DOI:10.11991/yykj.201701002

网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20170503.0645.006.html

一种双频低功率基于微带结构的微波整流电路

谭皙锟,刘长军

四川大学 电子信息学院 四川 成都 610064

摘 要:提出一种工作在 1.8 GHz 和 2.5 GHz 的双频低输入功率微带微波整流电路,它能有效地应用于周围环境中的微 波电磁能量回收。该整流电路主要由一个零势垒肖特基二极管 HSMS-2852 和十字型匹配支节组成。匹配支节实现了 二极管的双频阻抗匹配,同时作为输入带通滤波器能有效抑制二次谐波。仿真结果表明:输入功率为 0 dBm 时,整流电 路工作在 1.8 GHz 和 2.5 GHz 的射频-直流(MW-DC)转换效率分别为 62%和 52%。实测结果显示,在 1.76 GHz 和 2.53 GHz频率上电路有最高 MW-DC 转换效率,分别为 52%和 46%。

关键词:双频;低输入功率;二极管;微波整流;微波能量回收;十字型匹配支节;输入带通滤波器;谐波抑制 中图分类号:TN62 文献标志码:A 文章编号:1009-671X(2018)01-061-04

Design of dual-frequency low-power microwave rectifying circuit based on micro-strip structure

TAN Xikun , LIU Changjun

School of Electronics and Information Engineering Sichuan University Chengdu 610064 China

Abstract: A kind of dual-frequency low-input-power microwave rectifying circuit based on micro-strip structure and operating at 1.8 GHz and 2.5 GHz was proposed in this paper , it may be effectively used for recovering the ambient microwave electromagnetic energy. The rectifying circuit mainly consists of a zero-barrier Schottky diode HSMS–2852 and a cross stub of matching circuit , the cross stub realizes impedance match at dual frequencies. Moreover , it works as an input bandpass filter and can effectively restrain the second harmonics. The simulation results show that , when the input power was 0 dBm , the MW-DC conversion efficiencies of the rectifying circuit operating at 1.8 GHz and 2.5 GHz were respectively 62% and 52%. The actually measured results display that the MW-DC conversion efficiencies of the circuit at 1.76 GHz and 2.53 GHz were the highest , which were respectively 52% and 46%.

Keywords:dual-frequency; low-input-power; diode; microwave rectifying; microwave energy recovery; cross stub of matching circuit; input bandpass filter; harmonic suppression

近年来 随着无线装置的广泛应用 ,周围环境中 的电磁能量也在逐渐提高。环境电磁能量的回收成 为国内外的热门话题^[1-5]。环境电磁能量回收即捕 获周围空间中存在的电磁能量(如调幅、调频广播, 有线电视 移动通信基站,Wi-Fi 等产生的电磁信号 能量)转化为电能,供各种设备使用,如基础设施状 态监控、现场环境信息采集、植入型医疗器械等供 电。这些应用可能涉及无线设备或一些传感器,给 这些数量庞大、分布广泛的设备提供电池供电和维 护往往非常昂贵。从环境中获取能量给设备提供能 量成为了解决手段。研究发现,周围环境中电磁能 量功率密度分布在 1.8 GHz 和 2.5 GHz 等频段有较 大值。本文针对能量回收的需求,提出一种工作在 1.8 GHz 和 2.5 GHz 的低输入功率微带式微波整流 电路,可以有效地工作在低功率射频能量环 境中^[6]。

1 微波整流电路原理

典型的微波整流电路如图 1 所示,通常由输入 滤波器、匹配网络、整流二极管、输出滤波器和直流 负载构成。其中输入滤波器能够反射二极管整流产

收稿日期:2017-01-02. 网络出版日期:2017-05-03. 基金项目:国家自然科学基金项目(61271074). 作者简介:谭皙锟(1991-),女.硕士研究生; 刘长军(1973-),男.教授. 通信作者:刘长军,E-mail:cjliu@scu.edu.cn.

生的谐波分量,提高整流效率;匹配网络能完成电路的阻抗变换,实现信号源到整流电路的阻抗匹配;输 出滤波器则只让直流分量通过,将基频及谐波分量 反射回二极管进行能量回收。



图1 微波整流电路

2 双频整流电路设计

2.1 肖特基二极管

在低功率整流中,微波整流效率往往非常低。 在低功率微波输入时肖特基二极管整流后,输出直 流电压依然低于或者接近肖特基二极管导通电压阀 值。微波整流输出电压主要降在肖特基结上,负载 得到的电压低,导致整流电路微波到直流的转换效 率低。因此,对于低功率输入下整流二极管的选择, 首先需要考虑导通电压。其次,根据文献[7],肖特 基二极管的结电容、寄生串联电阻也对其微波到直 流的转换效率有极大影响,关系如式(1)。

$$\left. \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}^2} \right|_{\eta_M = 1} = \left(\frac{\Re_1 \sqrt{R_j}}{2 + 2\omega^2 C_j^2 R_j R_s} \right)^2 \tag{1}$$

式中: C_j 为结电容 , R_s 为寄生串联电阻 , η_M 为整流 电路与前级接收天线匹配效率 , P_{out} 为二极管整流 输出的直流功率 , P_{in} 为输入二极管的射频功率 , \Re_1 为电流响应率(通常用来反映一个非线性器件的整 流能力) , R_j 为二极管的结电阻 , ω 为二极管的工作 频率。为了获得更高的整流效率 ,选择结电容低和 串联电阻低的二极管。综合考虑导通电压与整流效 率后 ,选取 Avago 公司的 HSMS-2852 肖特基二极 管。它是表面封装零导通电压检波二极管 ,在低输 入时有较好工作灵敏度 ,具体参数为 C_j = 0.18 pF , R_i = 25 Ω_o

2.2 阻抗匹配电路设计

在射频电路中^[$s \rightarrow j$],输入端口的阻抗 $Z_{IN}(l)$ 可以表示为

$$Z_{\rm IN}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)}$$
(2)

可以实现传输线终端到输入端的阻抗匹配。式中: $Z_{IN}(l)$ 为输入端口阻抗, Z_L 为负载阻抗, β 为传播 系数,l为传输线长度。

传统的整流电路匹配都是针对固定的频率进行 优化和设计 在环境电磁能量捕获系统中涉及到宽 频带的问题。单个频点收集到的能量有限 ,因而多 采用双频或宽频微波整流电路。双频微波整流电路 在阻抗匹配上复杂,需要调节匹配网络,使得电路在 两个频点上都能实现阻抗匹配。本文提出的双频微 波整流电路原理图和版图分别如图 2。





由于二极管的阻抗随频率而变,十字匹配支节 (如图 2(a) MLIN-1、MLIN-2、MLIN-3)可以使二极管 在两个频点处的不同阻抗均与 50 Ω 较好匹配。二 极管为非线性器件,在整流过程中将会产生高次谐 波,其中二次谐波拥有较高的能量。十字型匹配支 节同时作为输入带通滤波电路,能很好地抑制二次 谐波,进行二次谐波能量回收。微带线的特征阻抗 与其尺寸有以下关系^[10]:

$$Z_{0} = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{e}}} \ln(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}), & W/d \leq 1\\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{e}} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} & W/d \geq 1 \end{cases}$$
(3)

式中: ε_{e} 为微带线有效介电常数, $W \setminus d$ 分别为微带 线的宽度与厚度。本文的整流电路采用相对介电常 数为 2.65、厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯双面板作为 介质基板 覆铜厚度为 0.018 mm。低阻开路支节具 有较好的带宽特性^[11] 根据式(3).低阻开路支节必 然具有较大的 W/d 值,即以电路尺寸换取较宽的整 流带宽(双频或宽频)。仿真结果显示,并联开路支 节 MLIN-1 宽度较大,与理论推导相符合。扇形支 节^[12]往往具有更好的性能。用扇形支节代替并联 开路支节可以改善输入带通滤波器对二次谐波的回 收效果 提高整流效率。在原有双频整流电路的基 础上做了一些改进 改进后的整流电路如图 3 所示。





改进后双频整流电路输入带通滤波器与原始电路的对比如图 4 所示,原始的输入滤波器在二次谐波 3.6 GHz 和 5 GHz 的抑制分别为 9 dB 和 23 dB; 改进后的输入滤波器在二次谐波 3.6 GHz 和 5 GHz 的抑制分别为 14 dB 和 21 dB。改进后的双频电路 谐波回收效果更好。



图 4 双频整流电路输入带通滤波器

3 整流电路实验结果与分析

整流电路设计采用 Agilent 公司开发的 Advanced Design System 软件。介质板的相对介电常数 为 2.65 厚度为 1 mm 损耗角正切为 0.005。实际加 工制作的整流电路版图如图 5 所示。整流电路参数见表 1 ,扇形支节的角度为 75°, *C*₁、*C*₂ 分别为 48 pF和 98 pF。



图 5	双频整流电路
表1	整流电路尺寸
电路	尺寸
L_1	10.0
W_1	2.27
L_2	4.0
W_2	2.44
L_3	8.26
W_3	0.50
L_4	5.98
W_4	0.80
R_1	8.77
W_i	2.12

图 6 为仿真效率和电压随频率变化图。从图 6 中可以看出,该整流电路在 1.75 GHz 和 2.5 GHz 两 个频点有最高整流效率。当输入功率为 0 dBm 时, 在 1.75 GHz 和 2.5 GHz,该整流电路的最佳直流负 载分别为 3 k Ω 和 4 k Ω ,最高整流效率分别为 62% 和 52%。当输入功率为-10dBm 时,该整流电路在 1.75 GHz 和 2.5 GHz 的整流效率分别为 43% 和 36% 最佳直流负载均为 4 k Ω 。图 7 为仿真效率和 电压随输入功率变化图。





图 7 仿真效率和电压随输入功率变化

综合考虑选择阻值为 4 kΩ 的负载作为该双频 整流电路的直流负载。从双频整流电路效率随输入 功率变化可以看出,输入功率为-10~2 dBm 时,电 路在两个频点均有不低于 40% 的微波到直流转换 效率。实际测量时,用安捷伦 N5230A 矢网作为信 号源,负载两端的电压用数字万用表测量。整流电 路的 RF-DC 转换效率计算公式为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_D^2}{R_L P_{\text{in}}} \times 100\%$$
(4)

式中: R_L 为负载值, V_D 为负载两端电压, P_{in} 为输入 到电路的功率值, P_{out} 为二极管整流输出的直流功 率值。实测整流电路效率随频率变化的曲线如图 8 所示。当输入功率为 0 dBm 时,在 1.76 GHz 和 2.53 GHz, 该整流电路获得最佳整流效率,分别为 52%和 46%。图 9 为整流电路在 1.76 GHz 和 2.53 GHz时测得的整流效率随输入功率的变化曲 线,当输出直流负载不变,随着输入功率的不同,最 佳整流效率发生的频点变化不大,整流效率有所改 变。这是由于二极管的非线性,随着输入功率的变 化其阻抗会发生变化,匹配电路的性能变差导致整 流效率降低。





图 9 效率和电压随输入功率变化曲线

实测结果与仿真结果相比,频率有少许偏移。 实测效率比仿真效率有所降低,主要因为:1)整流 电路原理图仿真与实际加工电路板之间的误差。 2)焊接二极管位置不够准确,导致电路阻抗匹配变 差;3)电容 C₁ 两端的微带线宽度相差较大,引入一 定的反射损耗;4)实测系统中还有 SMA 接头功率损 耗;5) HSMS-2852 在低功率环境下的非线性模型存 在误差。

4 结论

本文提出了一种工作在 1.8 GHz 和 2.5 GHz 的 低输入功率微带整流电路。通过引入十字支节实现 双频阻抗匹配,利用扇形开路支节更好地抑制反射 谐波,提高了整流电路工作带宽,获得了更高的整流 效率。当输入功率为0 dBm 时,整流电路工作在 1. 75 GHz 和 2.5 GHz 时的 RF-DC 转换效率分别为 62%和 52%。实测结果显示,最大 RF-DC 转换效率 发生在 1.76 GHz 和 2.53 GHz,分别为 52%和 46%。 文章对转换效率随着频率、输入功率的变化进行了 实测与分析,并且对实测与仿真结果的偏差进行了 具体分析。该整流电路可以有效地工作在低输入射 频能量环境中,可作为环境中电磁能量回收装置,为 无线传感器网络节点供电。

参考文献:

- [1]THEEUWES J A C , VISSER H J , VAN BEURDEN M C , et al. Efficient , compact , wireless battery design [C]//Proceedings of 2007 European Microwave Conference. Munich , Germany: IEEE , 2007: 991–994.
- [2]陈彦龙. 太阳能卫星电站中的微波无线输能技术及相关 整流电路研究[D]. 成都:四川大学, 2012.

(下转第72页)

the 12th USENIX conference on Operating Systems Design and Implementation.Savannah , GA , USA 2016.

- [47]SUI Xudong , ZHANG Jinfang , HU Xiaohui , et al. Monitoring target through satellite images by using deep convolutional networks [M]//LEE R. Software Engineering Research , Management and Applications. Cham: Springer , 2016.
- [48] JIAYangqing, SHELHAMER E, DONAHUE J, et al. Caffe: convolutional architecture for fast feature embedding [J]. Arxiv: 1408.5093, 2014.
- [49] BOJARSKI M, DEL TESTA D, DWORAKOWSKI D, et al. End to end learning for self-driving cars [J]. arXiv: 1604.07316 2016.
- [50] CS231nconvolutionalneuralnetworksforvisualrecognition [EB/ OL].http://cs231n.github.io/neural-networks-2/.
- [51]ZHAO Shichao , LIU Yanbin , HAN Yahong , et al. Pooling the convolutional layers in deep ConvNets for video action recognition [J]. arXiv:1511.02126 , 2015.
- [52] 薛昆南. 基于卷积神经网络的视觉识别研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [53]LAJEVARDI S M, HUSSAIN Z M. Higher order orthogonal moments for invariant facial expression recognition [J]. Digital signal processing, 2010, 20(6): 1771–1779.

- [54] YU Zhiding , ZHANG Cha. Image based static facial expression recognition with multiple deep network learning [C]//Proceedings of 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction. Seattle , Washington , USA , 2015: 435-442.
- [55]LOPES A T , DE AGUIAR E , OLIVEIRA-SANTOS T. A facial expression recognition system using convolutional networks [C]//Proceedings of the 28th SIBGRAPI Conference on Graphics , Patterns and Images. Salvador , Brazil , 2015: 273–280.
- [56] WANG Jieru, YUAN Chun. Facial expression recognition with multi-scale convolution neural network [M]//CHEN Enqing, GONG Yihong, TIE Yun. Advances in Multimedia Information Processing-PCM 2016. Cham: Springer, 2016.
- [57]ZHAO Xiaoming , SHI Xugan , ZHANG Shiqing. Facial expression recognition via deep learning [J]. IETE technical review , 2015 , 32(5): 347–355.
- [58]LI Chen, WEI Wei, WANG Jingzhong, et al. Face recognition based on deep belief network combined with centersymmetric local binary pattern [M]//PARK J J, JIN Hai, JEONG Y S, et al. Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. Singapore: Springer, 2016.

本文引用格式:

王信 汪友生. 基于深度学习与传统机器学习的人脸表情识别综述 [J]. 应用科技, 2018, 45(1): 65-72.

WANG Xin , WANG Yousheng. Facial expression recognition based on deep learning and traditional machine learning [J]. Applied science and technology , 2018 , 45(1): 65-72.

(上接第64页)

- [3] VISSER H J , VULLERS R J M. RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements [J]. Proceedings of the IEEE , 2013 , 101 (6): 1410-1423.
- [4] HEMOUR S , ZHAO Yangping , LORENZ C H P , et al. Towards low-power high-efficiency RF and microwave energy harvesting [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques , 2014 , 62(4): 965–976.
- [5]张全琪,邓华超,谭洪舟.一种高效2.45GHz 低输入功 率微带整流电路[J].电子技术应用,2015,41(5):60-62,66.
- [6]李凯. 中低功率微波无线输能及其整流电路研究[D]. 成都: 四川大学, 2012.
- [7] HEMOUR S, WU Ke. Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting: development path and future

outlook [J]. Proceedings of the IEEE , 2014 , 102 (11): 1667-1691.

- [8] JIANG Wan, LIU Changjun, YU Chengyang. A novel dual– frequency microwave rectifier at 2.45 and 5.8 GHz with har– monic recycling [J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2013, 27(6): 707–715.
- [9]张鹤馨, 刘长军. 一种基于子阵分解的高效整流天线阵 列[J]. 应用科技, 2016, 43(4): 57-61.
- [10] DAVID M P. Microwave engineering [M]. 3rd ed. New York, USA: Wiley, 2005.
- [11] Microwaves IOI. Quarter-wave Tricks, Radial stubs [DB/ OL]. P-N Designs, Inc. and IEEE, 2001. https://www. microwaves101.com/encyclopedias/quarter-wave-tricks.
- [12]沈龙,杨雪霞,聂美娟,等.一种新型的双频整流电路 [J]. 微波学报,2014,30(5):63-66,71.

本文引用格式:

·谭皙锟,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.

TAN Xikun , LIU Changjun. Design of dual-frequency low-power microwave rectifying circuit based on micro-strip structure [J]. Applied science and technology , 2018 , 45(1): 61-64 , 72.