

# 一种基于阻抗匹配的 2.5 GHz 和 5.8 GHz 双频整流电路设计

谭菲菲 郁成阳 张彪 刘长军

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

tffcool2007@126.com cjliu@scu.edu.cn

**摘要:** 本文介绍了一种工作于 2.5 GHz 和 5.8 GHz 的双频整流电路, 分析了阻抗匹配和谐波回收对整流效率的影响。发现在整流电路中加入谐波回收电路可以提高效率, 但是新增谐波回收电路不仅会影响阻抗匹配而且增加了电路尺寸。基于效率与尺寸的平衡考虑, 本文将设计重点放在阻抗匹配上, 添加独立匹配单元, 减小双频下阻抗匹配设计难度, 得到更加简洁紧凑的双频微波整流电路。从仿真结果可知, 双频整流电路工作稳定, 并且可以自动在两个工作频率之间切换。仿真的整流效率在 2.5 GHz 和 5.8 GHz 分别达到 66% 和 60.9%。

**关键词:** 微波输能, 双频, 整流电路, 阻抗匹配

## Design of a Dual-Frequency Rectifier at 2.5 GHz and 5.8 GHz Based on Impedance Matching

Tan Feifei, Yu Chengyang, Zhang Biao, Liu Changjun

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

**Abstract:** In this paper, a miniaturized dual-frequency rectifier is proposed, which operates at 2.5 GHz and 5.8 GHz, and the rectifying efficiency dependent on impedance matching and harmonic recycling is discussed. It turns out a limited increment of rectifying efficiency is achieved by adding a circuit for harmonic recycling in a rectifier. The newly introduced circuit for harmonic recycling affects the impedance matching and increases the dimension of the rectifier. Considering the trade-off between efficiency and dimension, we focused on impedance matching during the design in order to obtain a facilitated and compact dual-frequency rectifier. The simulation shows that the efficiencies are 66% and 60.9% at 2.5 GHz and 5.8 GHz, respectively.

**Key words:** microwave power transmission, dual-frequency, rectifier, impedance matching

## 1 引言

人类社会的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的使用。随着世界经济的飞速发展, 能源危机日益严重, 各个国家都在积极地寻找和开发新能源。早在 1986 年, Peter Glaser 博士提出了太阳能空间站 SPS (Solar Power Satellite) 的构想<sup>[1]</sup>, 以求应对能源危机。该构想提出, 在地球同步轨道放置一块巨大无比的太阳能电池, 源源不断地将太

阳能转化成电能, 再将之转化成可传输到地球的能量。由于微波的定向性易于控制, 传输损耗低, 在 S 和 C 波段的传输效率一般可达到 90% 以上<sup>[2]</sup>, 微波输能技术成为该构想中一个可行的输能方案。整流电路可以将微波转化为可直接使用的直流电, 是影响整个传输效率的关键部分。目前, 整流电路的工作频率大多选择在低损耗、低成本的 S 或 C 波段<sup>[3],[4],[5]</sup>, 而如果设计一个整流电路可以同时工作在 S 和 C 波段, 其应用面将会增加。

## 2 整流电路原理

整流电路的基本电路如图 1 所示。其中匹配网络提供一个无源无耗二端口网络，完成网络两端阻抗的变换，从而实现信号源到负载的最大功率传输。输入/输出滤波器用于回收二极管产生的高次谐波，以期提高整流效率。

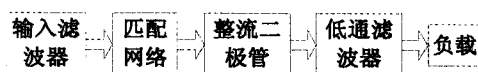


图 1 整流电路系统图

## 3 双频整流电路设计

本文提出的 2.5 GHz 和 5.8 GHz 双频整流电路的原理框图和电路的版图分别如图 2 所示。

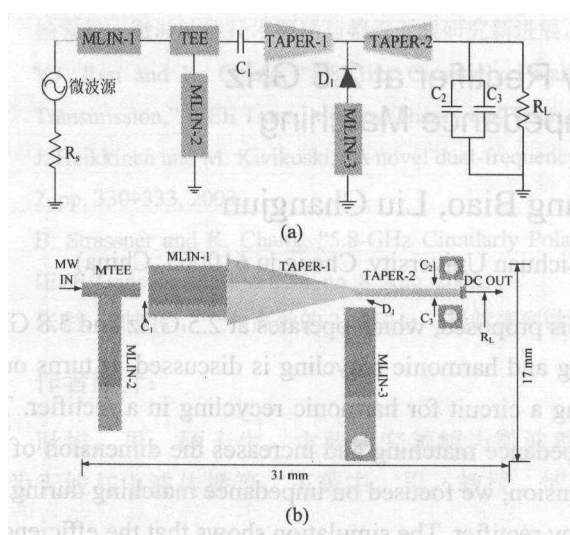


图 2 双频整流电路原理图(a)和版图(b)

### 3.1 阻抗匹配

在微波下，微带线的输入阻抗如公式 (1) 所示。其中， $Z_{IN}$  是输入阻抗， $Z_0$  是微带线的特征阻抗， $Z_L$  是负载阻抗， $\beta$  是传播常数， $l$  是微带线长度。

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

一般情况下，同一个微波电路，其输入阻抗会随频率发生变化。双频整流电路则要求同一个电路对两个工作频率均达到阻抗匹配。在本文所提出的电路中，并联了一段 5.8 GHz 的四分之一波长终端

短路微带线，即图 2 中的 MLIN-2。根据公式，该线对于 5.8 GHz 的信号始终呈现开路，因此可以作为调节 2.5 GHz 阻抗匹配的独立元件。

根据二极管的大信号模型<sup>[6]</sup>，二极管的输入阻抗可表示为：

$$Z_D = \frac{\pi R_s}{\cos \theta_{on} \left( \frac{\theta_{on}}{\cos \theta_{on}} - \sin \theta_{on} \right) + j\omega R_s C_j \left( \frac{\pi - \theta_{on}}{\cos \theta_{on}} + \sin \theta_{on} \right)} \quad (2)$$

$$\tan \theta_{on} - \theta_{on} = \frac{\pi R_s}{R_L \left( 1 + \frac{V_{bi}}{V_0} \right)} \quad (3)$$

其中  $\theta_{on}$ 、 $R_s$  及  $C_j$  分别是导通角，串联电阻和结电容。结电容  $C_j = C_{j0} \sqrt{\frac{V_{bi}}{V_0 + V_{bi}}}$ ，其中  $C_{j0}$ 、 $V_{bi}$  及  $V_0$  分

别是零偏置结电容，导通电压和偏置电压。通过该模型可知，二极管的输入阻抗有一个容抗，如果能在其后串联一根输入阻抗是感性的微带线，则可抵消其容性，而有利于阻抗匹配。根据 Smith 圆图，一段终端短路的传输线可以在线长最短的情况下得到感性的输入阻抗，即图 2 中的 MLIN-3。

$C_2$  和  $C_3$  构成输出低通滤波电路，相对于传输线对称分布，形成了一个类似于缺陷地 (DGS) 的结构，可以增其通交隔直的特性<sup>[7]</sup>。

### 3.2 谐波回收

二极管是非线性器件，在微波整流中会产生高次谐波分量，以及和、差频。单频整流电路一般在电路的前后两端添加低通滤波电路以回收谐波。图 2 表示在阻抗匹配的整流电路前端添加低通滤波电路。通过对添加低通滤波电路前后整流效率的对比，可以分析谐波回收对整流效率的贡献。效率的计算公式为：

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{MW}} \times 100\% = \frac{(V_{DC})^2}{R_L} \times \frac{1}{P_{MW}} \times 100\% \quad (4)$$

其中  $P_{MW}$  是微波输入功率， $P_{DC}$  是直流输出功率， $V_{DC}$  是负载电压， $R_L$  是负载阻抗。

表 1 给出了整流效率的对比情况。可知，在 2.5 GHz 及 5.8 GHz 时，整流效率仅仅提高 2% 及 4.7%。由此可见，在整流电路已经匹配的情况下，回收谐波所提高效率是有限的。

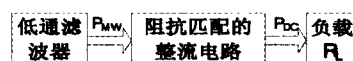


图 3 添加谐波回收电路的整流电路系统框图

表 1 整流效率比较

频率	$\eta_1$	$\eta_2$
2.5 GHz	66%	68%
5.8 GHz	60.9%	65.6%
注: $\eta_1$ 指整流电路效率, $\eta_2$ 指添加滤波器的整流电路		

对于本文所提出的双频整流电路, 仅在前端添加一个滤波电路并不能回收全部的谐波, 必须增加其他的谐波回收电路, 整个电路势必会变得更加复杂, 也会增加阻抗匹配难度和电路尺寸。综合考虑, 本文去掉了谐波回收电路, 在不明显降低效率的情况下得到更加简洁、紧凑的双频整流电路。

4 仿真结果及分析

本文使用 Agilent 公司开发的 Advanced Design System (ADS)软件对双频整流电路进行设计仿真。根据公式, 可以得到输入功率为 50 mW, 输入信号频率分别为 2.5 GHz 和 5.8 GHz 时整流效率随负载的变化, 如图 3 所示。输入信号分别是 2.5 GHz 和 5.8 GHz 下的最高效率分别是 66%和 60.9%。此时, 归一化输入阻抗分别是  $1.06-j0.16$  和  $0.914+j0.132$ , 回波损耗分别是 21.64dB 和 21.68dB。

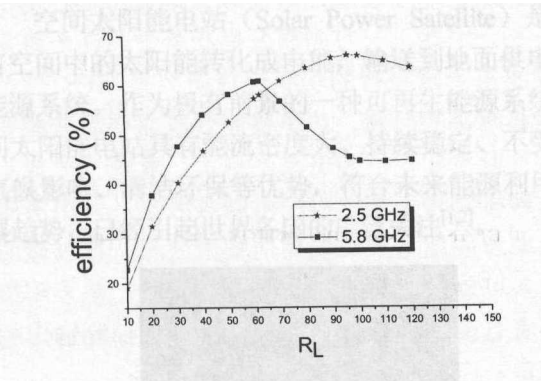


图 2 双频整流电路效率随负载变化

表 2、表 3 给出了在 2.5 GHz 和 5.8 GHz 时, 负载值、负载电压与输入功率的变化关系。通过表 2 可以看出, 随着输入功率增加, 负载电压逐渐增加。分析原因, 是因为微波源的功率提高, 二极管的损耗所占比例下降, 到达负载出的能量必然增加。表 3 给出的是在不同输入功率下能够得到的最

佳效率。可知, 随着功率增加, 最佳负载值下降, 电压也下降。这样的变化趋势符合给出的效率计算公式。

将表 2、表 3 的结果与已有的单频整流电路进行对比, 其变化趋势是一致的。说明该双频电路并没有因为将两个工作频率集成在一个电路上而相互影响, 完全可以使用于双频电路系统中, 在两个工作频率之间自动切换。

表 2 负载不变, 电压随功率的变化

功率 (mW)	负载 ( $\Omega$ )		负载电压 (V)	
	2.5GHz	5.8GHz	2.5GHz	5.8GHz
--	96	62	1.779	1.374
50	96	62	1.915	1.415
80	96	62	1.991	1.462
100	96	62		

表 3 负载和电压随输入功率的变化

功率 (mW)	最佳负载 ( $\Omega$ )		负载电压 (V)	
	2.5GHz	5.8GHz	2.5GHz	5.8GHz
--	96	62	1.779	1.374
50	96	62	1.779	1.374
80	57	38	1.538	1.298
100	36	31	1.294	1.264

5 结论

本文介绍了一种工作于 2.5 GHz 和 5.8 GHz 的双频整流电路。为降低双频整流电路阻抗匹配的难度, 特别并联了一段 5.8 GHz 四分之一波长的终端短路传输线, 作为调节 2.5 GHz 下阻抗匹配的独立元件。根据 ADS 仿真结果显示, 匹配效果良好。为了减小整流电路尺寸, 省略了复杂的谐波回收电路。仿真结果表明, 谐波回收电路对整流效率的影响有限, 本文提出的设计方法切实可行。

本文得到了长、宽分别为 31 mm 和 17 mm 的小型化双频整流电路。通过对输入功率、负载、负载电压之间关系的定性分析, 模拟了双频整流电路的工作情况, 而与单频整流电路工作特性的一致性证明了双频整流电路的可实现性。

本文设计的双频整流电路, 在输入功率为 50 mW 时, 在 2.5 GHz 和 5.8 GHz 下分别获得 66%和 60.9%的整流效率。

## 参考文献

- [1] Glaser PE, Power from the sun: its future, Science, 1968
- [2] YANG Xuexia, Overview of microwave power transmission technology and recent progress of rectennas, Chinese journal of radio science, 2009
- [3] He Q, Liu C. An enhanced microwave rectifying circuit using HSMS-282, PIERS Proceedings, 2009
- [4] Zhang B, Zhao X, Yu C, Huang K, Liu C. A power enhanced high efficiency 2.45 GHz rectifier based on diode array. J. Electromagn. Waves Appl., 2011
- [5] Wen Hua Tu, Shih Hsun Hsu, Kai Chang, Compact 5.8-GHz rectenna using stepped-impedance dipole antenna, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007
- [6] McSpadden JO, Lu F, Chang K, Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 1998
- [7] Dal, A., J. S. Park C. S. Kim, A design of the low pass filter using the novel microstrip defected ground structure, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 2001

### 作者简介:

谭菲菲, 女, 硕士研究生, 主要研究领域为电磁场与微波技术; 刘长军, 男, 教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术。