗为 0.002、高度  
为 0.762 mm 的 Rogers 4350B 介质板。从图 4 和  
图 6 可以看出整流电路和可重构 BSF 集成在了  
一起。

测量系统如图 7 所示。IRT 结构的基波功率  
信号由射频信号源提供,产生的二次谐波通过 20 dB  
定向耦合器直接耦合到频谱分析仪进行数字解  
调。利用信号发生器模拟上行基带信号,并对可  
重构 BSF 进行动态偏置。改变射频信号源的输入  
功率和频率,测量 1 k $\Omega$  负载上的直流电压,得到  
IRT 结构 RF-DC 的整流效率。

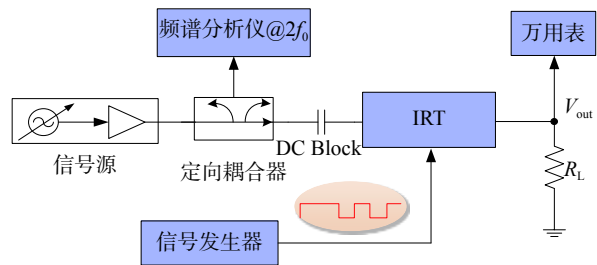


图7 测量系统

图 8 给出了 0、-10、-20 dBm 输入功率下,不  
同偏置电流与二次谐波能量  $P_{2\omega}$  的关系。当输入  
的偏置电流在 0~50  $\mu\text{A}$  内时,  $P_{2\omega}$  与偏置电流成正  
比;随着电流从 50  $\mu\text{A}$  增加到 100  $\mu\text{A}$ ,曲线变缓;  
当输入的偏置电流大于 100  $\mu\text{A}$  时,谐波能量达到  
饱和。

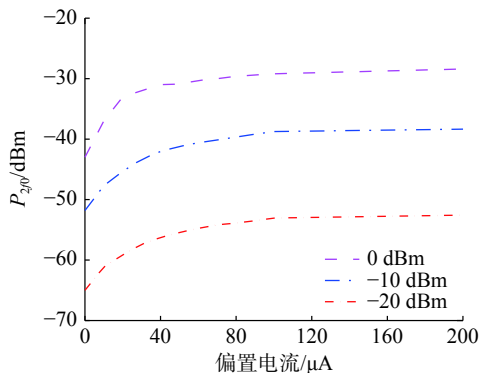


图8 偏置电流与二次谐波能量

0、10、100  $\mu\text{A}$  偏置电流下,IRT 结构的整流效  
率如图 9 所示。从图 9 可以看出,在相同射频输  
入功率下,可重构 BSF 偏置电流的变化对整流效  
率的影响几乎可以忽略不计,说明整流电路的工  
作不受谐波调制的影响。在-20 dBm 的射频输入  
功率下,被调制的二次谐波通过定向耦合器耦合



至实时信号频谱分析仪,解调后的信号波形如图10所示。可见 $2f_0$ 的调制深度约为76.3%,并在 $-76.5$  dBm的载波功率下很好地恢复了50 kHz基带信息。换句话说,在 $2.35$   $\mu$ W的平均直流功耗下,上行通信的数据传输速率能够达到100 kbps。

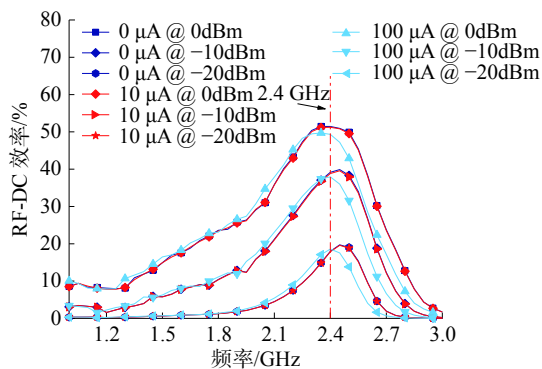


图9 不同偏置电流下的射频整流效率

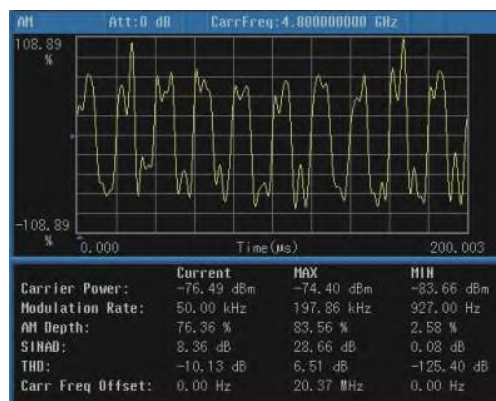


图10  $-20$  dBm输入功率下的50 kHz解调方波

## 4 结论

本文提出在射频整流电路中集成上行无线链路功能,实现射频整流和上行通信的同时进行。

1) 提出一种利用射频整流电路产生的二次谐波进行无线携能通信的方法。该方法采用射频整流产生的二次谐波作为上行信号,无需本地振荡电路等额外组件;在通信时采用低于 $10$   $\mu$ A的调制电流,减少了无线携能通信中的发射功耗。

2) 基于使用DGS结构的可重构BSF,提出一种实现射频整流与通信发射集成的IRT结构。在相同射频输入功率下改变BSF的偏置电压进行信号调制,几乎对整流电路转换效率没有影响,展示了该结构在无线携能通信中的成功应用。

3) 在 $-20$  dBm射频输入功率下,实现了RF-DC转换和低功率上行通信的同时进行。上行通讯数据速率达到100 Kbps,且平均直流功耗仅为 $2.35$   $\mu$ W。

## 参考文献:

- [1] 赵磊. 基于物联网感知层的无线传感器网络融合的研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.
- [2] CHENG Long, NIU Jianwei, LUO Chengwen, et al. Towards minimum-delay and energy-efficient flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks[J]. *Computer networks*, 2018, 134: 66–77.
- [3] 王公仆, 熊轲, 刘铭, 等. 反向散射通信技术与物联网[J]. *物联网学报*, 2017, 1(1): 67–75.
- [4] ZHAO Qian, NAKAMOTO Y, HUSSIN Z. Energy-efficient protocol for extending battery life in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Philadelphia, USA: IEEE, 2013: 8–11.
- [5] 谭哲锟, 刘长军. 一种双频低功率基于微带结构的微波整流电路[J]. *应用科技*, 2018, 45(1): 61–64, 72.
- [6] PERERA T D P, JAYAKODY D N K, SHARMA S K, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): recent advances and future challenges[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2018, 20(1): 264–302.
- [7] 郑祖翔, 吴乐南. 无线携能通信研究进展[J]. *无线通信*, 2013, 3(6): 155–163.
- [8] ZHANG Hao, GUO Yongxin, GAO Siping, et al. Exploiting third harmonic of differential charge pump for wireless power transfer antenna alignment[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2019, 29(1): 71–73.
- [9] ALIMENTI F, PALAZZI V, MEZZANOTTE P, et al. Zero-power temperature sensor for wireless harmonic systems based on a reflection-type phase shifter and a bimorph cantilever[C]//Proceedings of 2020 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks. San Antonio, USA: IEEE, 2020: 5–8.
- [10] GU Xiaoqiang, SRINAGA N N, GUO Lei, et al. Diplexer-based fully passive harmonic transponder for Sub-6-GHz 5G-compatible IoT applications[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2019, 67(5): 1675–1687.
- [11] PALAZZI V, ALIMENTI F, KALIALAKIS C, et al. Highly integrable paper-based harmonic transponder for low-power and long-range IoT applications[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2017, 16: 3196–3199.
- [12] RAJABI M, PAN Ning, CLAESSENS S, et al. Modulation techniques for simultaneous wireless information and power transfer with an integrated rectifier-receiver[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2018, 66(5): 2373–2385.

(下转第69页)

## 参考文献:

- [1] XU Dazhuan, SHI Chao, ZHOU Ying, et al. Spatial information in phased-array radar[J]. *IET communications*, 2020, 14(13): 2141–2150.
- [2] FENG Ziang, HU Guoping, ZHOU Hao. Sparsity-based DOA estimation with gain and phase error calibration of generalized nested array[J]. *Mathematical problems in engineering*, 2020: 1720310.
- [3] NAZAROFF M, BYUN G, CHOO H, et al. 2-D direction-of-arrival estimation system using circular array with mutually coupled reference signal[J]. *IEEE sensors journal*, 2018, 18(23): 9763–9769.
- [4] DJUROVIĆ I, SIMEUNOVIĆ M, LUKIN V V. Estimating DOA and PPS parameters of signal received by ULA in heavy noise environment[J]. *Journal of electrical engineering*, 2020, 71(3): 175–184.
- [5] 张小飞, 李建峰, 徐大专. 传感器阵列信源定位 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 1–4, 73–79.
- [6] VALAEE S, CHAMPAGNE B. Parametric localization of distributed sources[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 1995, 43(9): 2144–2153.
- [7] ROY R, KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 1989, 37(7): 984–995.
- [8] 朝乐蒙, 邱天爽, 李景春, 等. 广义复相关熵与相干分布式非圆信号 DOA 估计 [J]. *信号处理*, 2019, 35(5): 795–801.
- [9] CHENG Qianlin, ZHANG Xiaofei, CAO Renzheng. Fast parallel factor decomposition technique for coherently distributed source localization[J]. *Journal of systems engineering and electronics*, 2018, 29(4): 667–675.
- [10] BENGTTSSON M, OTTERSTEN B. Low-complexity estimators for distributed sources[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2000, 48(8): 2185–2194.
- [11] SHAHBAZPANAHI S, VALAEE S, BASTANI M H. Distributed source localization using ESPRIT algorithm[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2001, 49(10): 2169–2178.
- [12] 崔维嘉, 代正亮, 巴斌, 等. 基于互相关抽样分解的分布式非圆信号 DOA 快速估计 [J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(5): 1226–1233.
- [13] 杜金香, 冯西安. 基于四阶累积量的波束域 MUSIC 方法 [J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(5): 684–687.
- [14] PORAT B, FRIEDLANDER B. Direction finding algorithms based on high-order statistics[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 1991, 39(9): 2016–2024.
- [15] 朱敏, 何培宇. 一种新的基于四阶累积量的 DOA 估计算法 [J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2011, 48(2): 343–348.
- [16] 杨松涛, 许海韵, 王大鸣, 等. 互质阵型下基于四阶累积量的高自由度低复杂波达方向估计方法 [J]. *信息工程大学学报*, 2019, 20(6): 647–652.
- [17] 赵宇. 基于四阶统计量的虚拟天线阵波束形成及 DOA 估计技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 34–37.

## 本文引用格式:

陈增茂, 葛梁, 白永珍, 等. 基于四阶累积量的非相干分布式信源测向算法 [J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 64–69.

CHEN Zengmao, GE Liang, BAI Yongzhen, et al. An incoherently distributed source direction finding algorithm based on fourth-order cumulant[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 64–69.

(上接第 63 页)

- [13] CLAESSENS S, PAN Ning, SCHREURS D, et al. Multitone FSK modulation for SWIPT[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2019, 67(5): 1665–1674.
- [14] CHOI K W, HWANG S I, AZIZ A A, et al. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) for internet of things: novel receiver design and experimental validation[J]. *IEEE internet of things journal*, 2020, 7(4): 2996–3012.
- [15] ABDEL-RAHMAN A, ALI A R, AMARI S, et al. Compact bandpass filters using defected ground structure (DGS) coupled resonators[C]//Proceedings of 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach, USA: IEEE, 2005: 12–17.

## 本文引用格式:

孙雪曼, 武鹏德, 刘长军. 一种低功耗无线携能通信中整流电路集成上行链路的研究 [J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 60–63, 69.

SUN Xueman, WU Pengde, LIU Changjun. Study on the integrated uplink of rectifier circuit in a low-power wireless energy-carrying communication[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 60–63, 69.