

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210218

用于能量收集的低功率宽带宽输入整流器*

刘鑫¹ 张大维¹ 李迎松^{1,2} 姜致¹

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001; 2. 安徽大学电子与信息工程学院 合肥 230601)

摘要: 本文提出了一种具有宽动态输入功率范围的宽带整流器,主要用于低输入功率条件。提出的整流器利用肖特基二极管的单向导电性和并联型电路拓扑结构进行整流。在提出的结构中,采用了由两级微带线和匹配电感组成的宽带阻抗匹配网络,以减少失配损耗,并在工作范围内实现高射频到直流的功率转换效率(PCE)。其中匹配电感是为了抵消二极管的电容。提出的整流器被设计、优化、仿真、制造和测试。测试结果与仿真结果非常吻合。在输入功率范围为 $-1\sim 10$ dBm,带宽为 $1.8\sim 2.8$ GHz(相对带宽为 43.4%)的情况下,PCE大于 50% 。此外,在输入功率为 10 dBm时,PCE峰值为 76.4% 。与以前的类似工作相比,本文提出的整流器工作于最低的功率水平,使其在射频能量收集的发展中具有重要的应用前景。

关键词: 宽带整流器;宽输入功率范围;低功率;射频能量收集

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Low power broadband rectifier with wide dynamic input power range for RFEH

Liu Xin¹ Zhang Dawei¹ Li Yingsong^{1,2} Jiang Tao¹(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: This paper proposes a broadband rectifier with wide dynamic input power range, which is mainly used in low input power condition. The proposed rectifier uses unidirectional conductivity of Schottky diodes and a parallel-type circuit topology for rectification. In the proposed structure, a broadband impedance matching network consisting of a two-stage microstrip lines and a matching inductance are adopted to reduce the mismatch loss and achieve high radio frequency (RF) to DC power conversion efficiency (PCE) over the operating range, where the matching inductance is to offset the capacitance of the diode. The proposed rectifier is designed, optimized, simulated, fabricated and measured. The measured results agree well with the simulations. With an input power range of $-1\sim 10$ dBm and a bandwidth of $1.8\sim 2.8$ GHz (fractional bandwidth of 43.4%), the PCE is greater than 50% . Besides, a peak PCE of 76.4% is obtained at an input power of 10 dBm. Comparing with previous similar work, this proposed rectifier operates at the lowest power level, making it amazing in the development of RF-harvesting.

Keywords: broadband rectifier; wide input power range; low input power; RF-harvesting

0 引言

射频能量收集(radio frequency energy harvesting, RFEH)技术源自无线功率传输(wireless power transfer, WPT),旨在从人们的生活环境中回收多余的电磁能量^[1],为难以获得有线电源的电子设备充电,从而摆脱电子设备寿命受电池影响的限制^[2]。因此,射频能量收集在科学研究和工业领域引起了极大关注。特别是近年来,可植入医

疗设备、智能家居和无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)应用中也需各种射频能量收集设备^[3]。在RFEH中,整流器是RFEH技术的关键部件^[4],目的是将天线收集到的射频能量转换为直流能量^[5]。

如今,物联网(Internet of Things, IoT)技术的兴起,使人们的日常生活占用了越来越多的无线电频段,电磁能量也因此得到了更广泛分布^[6]。因此,整流器需要覆盖更多

收稿日期:2022-06-05

* 基金项目:毫米波国家重点实验室开放项目(K2020017)、黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2021F014)、中央高校基本科研业务费专项资金(3072022CF0806)项目资助

的频带,以最大限度地获取能量^[7]。随着需求的发展,宽带整流器的设计也取得了很大的进展。例如,引入了非均匀传输线,实现单倍频程的带宽^[8]。Mansour 等^[9]使用共面波导(coplanar waveguide, CPW)传输线的整流器在输入功率为 10 dBm,频率带宽为 0.1~2.5 GHz 时,射频到直流转换效率(power conversion efficiency, PCE)超过 45%。华南理工大学 Zhang^[10]提出了一种由两级耦合器组成的整流器,可以对阻抗失配产生的反射功率进行重新整流,从而在 2.08~2.58 GHz 范围内实现 21.5%的相对带宽和 70%以上的 PCE。此外,在不同的环境中,射频能量的密度变化很大,功率水平普遍偏低。因此,设计能够用于多输入功率电平,并保持高 PCE 的整流器也同样重要^[11]。Hamano 等^[12]开发了一种顺序功率传输系统,成功扩展整流器的输入功率范围。四川大学 Lu 等^[13]采用两个具有不同阈值电压(V_r)和击穿电压(V_b)的二极管,实现了宽输入功率范围的整流器设计。综上所述,尽管在实现整流器的宽带或宽输入功率方面已经有了相当多的方案,但同时实现这两种特性的结果仍然很少。并且输入功率都相对较高。因此,研究能够同时工作于宽带和宽动态输入功率范围的低功率整流器是一个巨大的挑战且具有很大的实际意义^[14]。

为了解决上述问题,本文提出了一种用于低输入功率条件下的宽带宽动态输入功率范围的整流器。该整流器引入了一个匹配电感来抵消肖特基二极管的电容特性,并通过一个由两级微带线组成的匹配网络实现宽带和宽输入功率范围的阻抗匹配。同时,该整流器保持了紧凑的尺寸。在实验中,采用安捷伦 PNA-X 矢量网络分析仪输出功率,

用万用表来测量两个可调电阻箱的电压,通过公式计算整流器的 PCE。提出的整流器在工作频率为 1.8~2.8 GHz,输入功率为 -1~10 dBm 时,可实现射频到直流功率转换效率大于 50%,相对带宽超过 40%,在输入功率为 9 dBm 时峰值 PCE 高达 76%。

1 整流器设计原理

微波整流器是利用肖特基二极管的单向导电性将微波能量转换为直流能量的器件。肖特基二极管与其他二极管相比,具有阈值电压低、结电阻小、响应灵敏度高的特点,更适用于微波频段的整流。此外,肖特基二极管在整流时表现为非线性电阻元件,此时的肖特基二极管可以由寄生电阻 R_s 、结电容 C_j 和结电阻 R_j 组成的电路进行等效^[15]。其中,结电容 C_j 和结电阻 R_j 的存在,导致了高次模的产生,进而降低了整流器的 PCE。当输入功率较小时,肖特基二极管两端的压降小于导通压降,肖特基二极管处于截止状态,PCE 偏低;随着输入功率的增加,PCE 也逐步增大。然而,高次模的存在限制了 PCE 的增加,当功率达到一定程度时,PCE 趋于稳定;如果输入功率继续增大,肖特基二极管将被击穿,PCE 将急剧减小。

图 1 为所提出的用于 RFEH 的低功率宽带宽输入整流器的设计原理图,该低功率整流器电路由一个负载电阻、一个直通滤波器(A 部分)、一个 HSMS2860 肖特基二极管、一个匹配电感(B 部分)和一个匹配电路(C 部分)组成。为了后文进一步叙述的方便,将工作范围的中心频率描述为 f_c ,将工作范围的频率下限和上限分别表示为 f_1 和 f_2 。

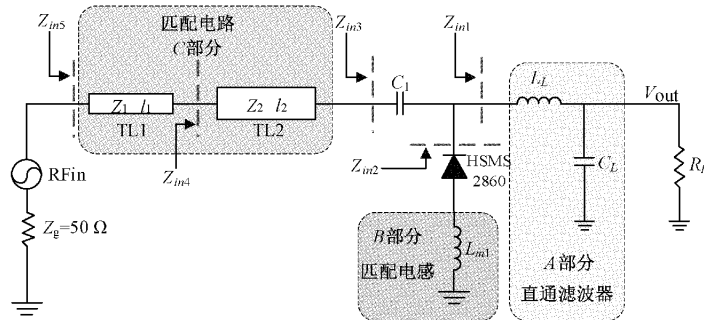


图 1 低功率整流器电路原理

此外,由微波工程的理论可知,整流器各部分的输入阻抗可以由如下公式进行计算^[16]:

$$Z_{in}(z) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (1)$$

其中, Z_0 为微带传输线的特性阻抗; Z_L 为负载阻抗; βl 表示传输线的电长度。

2 低功率整流器的设计与仿真

2.1 直通滤波器的设计

直通滤波器主要有两个作用,即平滑输出直流,并将基频和高次谐波反射到肖特基二极管上,再次进行整流以

提高 PCE。在本设计中,直通滤波器由一个电感(L_L)和一个电容(C_L)组成。与传统的只有一个电容构成的直通滤波器相比,具有更宽的射频阻带。滤波器的截止频率(f_{cut})可以从如下公式得出^[17]:

$$f_{cut} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2)$$

2.2 阻抗匹配网络的设计

整流器的阻抗匹配网络由两条微带传输线 TL1、TL2 (C 部分) 和一个匹配电感 L_{m1} (B 部分) 组成。其中, L_{m1} 主要是为了抵消并联支路的肖特基二极管在相关工作频率和输入功率范围内引入的电容特性。因此,肖特基二极

管的输入阻抗可以表示为 $Z_d = R_d - jX_d$, 则 Z_{in3} 可以表示为:

$$Z_{in3} = \frac{Z_{in1}(Z_d + Z_{in2})}{Z_{in1} + Z_d + Z_{in2}} \quad (3)$$

其中, $Z_{in1} = \infty$, 因为直通滤波器对所有射频信号都是开路的, 而匹配电感是用来补偿二极管的电容特性。因此, 在史密斯圆图中, $Z_{in3}(f_1)$ 和 $Z_{in3}(f_2)$ 应该是实轴对称的, $Z_{in3}(f_c)$ 是纯电阻。则:

$$\text{Im}(Z_{in3}(f_1)) = -\text{Im}(Z_{in3}(f_2)) \quad (4)$$

综上所述, 在输入功率为 -1、5、10 dBm 时的输入阻抗 Z_{in3} 如图 2 所示。

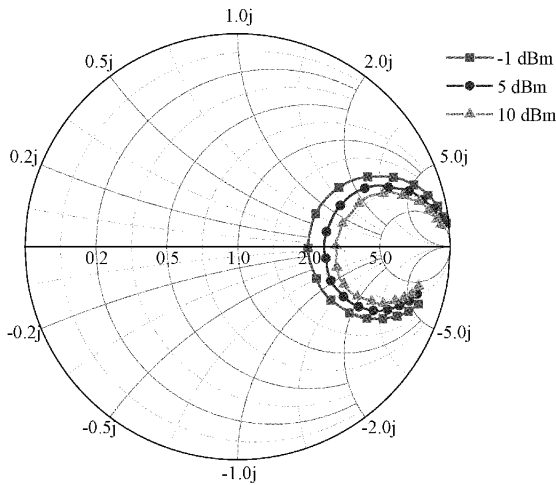


图 2 在 1.5~3.5 GHz 范围内不同的输入功率电平下的 Z_{in3}

作为阻抗匹配网络的一部分, 用两阶微带传输线将整流器的输入阻抗匹配至 50Ω 。经过两阶微带传输线后的输入阻抗分别表示为 Z_{in4} 和 Z_{in5} , 则有:

$$Z_{in4}(f) = Z_1 \frac{Z_{in3}(f) + jZ_1 \tan\theta_1(f)}{Z_1 + jZ_{in3} \tan\theta_1(f)} \quad (5)$$

$$Z_{in5}(f) = Z_2 \frac{Z_{in4}(f) + jZ_2 \tan\theta_2(f)}{Z_2 + jZ_{in4} \tan\theta_2(f)} \quad (6)$$

在输入功率为 -1、5、10 dBm 时的输入阻抗 Z_{in5} 如图 3 所示。在本文中, 整流器采用了 HSMS2860 肖特基二极管和村田的 GRM18 电容和 LQW18 电感, 并利用 ADS (advanced design simulation) 软件中的 SPICE (simulation program with integrated circuit emphasis) 进行的数值分析和设计。

3 实验结果

根据前面的理论分析, 为了进一步验证所提出的低功率宽带输入整流器, 在 ADS 中对其进行了进一步的优化, 并获得了整流器的版图, 如图 4 所示。整流器印刷在厚度为 0.762 mm 的 F4B ($\epsilon_r = 2.55, \tan D = 0.002$) 介质基板上, 尺寸为 $28 \times 13 \text{ mm}^2$, 其余参数如图 4 所示。射频-直流的能量转换效率通过下式进行计算^[18]。

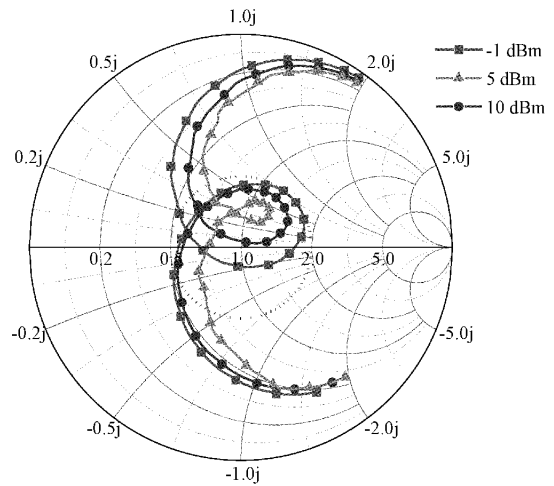


图 3 在 1.5~3.5 GHz 范围内不同的输入功率电平下的 Z_{in5}

$$PCE(\%) = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} = \frac{V_{out}^2}{R_L \cdot P_{RF}} \quad (7)$$

式中: P_{DC} 为直流功率, P_{RF} 为射频功率, R_L 为负载电阻, V_{out} 为负载上的电压。

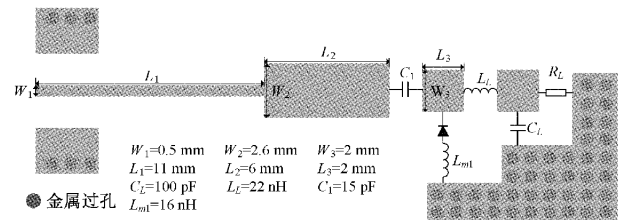


图 4 低功率整流器的版图

在实验中, 使用安捷伦 PNA-X 矢量网络分析仪作为信号发生器。同时, 使用两个电阻值可调的电阻箱代替焊接电阻, 以便调整和测量。使用万用表测量电阻箱的电压。此外, 负载还可以连接到直流-直流转换器, 使这种整流器更广泛地用于不同的工作场景中。实验装置如图 5(a) 所示。图 5(b) 为整流器的 S 参数, 从图中可以看出, 所设计的低功率宽带输入整流器可以覆 $1.8 \sim 2.8 \text{ GHz}$ 。在输入功率为 -1、5、8、10 dBm 时, 仿真的 PCE 与实测的 PCE 的对比结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 仿真和测试的结果吻合很好。所提整流器的仿真的 PCE 与输入功率和工作频率的关系如图 7 所示。当输入功率

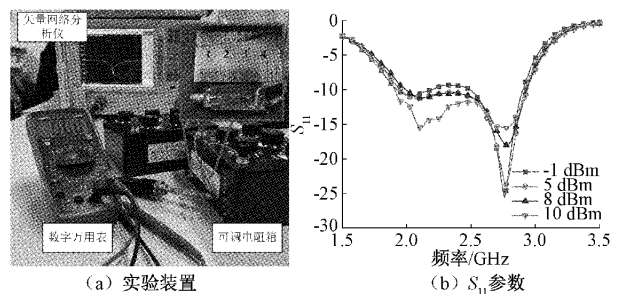


图 5 实验装置及 S_{11} 参数

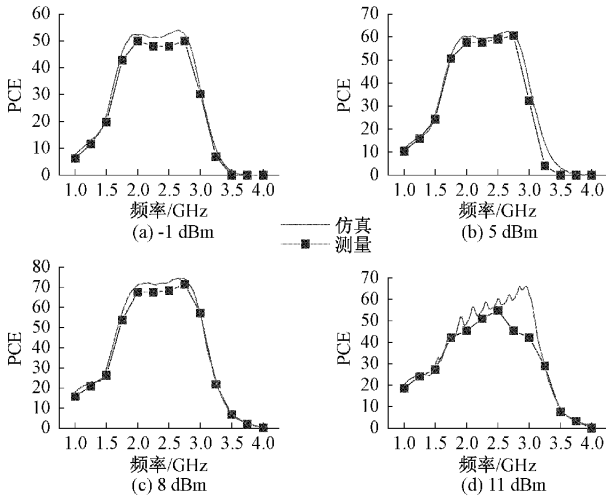


图 6 仿真和测量的 PCE 与工作频率的关系

从 -1~10 dBm 变化时,整流器的 PCE 在 1.8~2.8 GHz 的工作频率下大于 50%。仿真和测量之间存在的频移和 PCE 的下降,是由制造误差以及肖特基二极管模型和实际元件之间的差异造成的。

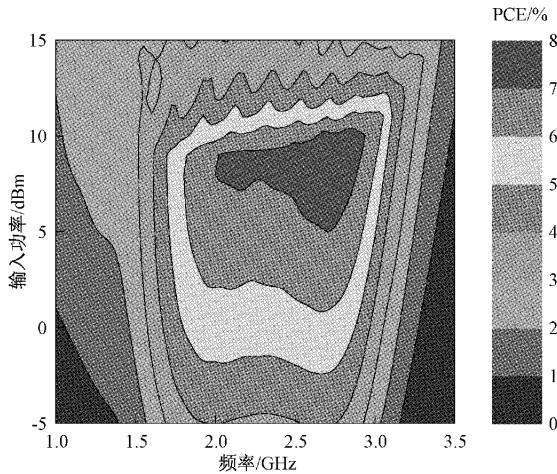


图 7 PCE 与工作频率和输入功率的关系

为了进一步阐述所提整流器的性能,所提的整流器与一些前期工作进行对比,比较结果如表 1 所示。从对比中可以发现,本文中设计的整流器具有最低的输入功率,且带宽较宽,且 PCE 较高,尺寸小。

表 1 所设计整流器与其它整流器的比较

参考 文献	频率/ GHz	相对 带宽	最大- PCE	输入功率/ dBm	尺寸/ mm ²
[10]	2.08~2.9 PCE>40%	32%	80.8%	4~19 PCE>40%	126×68
[19]	1.8~2.72	40%	80.3%	19.5	60×25
[20]	1.47~1.77	18.5%	74.2%	10	71×20
[21]	2.1~3.3	44.4%	76.3%	4~16	31×18
本文	1.8~2.8	43.4%	76.4%	-1~10	28×13

4 结 论

本文提出了一种在低功率水平下具有宽动态输入功率范围的宽带整流器。宽带阻抗匹配是通过两条微带线和匹配电感构成的阻抗匹配网络实现的。此外,在保持高 PCE 的同时实现了紧凑尺寸设计。实验与仿真结果的一致性证明了该方法在提高带宽、输入功率范围和单频输入功率范围方面的有效性。所提出的整流器在工作频率为 1.8~2.8 GHz,输入功率范围为 -1~10 dBm 范围内的 PCE 达到 50% 以上,相对带宽为 43.4%。在输入功率为 9 dBm 时,整流器的最大转换效率为 76.4%。本文所提出的技术也可应用于其它整流器电路,并对 RFEH 系统性能的提升具有重要的潜在影响。

参 考 文 献

- [1] ZENG Z. A reconfigurable rectifier with optimal loading point determination for RF energy harvesting from -22 dBm to -2 dBm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(1): 87-91.
- [2] WAGIH M. Rectennas for radio-frequency energy harvesting and wireless power transfer: A review of antenna design[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2020, 62(5): 95-107.
- [3] 谭冠南,杨雪霞. 高效平面印刷毫米波段整流电路设计与实验[J]. 电波科学学报, 2015, 30(6): 1131-1136.
- [4] 姜萍萍,付文浩,王志武,等. 用于胃肠道微型机器人的组合螺旋管式无线能量发射系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 114-122.
- [5] 高明明,宋杨,南敬昌,等. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 253(1): 149-156.
- [6] 陈娟. 小面积 NFC 天线设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 144-148.
- [7] WU P. Compact high-efficiency broadband rectifier with multi-stage-transmission-line matching[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(8): 1316-1320.
- [8] KIMIONIS J. Octave and decade printed UWB rectifiers based on nonuniform transmission lines for energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(11): 4326-4334.
- [9] MANSOUR M M, KANAYA H. High-efficient broadband CPW RF rectifier for wireless energy harvesting [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(4): 288-290.
- [10] ZHANG X Y. High-efficiency broadband rectifier

- with wide ranges of input power and output load based on branch-line coupler [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2017, 64(3): 731-739.
- [11] 刘建. 面向微波输能的高效率整流电路与天线研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [12] HAMANO K, TANAKA R, YOSHIDA S, et al. Wide dynamic range rectifier circuit with sequential power delivery technique [C]. European Microwave Conference, 2017:1155-1158.
- [13] LU P, SONG C, HUANG K M. A compact rectenna design with wide input power range for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6705-6710.
- [14] 杜志侠. 面向微波能量传输的高性能微波源和整流天线研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [15] YOO T W, CHANG K. Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(6): 1259-1266.
- [16] DU Z X, BO S F, CAO Y F, et al. Broadband circularly polarized rectenna with wide dynamic-power-range for efficient wireless power transfer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80561-80571.
- [17] LU P, SONG C, HUANG K M. Ultra-wideband rectenna using complementary resonant structure for microwave power transmission and energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(7): 3452-3462.
- [18] HE Z, LIN H, ZHU H, et al. A compact high-efficiency rectifier with a simple harmonic suppression structure [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(12): 1177-1180.
- [19] LI L F, YANG X, LIU E J. A broadband high efficiency rectifier based on two-level impedance match network[J]. Progress in Electromagnetics Research-pier, 2018, 72: 91-97.
- [20] SAKAKI H, NISHIKAWA K. Broadband rectifier design based on quality factor of input matching circuit[C]. 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, 2015.
- [21] HE Z, LIU C. A compact high-efficiency broadband rectifier with a wide dynamic range of input power for energy harvesting[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(4): 433-436.

作者简介

刘鑫, 硕士研究生, 主要研究方向为整流天线设计、圆极化天线。

E-mail: lx11739@163.com

张大维(通信作者), 博士, 讲师, 研究生导师, 主要研究方向为人工电磁媒质、微波毫米波电路与系统。

E-mail: zdw@hrbeu.edu.cn

李迎松, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代天线技术、微波工程、通信信号处理、自适应信号处理、SAR雷达、雷达成像。

E-mail: yingsong.li@aliyun.com

姜弢, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容与防护、电磁环境建模与仿真、电磁隐身效能评估。

E-mail: jiangtao@hrbeu.edu.cn