

一种无输入滤波器的宽带高效微波整流电路

武鹏德, 张磊, 赵应盛, 刘长军, 刘臻龙

(四川大学电子信息学院, 成都, 610065)

cjliu@ieee.org

摘要 本文提出运用 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线实现二次谐波抑制的微波整流电路。该 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线抵消了整流二极管在基频时的容性阻抗并且有效地抑制了谐波电流。并且二次谐波负载使得该整流电路移除了输入低通滤波器和匹配电路, 结果输入频率范围得到拓展, 结构和尺寸更加紧凑。理论分析和实验测试表明本设计在较大输入功率范围, 频率范围内实现了高效整流。在输入功率 10 dBm~24 dBm 和频率 1.5 GHz~2.1 GHz 范围内整流效率超过 70%。当输入功率为 24dBm 时, 最大整流效率为 83%。

关键词 微波整流电路, 谐波负载, 高效率, 源牵引

A High-Efficiency Wideband Rectifier Based on Harmonic Termination and Input Filter Removed

Pengde Wu, Lei Zhang, Yingsheng Zhao, and Changjun Liu, Zhenlong Liu

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

Abstract: This paper presents a microwave rectifier employing a second harmonic termination by a short-ended eighth-wavelength microstrip transmission line. The proposed harmonic termination balances the capacitive impedance at fundamental frequency. As a result, both the input low-pass filter and matching circuit are removed. The results show that it can realize high efficiency with wide input power and frequency range. The measured efficiency remains above 70% with the input power from 10 dBm to 24 dBm and the frequency extends from 1.5 GHz to 2.1 GHz. A maximum rectification efficiency of 84.3% at 24 dBm input power is observed.

Keywords: microwave rectifier, harmonic termination, high efficiency, source pull

1 引言

传统的微波整流电路中, 低通滤波器通常用来抑制非线性器件产生的高次谐波。谐波被限制在输入低通滤波器和输出滤波器之间, 以此提高二极管或者三极管整流效率^[1-2]。一些宽带或者多频带微波整流器输入端应用复杂的宽带匹配电路。定向耦合器和简化实频技术也被用于整流电路的宽带匹配电路中^[3-4]。

在高效率功放设计中, 谐波负载通常用来对输出电压和电流整形, 减小开关器件上的电压、电流重叠从而提高效率。在整流电路中也可以利用谐波负载降低二极管损耗, 例如文献^[5]

在直流负载前应用 F 类负载代替低通滤波器, 文献^[6]应用扇形枝节对三次和四次谐波回收。

随微波 MMIC 的发展, 微波电路尺寸需要适应更小的体积和尺寸, 同时为了提高整流电路的输入有效带宽, 本文提出一种无输入低通滤波器的二极管整流电路。 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线对二次谐波开路并且抵消了二极管容性阻抗, 结果整流电路发生谐振, 谐波电平被抑制。在输入端不需要额外的低通滤波器和谐波负载, 减小了电路尺寸。同时, 直流输出滤波采用集总元件 LC 代替传统的 $\lambda/4$ 传输线, 结果有效拓展了带宽, 同时也使电路更加紧凑。

2 理论分析和仿真

传统二极管整流电路需要输入和输出的两个低通滤波器，其目的是抑制二极管产生的高次谐波。输入滤波器抑制高次谐波返回天线的同时作为匹配电路，这也导致整流电路尺寸变大，带宽变窄。通过仿真可以发现二次谐波分量是整流效率降低的主要原因，因此抑制二次谐波是必要的。

正因为输入、输出低通滤波器的对带宽的限制，本文提出一种不需要输入滤波器的微波整流电路。如图 1 所示， $\lambda_g/8$ 终端短路微带线被插入二极管的阴极和地之间。

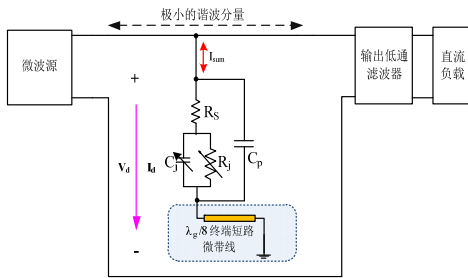


图 1 无输入低通滤波器的整流电路框图

$$Z_{\lambda_g/8} = jXL = jZ_{SE} \tan\left(\frac{\pi \omega}{4 \omega_0}\right) = \begin{cases} 0, & \omega = 0 \\ jZ_{SE}, & \omega = \omega_0 \\ \infty, & \omega = 2\omega_0 \\ -jZ_{SE}, & \omega = 3\omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

如公式 (1) 所示， $\lambda_g/8$ 终端短路微带线作为最简单的二次谐波抑制结构，在基频下呈现纯电抗 jZ_{SE} ，二倍频下呈现开路 ∞ ，同时， $\lambda_g/8$ 终端短路传输线提供了输出的直流通路。

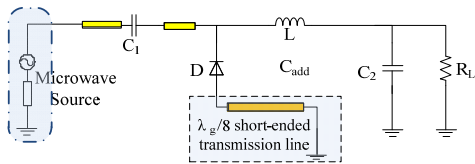


图 2 所提出无滤波器的整流电路原理图

如图 2 所示，本文使用肖特基二极管 HSMS-2820 作整流元件，L 和 C_2 形成输出直流滤波器。二极管输入阻抗主要由 R_j 和 C_j 决定。由于二极管的非线性，输入功率、输出直流电压、反向偏置电压、二极管导通角等均改

变 R_j 和 C_j 的大小。图 3 利用 ADS 大信号仿真器和谐波仿真器获取 HSMS-2820 的输入阻抗，在直流负载为 400Ω 和输入功率 20 dBm 的情况下，等效的 R_j 和 C_j 为 250Ω 和 0.38 pF 。

为补偿二极管的容性阻抗，通过仿真可以得到图 2 中 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线在基频下的等效为 11 nH 电感，因此可以计算得到在 1.8 GHz 下 $\lambda_g/8$ 短路传输线特征阻抗为 124Ω 。对于介质基板 RO-4350B(相对介电常数，厚度 $H = 0.762 \text{ mm}$)，可以计算得到微带线宽 0.3 mm ，长 13.6 mm 。

利用 Agilent ADS 的 S 参数仿真得到所提出整流电路的等效电路的输入阻抗和反射系数，结果如图 3 所示。从图中可以看到， $|S_{11}| < 10 \text{ dB}$ 的带宽约为 900 MHz ，并且整流电路对二次谐波下呈现很高阻抗。由于二次谐波的高阻抗特性，二极管产生的二次谐波将无法返回到天线或者输入信号源。

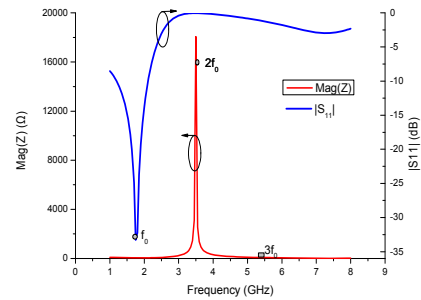


图 3 等效电路的输入反射系数和输入阻抗值

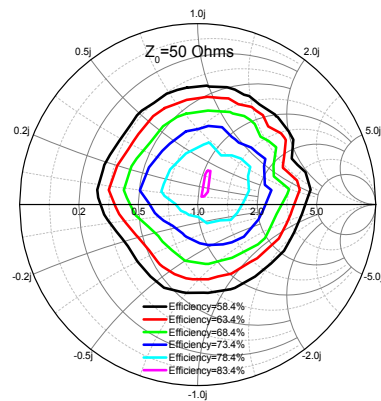


图 4 整流电路的源牵引等效效率圆图

源牵引技术同样可以用在二极管整流电路效率分析中，通过源牵引可

以方便地得到整流电路最高效率时输入阻抗。如图 4 所示, 利用源牵引技术获取了整流电路的等效率圆。在输入功率为 20dBm, 直流负载 400 Ω 时最高效率为 83.4%。可以看出, 在最大效率处, 输入阻抗接近于系统特征阻抗 50 Ω 。源牵引仿真结果证明本文提出的整流电路不需要输入低通滤波器和额外的匹配电路。

3 电路设计与测试

图 5 为根据图 2 设计加工完成的整流电路。最后的实际电路尺寸为 15mm $\times$ 20mm。为了测试电路输入谐波分量, 定向耦合器被用于微波源和二极管电路之间, 并用频谱分析仪测量返回整流电路输入端的二次和三次谐波分量。整流电路效率计算公式如 (1) 所示。

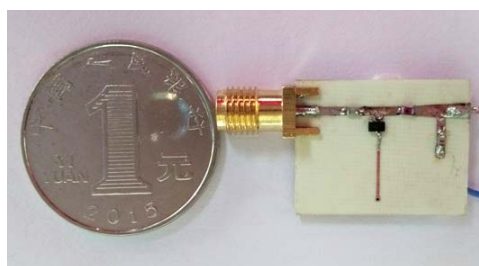


图 5 整流电路的照片, 尺寸为 15mm $\times$ 20mm

通过控制输入功率、测量输出端直流电压和负载电阻可以得到整流效率。

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{DC}}{P_{IN}} \times 100\% = \frac{V_0^2}{R_L} \times \frac{1}{P_{IN}} \times 100\% \quad (2)$$

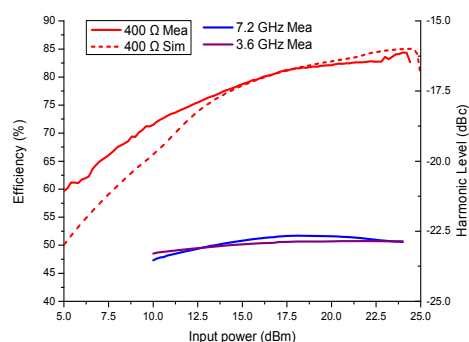


图 6 整流效率和输出电压-仿真和测试结果

首先, 我们对整流电路进行频率

扫描, 此时设置输入功率 17 dBm, 直流负载 450 Ω 。测试和仿真结果如图 6 所示, 实测整流电路效率大于 70% 频率范围为 1.5 GHz 到 2.1 GHz, 与仿真结果吻合较好。

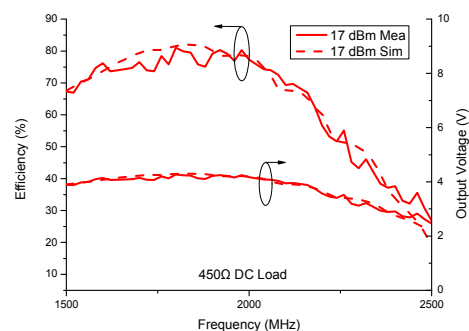


图 7 整流效率、输入谐波随输入功率变化

其次, 测试了在不同输入功率下的整流效率, 测试时设置频率为 1.8 GHz, 为防止二极管因输入功率过大而击穿, 设置较小的直流负载 400 Ω 。输入功率扫描范围为 5dBm 到 25dBm, 仿真和测试整流效率对比如图 6 所示, 可见实际测试结果与仿真结果吻合。图 7 也展示了返回到电路输入端口的二次和三次谐波电平, 可见本文所提出的谐波负载可以有效减少返回到电路输入端的谐波功率。

图 7 也表明本文提出整流电路可在较宽输入功率范围内实现高效率整流。在输入功率为 10dBm 时整流效率超过 70%, 输入功率为 16dBm 时整流效率超过 80%。超过 80% 的输入功率范围为 16dBm 到 25dBm。输入功率为 24dBm 时, 最大整流效率为 83%。

4 结论

本文提出了一种无输入低通滤波器和匹配电路的微波整流电路。应用了 $\lambda g/8$ 终端短路微带线实现谐波抑制和二极管阻抗匹配。无输入低通滤波器和匹配电路使本设计电路尺寸优于传统二极管整流电路, 同时拓展了整流电路的频带宽度, 提高了功率动态输入范围。

参考文献

- [1] Yoo T W, Chang K. Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992, 40(6):1259-1266.
- [2] Mcspadden J O, Fan L, Chang K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1999, 46(12):2053-2060.
- [3] Zhang X Y, Du Z X, Xue Q. High-Efficiency Broadband Rectifier With Wide Ranges of Input Power and Output Load Based on Branch-Line Coupler[J]. 2016, PP(99):1-9.
- [4] 杜志侠. 基于分支线耦合器的高效率宽带微波整流电路[A]. 中国电子学会.2015 年全国微波毫米波会议论文集[C].中国电子学会.,2015:4.
- [5] Liu C, Tan F, Zhang H, et al. A Novel Single-Diode Microwave Rectifier With a Series Band-Stop Structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, PP(99):1-7.
- [6] S. Korhummel, D. G. Kuester, and Z. Popovic, "A harmonically-terminated two-gram low-power rectenna on a flexible substrate," 2013, pp. 119–122.