



# 一种具有超宽输入功率范围的三路整流电路

## 摘要

本文提出一种具有超宽输入功率范围的三路整流电路.通过在三条整流支路中采用不同阈值电压的二极管,使每条支路对不同输入功率进行高效整流,三条整流支路协同作用,使所提出的整流电路能够在超宽输入功率范围内保持高效率工作;设计并实现了一个工作在 2.4 GHz 的三支路整流电路,三条整流支路分别实现在 -10~11、11~24 和 24~35 dBm 的功率范围内,效率保持在 30% 以上.测试结果表明:在 -6~25 dBm 的输入功率范围内,电路的转换效率均可保持在 40% 以上,最高效率可以达到 71.2%.所提出的整流电路对输入功率的灵敏度较低,能够在超宽输入功率范围内实现高效率能量转换,可用于能量收集或动态无线能量传输系统中.

## 关键词

整流电路;宽功率范围;三路整流;高效率;无线能量传输

中图分类号 TN622

文献标志码 A

收稿日期 2023-07-07

资助项目 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2021A0015);安徽省自然科学基金项目(2208085QF182)

## 作者简介

王清华,女,博士,讲师,研究方向为无线能量传输、微波电路与天线. qinghua.wang@ahu.edu.cn

<sup>1</sup> 安徽大学 电子信息工程学院,合肥,230601

<sup>2</sup> 华南理工大学 电子与信息学院,广州,510640

## 0 引言

微波输能技术(Microwave Power Transmission, MPT)可实现远距离无线电能传输,在诸多领域中得到广泛应用,它主要由微波发射系统、自由空间和微波接收系统组成.在接收系统中,整流电路是负责将射频能量转换为直流能量的关键部件<sup>[1]</sup>.然而在实际应用中,系统所接收到的功率并非稳定不变.当输入功率发生变化时,整流电路的输入阻抗因整流二极管的非线性特性而剧烈波动,导致电路阻抗失配,引起转换效率恶化.因此,解决整流电路由于非线性所引起的性能恶化问题,由此提高电路的输入功率动态范围成为目前研究的关键问题<sup>[2]</sup>.

为解决电路阻抗失配所引起效率下降的问题,华南理工大学章秀银教授团队提出了阻抗压缩技术,利用实阻抗压缩网络和复阻抗压缩网络,将一定输入功率范围内的阻抗平坦化,从而改善电路的匹配性能并提高整流效率<sup>[3-4]</sup>.此外,Wu等<sup>[5]</sup>提出自调谐阻抗匹配技术,通过在电路中引入变容二极管,实现自调谐阻抗匹配以补偿输入功率引起的阻抗变化,这使得电路的匹配范围明显拓宽.除改善电路匹配情况以拓宽整流范围外,能量回收<sup>[6-7]</sup>的概念也应用到整流电路中,它通过引入分支线耦合器以控制反射能量的流向,电路能够对因失配而造成反射的能量再次整流,从而提高电路的总体整流效率并拓展了电路的整流范围.考虑到二极管自身的开启电压与击穿电压特性的限制,利用多个二极管电路结构进行切换也成为一种有效拓宽输入功率范围的解决方式.通过引入功分器、耦合器、射频开关等器件,电路能够根据输入功率的大小选择不同的二极管进行整流,从而实现在宽输入功率范围内保持高效率<sup>[8-11]</sup>.上述方法需要引入额外的器件,会因此增加电路的插入损耗,导致转换效率下降.Zheng等<sup>[12]</sup>提出一种协同工作的结构以拓宽整流电路的动态范围,无需引入额外的器件,根据输入功率水平进行能量路径选择,从而在宽输入功率范围内保持较高的转换效率.

前期工作有效地拓宽了整流电路的功率范围,但仍存在一些局限性.一方面其整流范围仍可进一步拓宽;另一方面,不少双路整流电路的转换效率会在功率范围内出现略微下降.在实际应用中,接收端的物体往往处于移动状态,其与发射源的距离并不固定,这就导致接收到的能量会剧烈变化.另外,在智慧生活、智能家居、万物互联等领

域所需要的能量也是不断变化的.为适应距离的动态变化并应用到更加丰富的场景,实现超宽输入功率范围内的高效率整流是十分有必要的.因此,本文提出一种三路整流电路.该电路采用三个不同阈值电压的二极管,构成三支路协同整流结构.该结构能够根据输入功率的大小,自适应地选择相应的支路以获得最大的整流效率,进而使电路在整个输入功率范围内均保持较高的效率.

## 1 三路整流电路设计

本文提出的三路整流电路由三条具有不同阈值电压的二极管整流支路组成.对于低输入功率情形,只有第一个二极管对射频功率进行整流.当输入功率逐渐增加使第二个二极管获得足够大的电压并导通时,该二极管将与前一级低输入功率整流二极管共同整流.随着输入功率进一步增加,支路3获得大部分的射频能量,三个二极管将同时工作.通过该三支路协同结构,有效地拓宽了输入功率整流范围.

为满足三支路协同作用结构,需选择适用于低、中、高三种不同输入功率范围的二极管.二极管的开启电压与击穿电压与最佳输入功率范围息息相关,前者决定了电路的最小工作范围,后者限制了电路的最大输入功率.具有低开启电压的二极管,在输入功率较低时便会导通整流.然而,低开启电压意味着低击穿电压.当二极管被击穿后会导致效率的骤然下降,因此,具有低开启电压的二极管不适用于高输入功率整流电路中.相应地,整流电路工作在高输入功率情况下,应选择具有高开启电压的二极管.

传统双路整流电路的原理如图 1a 所示,相较于三路整流电路缺少了对中输入功率状态时的考虑,电路只有两条整流支路级联而成.其中,支路1主要负责低输入功率状态下的整流,随着输入功率的不断增大至支路2导通工作时,支路2与支路1共同整流.为满足不同的输入功率状态,两条支路需分别选择具有低、高两种不同阈值电压的二极管.在实际的应用过程中,电路的高效率整流范围十分依赖两个二极管的选择:一方面,二极管之间较大的阈值电压差会使电路在功率范围内出现效率下降的问题;另一方面,阈值电压差较小的两个二极管则会使电路无法实现较宽的输入功率整流范围.为此,本工作所提出的电路采用了三个二极管,其分布情况如图 1b 所示.位于支路1的二极管 D1 具有低开启电压,它主要负责在低输入功率范围(-7~11 dBm)时整

流;当输入功率为中等功率范围(11~24 dBm)时,为防止二极管击穿后导致效率骤然下降,支路2应避免采用低开启电压的二极管,而需选取具有较高开启电压的二极管 D2;随着输入功率的进一步增大(24~35 dBm),同样考虑二极管击穿带来效率下降的问题,支路3中的二极管 D3 应具有比 D2 更高的开启电压.经综合分析考虑,本设计中支路1选择 HSMS2860 二极管(开启电压为 0.28 V),支路2选择 HSMS2820 二极管(开启电压为 0.35 V),支路3选择 HSMS2822 二极管(开启电压为 0.7 V).三个具有不同阈值电压的二极管协同工作,因而电路能够根据输入功率的大小自适应导通相应支路,以拓宽整流电路动态范围.

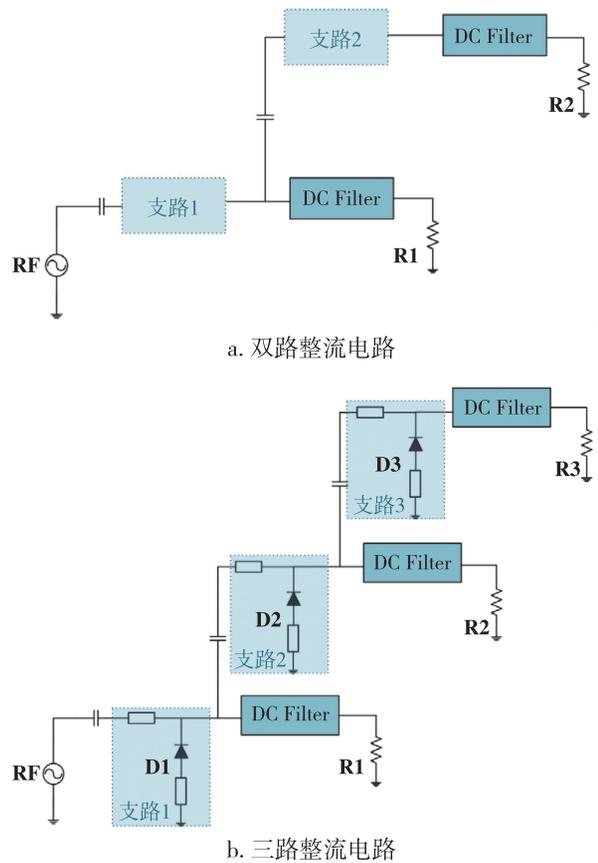


图 1 提出的整流电路原理

Fig. 1 Schematic of the proposed rectifiers

为了进一步说明所提出的三路整流电路的工作状态,图 2 展示了该整流电路在不同输入功率下能量的分配情况.图 2a 为低输入功率时电路的工作状态,位于支路1中的二极管 D1,其开启电压最小,此时较低的输入功率导致二极管两端电压较低,仅仅使二极管 D1 导通,二极管 D2、D3 未导通,因此流入电路中的射频能量仅由 D1 进行整流,经整流滤波后

的直流能量流入负载  $R_1$ 。随着输入功率不断提高, 电路的工作状态如图 2b 所示, 此时位于支路 2 中的二极管  $D_2$  两端的电压逐渐达到其开启电压从而导通, 而具有较高开启电压的二极管  $D_3$  仍未导通, 整流电路由二极管  $D_1$  与  $D_2$  协同工作, 由整流电路转换的 DC 能量流入到负载  $R_1$  和  $R_2$ 。当输入功率进一步提高, 电路的工作状态如图 2c 所示, 此时较高的输入功率使支路 3 中二极管  $D_3$  两端的电压足够大从而实现导通, 整流电路中的三个二极管均能导通, 三条整流支路协同工作。

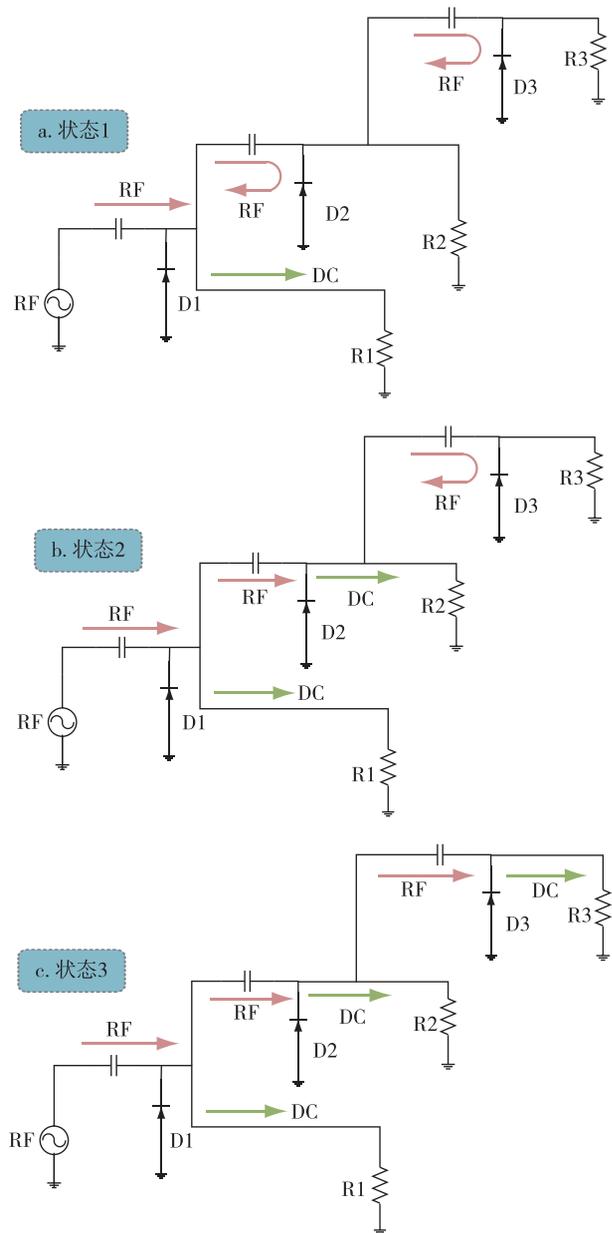


图 2 提出的整流电路能量分配情况

Fig. 2 Power distributions of the proposed rectifier

具有三个不同阈值电压的二极管构成了三支路

协同作用的整流电路结构, 该结构能够根据输入功率大小自适应地导通整流支路, 实现了在低、中、高三种输入功率下的高效率工作, 从而拓宽整流电路的输入功率范围. 相较于双路整流电路, 本工作考虑了中等输入功率时电路的工作状态, 有效地避免了输入功率由低到高变化过程中效率下降的问题。

## 2 电路仿真与测试

根据上述思路, 本文设计了一款具有超宽输入功率的三路整流电路. 电路印刷在介电常数为 3.55、损耗角正切为 0.002 2、板厚为 0.813 mm 的 RO4003 高频介质板上, 电路总尺寸为 88 mm×54 mm, 结构如图 3 所示。

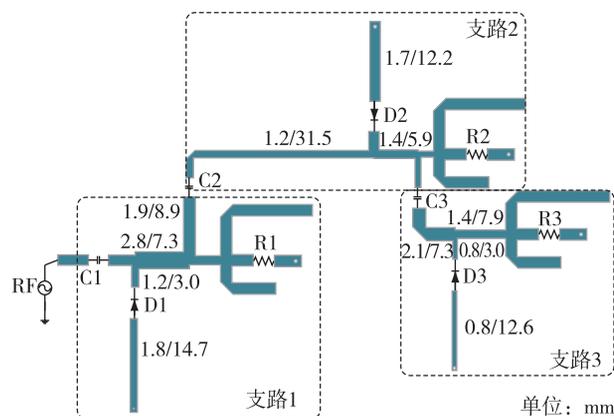


图 3 提出的整流电路结构

Fig. 3 Structure of the proposed rectifier

整流电路中射频-直流能量转换效率定义为

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{in}} = \frac{V_{out1}^2}{P_{in} R_1} + \frac{V_{out2}^2}{P_{in} R_2} + \frac{V_{out3}^2}{P_{in} R_3} \quad (1)$$

其中:  $P_{in}$  为输入功率;  $V_{out1}$ 、 $V_{out2}$  和  $V_{out3}$  分别为负载  $R_1$  ( $1\ 500\ \Omega$ )、 $R_2$  ( $790\ \Omega$ ) 和  $R_3$  ( $400\ \Omega$ ) 获得的直流电压。

图 4 为不同输入功率下三条支路的整流效率仿真曲线. 可以看出, 支路 1、支路 2 和支路 3 分别在  $-10\sim 11$ 、 $11\sim 24$  和  $24\sim 35$  dBm 的输入功率范围内效率保持在 30% 以上。

通过仿真可以得到不同输入功率情况下电路的反射系数与整流效率变化情况. 在所提出的三路协同作用整流电路中, 支路 1、支路 2 和支路 3 分别对低、中、高三种不同输入功率下的输入阻抗进行阻抗匹配. 因此, 由图 5 可以看出, 在  $-10\sim 35$  dBm 的超宽范围内, 电路的反射系数  $S_{11}$  均小于  $-10$  dB, 说明在整个输入功率范围内三路整流电路实现较好的阻抗

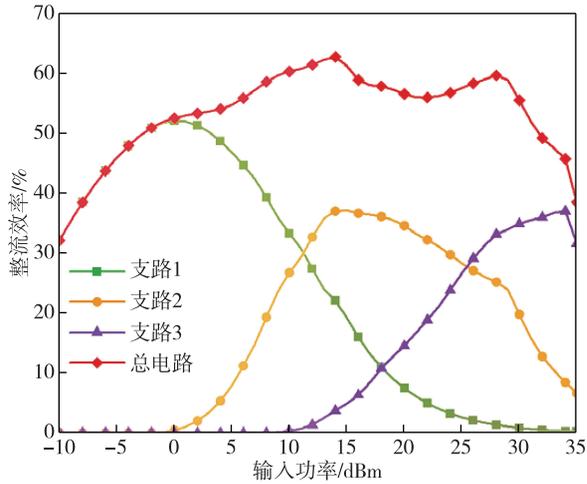


图4 提出的整流电路中每条支路效率仿真曲线  
Fig. 4 Simulated efficiency in each branch of the proposed rectifier

匹配.由于传统的双路整流电路仅具有两种整流状态,电路无法适应更宽输入功率的阻抗变化.因此,双路整流电路仅在-10~28.8 dBm 的输入功率范围内实现较好的匹配.

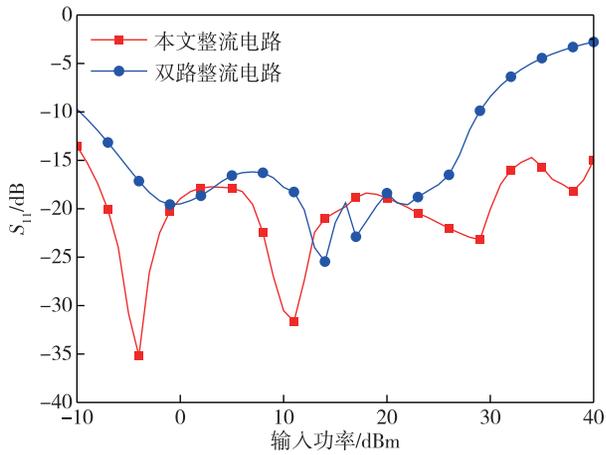


图5 整流电路  $S_{11}$  仿真曲线  
Fig. 5 Simulated  $S_{11}$  of the rectifiers

此外,观察图6中电路的整流效率曲线可以看出,在-7~34.5 dBm 的输入功率范围内,本电路的效率均保持在40%以上,且当输入功率为14 dBm 时,整流电路的效率达到最大值62.8%.良好的匹配性能可以减小电路的能量损耗,保障电路高效率整流.由图5可知,当输入功率大于28.8 dBm 时,传统的双路整流电路匹配性能恶化,因而在图6中,其整流效率也相应地急剧下降,电路仅在-8~28.5 dBm 的输入功率范围内效率大于40%.另外,在12~22 dBm 的输入功率范围内,双路整流电路的效率出现

明显下降,所提出的电路则改善了这一问题.与传统的整流电路相比,所提出的三路整流电路不仅具有超宽输入功率范围,同时在工作范围内均保持较好的稳定度.

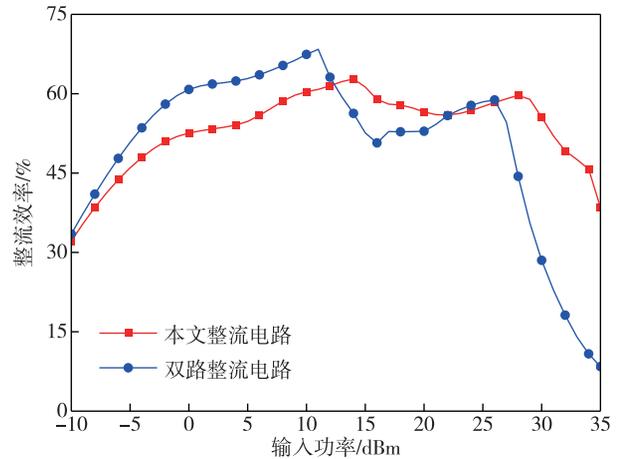


图6 整流电路效率仿真曲线  
Fig. 6 Simulated efficiency of the rectifiers

为了验证所提出的整流电路结构的性能,对结构进行加工与实验验证,电路实物及测试系统如图7所示.电路的大信号输入由信号发生器与功率放大器共同提供,经整流后负载两端的直流电压由万用表测得.图8为电路反射系数  $S_{11}$  随输入功率变化的测试曲线,可以看出:在整个输入功率范围内(-10~20 dBm),  $S_{11}$  均小于-10 dB,电路实现了较好的阻抗匹配.计算得到整流电路的测试效率曲线如图9所示.可以看出:电路在-6~25 dBm 的输入功率范围内,整流效率均在40%以上.当输入功率为13 dBm 时,电路达到其最高整流效率为71.2%.整流电路测试结果与仿真结果基本吻合,仅在输入功率较低时存在微小的差别,这一差异的来源可能为:1)二极管模型的不准确:仿真所采用的二极管封装模型与实际二极管参数存在略微的差别,从而引起整流效率的波动.2)工艺上的误差:电路加工时精度不足0.01



图7 电路实测系统  
Fig. 7 Test system of the proposed rectifier

mm, 加工误差会影响电路的匹配性能, 进而带来电路整流效率的变化. 3) 焊接的影响: 焊接二极管、电容、电阻以及 SMA 接头等器件过程中容易引入寄生电容、寄生电感, 也因此会影响电路的整流效率.

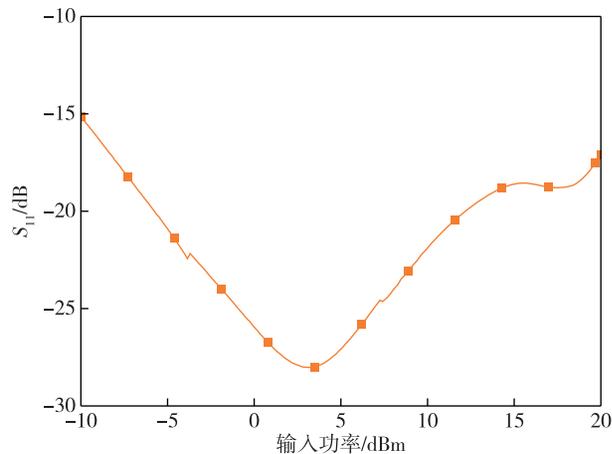


图 8 提出的整流电路  $S_{11}$  测试曲线

Fig. 8 Measured  $S_{11}$  of the proposed rectifier

为进一步验证本文所提出的整流电路的优势, 表 1 对相关研究工作与当前的参考文献进行了对比. 可以看出, 所提出的三路整流电路不仅具有超宽的输入功率范围, 同时, 电路的效率最大值较高, 电路的整体尺寸也有比较优势.

表 1 整流电路对比

Table 1 Comparison of the proposed rectifier with rectifiers in reference work

文献	工作频率/ GHz	二极管数量	效率最大值/ %	输入功率范围 (效率>40%)/dBm	尺寸
[7]	2.45	3	64.0	-4~30	160 mm×140 mm
[8]	2.45	2	47.5	12~15	80 mm×40 mm
[10]	2.40	3	39.0		275 mm×220 mm
本文	2.40	3	71.2	-6~25	88 mm×54 mm

### 参考文献

#### References

[1] 杨雪霞. 整流天线研究进展及设计方法概述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(1): 15-24  
YANG Xuexia. Research development of rectennas and outline of design methods [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(1): 15-24

[2] 杜志侠, 章秀银, 郑艳华. 宽功率微波整流电路研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(1): 25-33  
DU Zhixia, ZHANG Xiuyin, ZHENG Yanhua. Research progress in microwave rectifier with wide operating power range [J]. Journal of Nanjing University of Information

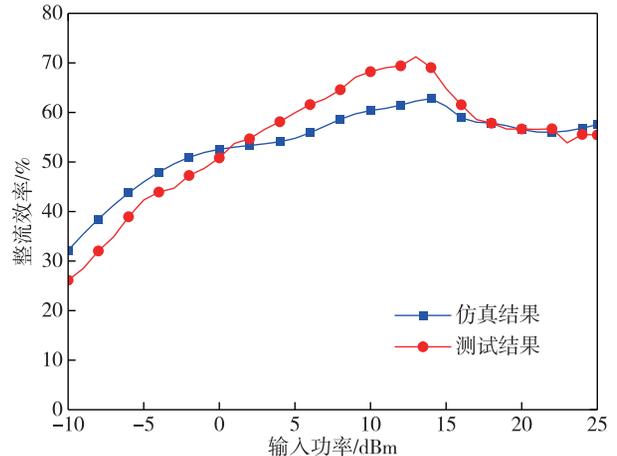


图 9 提出的整流电路效率测试曲线

Fig. 9 Measured efficiency of the proposed rectifier

### 3 结论

本文提出一种具有超宽输入功率范围的路三路整流电路. 该电路基于三个不同阈值电压的二极管, 实现了低、中、高三不同输入功率范围内的高效率整流, 进而拓宽了电路的输入功率工作范围. 测试结果表明, 提出的三路整流电路具有超宽的输入功率工作范围, 电路能够在 -6~25 dBm 的输入功率范围内效率均保持 40% 以上, 且最高效率可达 71.2%.

Science & Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(1): 25-33

[3] Lin Q W, Zhang X Y. Differential rectifier using resistance compression network for improving efficiency over extended input power range [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(9): 2943-2954

[4] Du Z X, Zhang X Y. High-efficiency single- and dual-band rectifiers using a complex impedance compression network for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5012-5022

[5] Wu P D, Huang S Y, Zhou W S, et al. High-efficient rectifier with extended input power range based on self-tuning impedance matching [J]. IEEE Microwave and

- Wireless Components Letters, 2018, 28(12):1116-1118
- [ 6 ] Du Z X, Zhang X Y. High-efficiency microwave rectifier with less sensitivity to input power variation [ J ]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(11):1001-1003
- [ 7 ] Xiao Y Y, Du Z X, Zhang X Y. High-efficiency rectifier with wide input power range based on power recycling [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(6):744-748
- [ 8 ] Hamano K, Tanaka R, Yoshida S, et al. Wide dynamic range rectifier circuit with sequential power delivery technique [ C ] // 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). October 8-10, 2017, Nuremberg, Germany. IEEE, 2017:415-418
- [ 9 ] Sakaki H, Kuroiwa F, Tsujii M, et al. A novel wide dynamic range rectifier design for wireless power transfer system [ C ] // 2014 Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE, 2014:1208-1210
- [ 10 ] Yoshida S, Fukuda G, Noji T, et al. Wide power range operable 3-stage S-band microwave rectifier with automatic selector based on input power level [ C ] // 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). June 2-7, 2013, Seattle, WA, USA. IEEE, 2014:1-4
- [ 11 ] Trovarello S, Paolini G, Masotti D, et al. A modular system of rectifiers for energy harvesting with wide dynamic input-range [ C ] // 2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). September 8-11, 2021, Bol and Split, Croatia. IEEE, 2021:1-4
- [ 12 ] Zheng S Y, Wang S H, Leung K W, et al. A high-efficiency rectifier with ultra-wide input power range based on cooperative structure [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(11):4524-4533

## A three-stage rectifier with ultra-wide input power range

WANG Qinghua<sup>1</sup> YANG Mei<sup>1</sup> YANG Lixia<sup>1</sup> HUANG Zhixiang<sup>1</sup> CHE Wenquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

**Abstract** A three-stage rectifier containing three diodes is proposed in this paper. These diodes with different threshold voltages are located in three branches to achieve high conversion efficiency for different input power levels. By combining the three branches, the proposed rectifier is enabled to achieve high conversion efficiency over a wide dynamic input power range. A prototype of a 2.4 GHz rectifier is designed, simulated and measured. The efficiency of the three branches remains above 30% in the power range of -10-11 dBm, 11-24 dBm and 24-35 dBm, respectively. The measured results show that the conversion efficiency maintains over 40% within the input power range of -6-25 dBm, with the maximum conversion efficiency reaching up to 71.2%. It indicates that the proposed rectifier can achieve low sensitivity to input power variation and high conversion efficiency over an ultra-wide input power range, which can be used in energy harvesting or dynamic wireless power transmission systems.

**Key words** rectifier; wide input power range; three-stage rectifying; high efficiency; wireless power transmission