

# Ka 波段二倍频器的研究与设计

黄绣江\* 唐宗熙 杨 涛

(电子科技大学光电信息学院, 电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**利用反向并联二极管对的二倍频原理, 设计了 Ka 波段二倍频器。用高级设计系统 ADS 设计软件包的射频设计软件对二倍频器的电路进行了模型设计和仿真分析, 并对设计出的二倍频器进行了整体优化, 研制了 Ka 波段的二倍频器; 在整个 Ka 波段内的变频损耗为  $11.2 \pm 1.8$  dB, 减少了设计的理想模型与实际参数的偏差。

**关键词** Ka 波段; 倍频器; 平衡电路; 肖特基势垒二极管; 宽带

**中图分类号** TN771; O441.4

## Research and Design of Ka-band Frequency Doubler

Huang Xiujiang Tang Zongxi Yang Tao

(College of Opto-electronic Information, College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** This paper presents theoretical analysis circuit design of doubler using two beam-lead Schottky-barrier diodes as varistors. Influence of cavity to the microstrip circuit is fully considered during the CAD process and accurate model is set up. Input frequency is 13~20 GHz. Output frequency is 26~40 GHz. Conversion loss is better than  $11.2 \pm 1.8$  dB. It can extend microwave signal source to Ka-band.

**Key words** Ka-band; doubler; balanced circuit; Schottky-barrier diode; wide-band

在高精度微波信号源基础上, 利用宽带倍频技术获得毫米波信号输出是一项非常有意义的工作。根据反向平衡式倍频电路的工作原理可知, 二极管对混合连接可以构成全波整流电路, 实现偶次倍频<sup>[1]</sup>。在整个 Ka 波段设计倍频器, 若采用以往的手工调试、试验分析、再调试的硬件重复过程, 其工作量很大。而且, 由于微波电路尺寸较小, 以往设计时忽略了壳体的影响, 建立的模型与实际情况存在偏差, 计算机辅助设计充分考虑了各种因素对微带电路的影响, 建立了尽可能接近实际情况的模型, 极大地减少了工作时间, 提高了工作效率。

### 1 倍频原理

为了获得足够的输出功率和较大的动态范围, 本文采用多器件反向平衡式倍频电路, 其工作原理如图1所示。图中, 输入信号通过低通滤波器加到反极性安装的二极管, 通过平衡电路取出输出信号。输出电流是二极管  $i_1$  和  $i_2$  之和的一半<sup>[2]</sup>。

$$i_1 = I_s [\exp(\mathbf{a}V_{in}) - 1] \quad (1)$$

$$i_2 = -I_s [\exp(-\mathbf{a}V_{in}) - 1] \quad (2)$$

式中  $I_s$  是反向饱和电流;  $\mathbf{a} = -nkT$ ,  $V = V_s \cos(\mathbf{w}_s t)$ , 得到

2002年4月25日收稿

\* 女 24岁 博士生

$$i_L = 0.5(i_1 - i_2) = I_s [\cosh(aV) - 1] \tag{3}$$

作级数展开

$$i_L = -I_s + I_s I_0(aV_1) + 2I_s V_1 \sum_{k=0}^{\infty} [I_{2k}(aV_1) \cos 2k\omega_1 t] \tag{4}$$

上式表明，流过负载上的电流仅含激励频率的偶次谐波分量。该电路适合于偶次倍频，且输入基波和输出谐波相互隔离，对 8 mm 波段二倍频器的输入、输出回路分别进行匹配，容易实现全波导带宽的二倍频器。

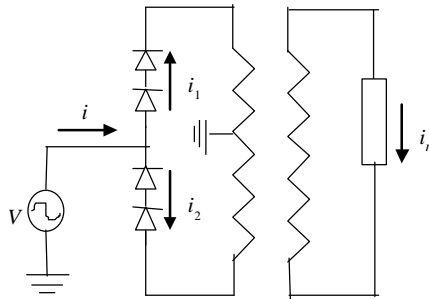


图1 倍频电路原理

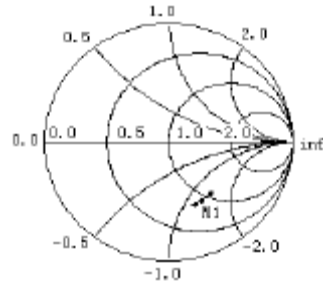


图2 反向并联二极管对大信号 S 参数 Smith 圆图

## 2 二极管的非线性模型

肖特基势垒二极管的导电机构只有一种电子，所以反向恢复时间短、响应速度快、闪烁噪声小、制造工艺简单，能在非常高的频率下表现出良好的非线性变容或变阻特性。本文采用 DMK2606GaAs 肖特基势垒二极管，其主要 SPICE 参数有反向饱和电流、欧姆电阻、反射系数、零偏结电容、禁带宽度、结电势等。考虑了二极管的引线电感和封装电容，建立二极管反向并联对的原理图。运用谐波平衡法分析电路从 13 ~ 20 GHz 仿真肖特基势垒二极管并联对特性，在 Smith 圆图上可以看到中心频率  $f_{M1} = 16.5$  GHz 时的导纳值  $Y_s$ ，阻抗值  $Z_s$ ，如图 2 所示。输入和输出的匹配设计基于二极管并联对的等效电路参数。

## 3 倍频器的电路结构及所采用的拓扑

图 3 为倍频器电路图，输入信号通过悬置微带低通滤波器和悬置共面波导匹配网络耦合到两个匹配的二极管对上，二极管对使输入信号失真，失真信号为输入信号谐波<sup>[3]</sup>，由于倍频电路采用平衡式结构，输出回路只有偶次谐波分量，由鳍线匹配网络和 8 mm 波导滤出所需要的 2 次谐波从而实现倍频。

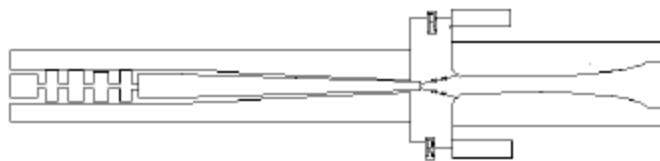


图3 倍频器电路

输入电路采用低损耗的悬置微带低通滤波器和悬置共面波导。悬置微带线屏蔽腔体尺寸的选择应考虑抑制高次模，能传输的最低波导模式的截止频率为

$$f_0 = \frac{v_0}{2a} \sqrt{1 - \frac{h(e_r - 1)}{be_r}}$$

选用  $e_r = 2.22$ ， $h = 0.254$  mm 的介质基片，则腔体尺寸为  $a \times b = 3.556$  mm  $\times$  2.500 mm，其波导模截止频率为  $f_c = 41$  GHz，大于工作频率，所以输入腔中只存在准 TEM 模，没有高次模。采用 Eesof 软件中的 Lincale 软件包分析悬置微带线<sup>[4]</sup>、悬置共面波导的特性阻抗  $Z_c$  和有效介电常数  $E_{eff}$ ，根据

切比雪夫低通原型设计9节高、低阻抗线悬置微带滤波器,该滤波器不但抑制来自前级功率放大器的谐波,而且使倍频二极管产生的谐波返回到输出端,倍频器件产生的2次谐波功率由鳍线阻抗匹配段和鳍线渐变段组成,构成了倍频器的输出回路,鳍线的间隙根据倍频器件2次谐波阻抗来设计。

相对于常规微带线,悬置共面波导(SCPW)在毫米波应用时有很宽的频带<sup>[5]</sup>,渐变线始端特性阻抗为 $50\ \Omega$ ,长度为输入频带最低频率的一个波长, $l = c/f = (3 \times 10^8)/(13 \times 10^9) = 23\ \text{mm}$ 。经过分析,渐变线终端特性阻抗取为 $64\ \Omega$ 时,整个输入频带内反射系数 $|G| < 0.3$ ,输入腔体要抑制40 GHz以下的波导模,同时,输入腔体宽度设计与输出腔体宽度一致,可以减小腔体不连续性,有利于设计、制作、安装电路。输出腔体要求输出频率为26.5~40 GHz,输出腔体与8 mm波导尺寸一致。其中输入腔体: $a \times b = 3.556 \times 2.5\ \text{mm}^2$ ;输出腔体: $a \times b = 3.556 \times 7.112\ \text{mm}^2$ 。腔体高度从2.500 mm变到7.112 mm,有很大的台阶。为了减小此台阶带来的不连续性,考虑到工艺加工的困难和经济性,对腔体高采用线性渐变,渐变段长度选为23 mm,与悬置共面波导渐变长度相同。

本文在Agilest HFSS中建立了渐变腔体及悬置共面波导的模型,并对其进行了场模拟及电路参数分析,再对电路进行仿真,得到其输入及输出阻抗分别为 $49\ \Omega$ 和 $64\ \Omega$ ,将得到的S参数数据保存为p2d文件,在搭建整个电路时调用该文件,以达到充分接近实际模型的目的。由于倍频器是平衡式结构,二极管对地是反向并联,为了提高二极管转换效率,输入功率小时驱动二极管工作,输入功率大时保持效率,在二极管对的输出端引入偏置电路。本文采用的是自偏置,即在旁路电容与接地腔体之间跨接一个电阻。

#### 4 倍频器的仿真和优化

利用Harmonic Blance算法对整个电路进行仿真和优化,并采用RT/duroid5880基片成功地研制了Ka波段宽带倍频器,并对其性能指标进行测试,在输入功率为13 dBm时,结果如图4所示。由图4可以看出,当输入功率为13 dBm时,输出功率大于0 dBm,变频损耗小于13 dB,具有宽频带、低损耗的特点。

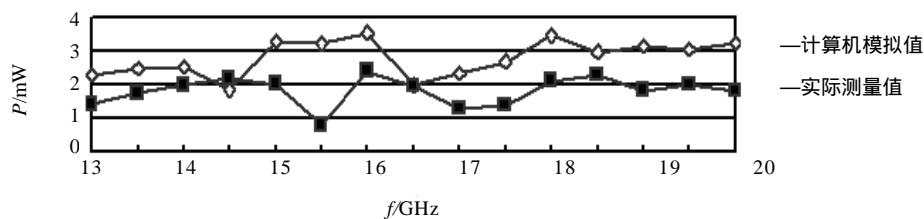


图4 倍频器输出功率曲线图

#### 5 结束语

由Ka波段二倍频器的设计流程可以看出,采用HP-Eesof软件并结合适当的电路模型,能够在很短的时间内设计出性能良好的倍频器,而且在仿真过程中可对电路特性作全面的了解,对电路调试也有很大的帮助。

#### 参 考 文 献

- 1 甘体国. 肖特基势垒二极管在毫米波集成电路中的应用. 电讯技术, 1994, 34(5): 12-17
- 2 王惠功. 非线性微波毫米波电路分析与设计. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990
- 3 Nguyen C. A 35% bandwidth q-to-w band frequency doubler. Microwave Journal, 1987, 30(9): 232-235
- 4 Eikichi Y, Bai Y W, Kazuhiko A, et al. Effects of side-wall grooves on transmission characteristics of suspend striplines. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(1): 24-29
- 5 阮成礼. 悬置共面波导的特性阻抗. 电子科技大学学报, 1999, 28(1): 32-36