

一种基于交指结构的毫米波整流电路设计

林航, 何忠奇, 刘长军

四川大学电子信息学院, 成都, 610065

*310814366@qq.com

*cjliu@ieee.org

摘要 利用交指结构的电容特性以及微带传输线理论,设计了一款紧凑型的毫米波整流电路。仿真结果表明,该整流电路在频率为 24GHz,输入功率为 15.5dBm,负载为 590Ω 时,具有 53.2%的最高整流效率。最终电路尺寸为 21mm×10mm,易于与天线集成,可广泛应用于毫米波无线能量传输技术中。

关键词 交指结构, 紧凑型, 整流电路, 毫米波无线能量传输技术

A Millimeter Wave Rectifier Based on Interdigital Structure

Hang Lin, Zhongqi He, Changjun Liu

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, China, 610065

*310814366@qq.com

*cjliu@ieee.org

Abstract: Utilizing the capacitance property of interdigital structure and the theory of microstrip transmission line, a compact millimeter wave rectifier is designed. The simulation results show that when the operating frequency of the rectifier is 24 GHz, the input power is 15.5 dBm and the dc load is 590 Ω, the highest rectifying efficiency is 53.2%. The final circuit size is 21mm×10mm, which is easy to be integrated with antennas and can be widely used in millimeter wave wireless power transmission system.

Keywords: interdigital structure, compact, rectifier, millimeter wave wireless power transmission system

1 引言

在一些复杂、危险的环境下,有线能量传输成本高,不易实现,比如空中飞艇,或空间太阳能电站(SSPS)等情况^{[1]-[2]}。此时无线定向输能技术的优势就凸显了出来。随着新材料和新技术的不断出现,毫米波无线能量传输技术作为未来无线输能的发展趋势之一,也得到了巨大的发展^{[3]-[4]}。由于毫米波的大气衰减较大,毫米波无线能量传输系统主要适合于近距离输能或者太空远距离输能。

整流电路作为无线输能系统的重要组成部分,在电路小型化的同时保持高效率是它的研究热点之一^[5]。而交指结构是由平行耦合线谐振单元交叉组成的结构,多用于慢波系统,近年来的研究表明,它具有良好的带通特性,同时还具有结构紧凑,可靠性高,易于制造等优点^[6]。基于上述特点,为实现整流电路小型化设计,本文设计了一款基于交指结构的紧凑型毫米波整流电路。通过软件 Advanced Design System (ADS)仿真可以得到,该电路在工作频率为 24GHz,输入功率为 15.5dBm,负载为 590Ω 时,达到最佳效率 53.2%。采用交指结构减小了整流

基金项目: 国家自然科学基金(NO.61931009)

电路尺寸，使其可应用于小型化毫米波无线能量传输系统中。

2 基于交指结构的带通滤波器设计

根据交指结构的设计原理，通过在整流电路 50Ω 输入端开缝，可以直接形成一个带通滤波器，从而不需要为后续的整流电路进行额外的输入端枝节匹配设计，可以减小电路的体积。图 1 是交指结构的物理结构图，各参数如

表 1 所示。本文利用 ADS 研究交指结构的频率特性，得到该结构在 15~75 GHz 下的 $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$ 随频率的变化曲线，如

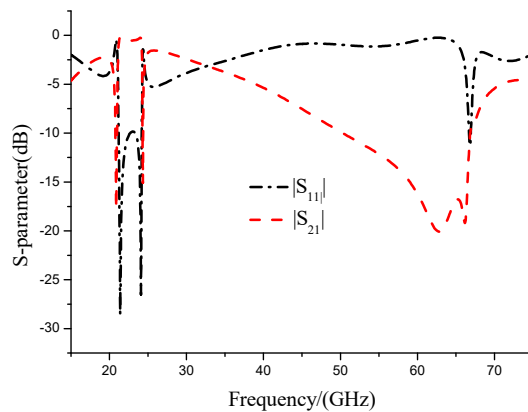


图 2 所示。从图中可以看出，基于交指结构的带通滤波器通带为 22~24GHz，并在 48GHz 和 72GHz 时，具有良好的抑制作用。

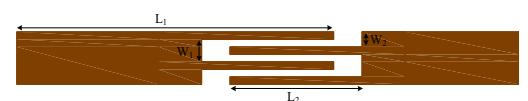


图 1 基于交指结构的滤波器版图

表 1 带通滤波器尺寸参数

(单位: mm)

变量	L_1	L_2	W_1	W_2
值	2.7	1.1	0.6	0.5

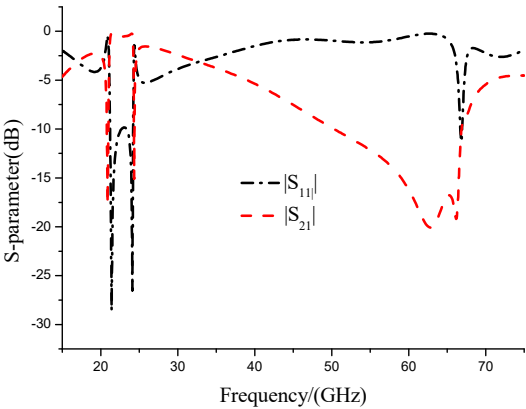


图 2 基于交指结构的带通滤波器 $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$ 随频率的变化

3 整流电路设计

因为肖特基二极管具有截止频率高，结电阻低，结电容小等特点，本文在设计毫米波整流电路时采用 MA4E1317 作为核心整流器件进行电路设计，二极管具体参数为 $V_{br}=10V$ ， $C_{jo}=0.02\text{ pF}$ ， $R_s=20\Omega$ 。图 3 是整流电路结构图。

根据公式^[7]

$$Z_{in1} = jZ_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \begin{cases} 0, & \omega = 0 \\ jZ_1, & \omega = \omega_0 \\ \infty, & \omega = 2\omega_0 \end{cases}$$

在电路中使用一段 $\lambda/8$ 终端短路的微带线，它的输入阻抗会呈现为感性。通过仿真可以得到在特定频率，输入功率和直流负载下二极管的阻抗，然后将 $\lambda/8$ 终端短路传输线与二极管进行串联，从而抵消二极管的容性虚部，达到易于匹配的目的。第 2 节中设计的带通滤波器将被作为整流电路的输入滤波器运用到电路中反射二极管工作时产生的高次谐波，提高整流效率。电路采用的介质基板为

Rogers5880 双面覆铜板，厚度 $h=0.254\text{mm}$ ，介电常数 $\varepsilon_r=2.2$ ，损耗角正切值为 0.0015，表面覆铜厚度为 0.018mm。

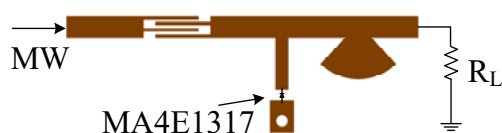


图 3 整流电路版图

通过在 ADS 中进行建模仿真和优化，得到电路的整流效率随输入功率的变化曲线以及输出电压在高次谐波下的监测曲线，如

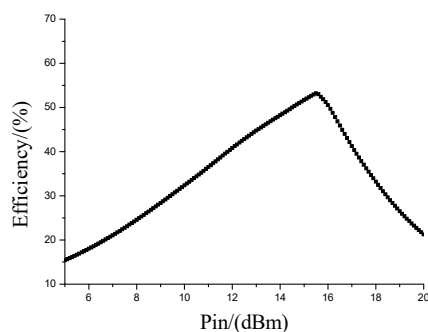


图 4 和图 5 所示。从图中可以看出，当负载为 $590\ \Omega$ 时，输入功率在 11.8~17.1 dBm 处，整流效率都高于 40 %。当输入功率为 15.5 dBm 时，最佳整流效率可以达到 53.2 %，此时谐波抑制良好。

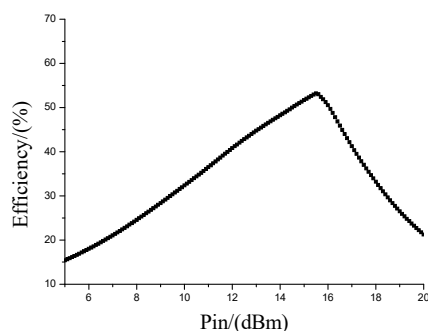


图 4 当负载为 $154\ \Omega$ 时，整流效率随输入功率的变化曲线

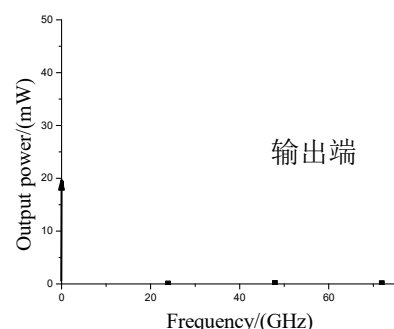
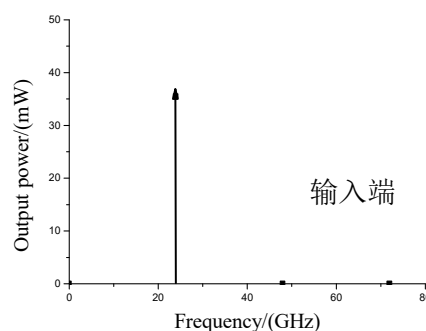


图 5 电路输入、输出端高次谐波监测

4 结论

本文仿真设计了一个基于交指结构的带通滤波器并应用到毫米波整流电路中，实现电路结构紧凑（ $21\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 0.254\text{ mm}$ ），易于与天线整合的特点。仿真中电路在输入功率为 15.5 dBm，负载为 $590\ \Omega$ 的条件下达到了最高为 53.2%的整流效率。

参考文献

- [1] A. Takacs, A. Okba, H. Aubert, D. Granena, M. Romier and A. Bellion, "Compact C-band Rectenna for Satellite Applications," *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Montreal, QC, Canada, 2018, pp. 1-4.
- [2] Y. Fuse et al., "Microwave energy transmission program for SSPS," *2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 1-4.
- [3] D. Zhao, P. He and X. Wang, "Millimeter-Wave Rectenna and Rectifying Circuits for

- Far-Distance Wireless Power Transfer," *2019 12th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM)*, Sendai, Japan, 2019, pp. 90-92.
- [4] A. Riaz, M. Awais, M. M. Farooq and W. T. Khan, "A Single Cell Dual Band Rectifier at Millimeter-Wave Frequencies for Future 5G Communications," in *2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 2019, pp. 41-44.
- [5] H. Lin, Z. He, W. Che and C. Liu, etc., "A Wide Input Power Range X-Band Rectifier with Dynamic Capacitive Self-Compensation," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters.*, accepted.
- [6] 夏运强, 王玲. 交指带通滤波器的精确设计[J]. 电子科技, 2004(05):23-25.
- [7] 刘长军, 黄卡玛, 朱铎丞. 射频通信电路设计 (第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2017.