

Ka 波段倍频放大组件

曹卫平¹⁾ 甘体国²⁾ 李思敏¹⁾ 喻志远³⁾

¹⁾ 桂林电子工业学院微波光波教研室, 广西, 桂林, 541004;

²⁾ 信息产业部第十研究所毫米波实验室, 四川, 成都, 610036;

³⁾ 电子科技大学应用物理研究所, 四川, 成都, 610056)

摘要 报道了 Ka 波段倍频放大组件的研究结果. 将厘米波信号通过 FET 二次倍频和 PHEMT 四次倍频方式提升到 Ka 波段, 并通过功率放大器获得输出频率在 24 ~ 30.4GHz 范围内, 最大的倍频增益为 16.6dB, 输出功率大于 50mW, 最大输出功率大于 100mW. 为无线通信系统毫米波前端提供本振源.

关键词 FET 倍频器, 滤波器, 倍频放大组件, 微带到波导过渡.

A FREQUENCY MULTIPLIER-AMPLIFIER MODULE AT Ka-BAND

CAO Wei-Ping¹⁾ GAN Ti-Guo²⁾ LI Si-Min¹⁾ YU Zhi-Yuan³⁾

¹⁾ Microwave and Light-wave Division, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

²⁾ Millimeter Laboratory, the Electronic 10th Institute of Ministry of Information Industry, Chengdu, Sichuan 610036, China;

³⁾ Institute of Applied Physics, University of Electronic Science Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The result of a frequency multiplier amplifier module at Ka-band is reported. The function is to escalate the centimeter-wave signal to Ka-Band multiplied by FET and quadrupled by PHEMT. By using power amplifier to obtain the output frequency is between 24 GHz and 30.4 GHz, the best conversion gain is 16.6dB, the output power is bigger than 50mw, and the best output power is bigger than 100mw. The frequency multiplier-amplifier module at Ka-band can supply good local oscillation source for the wireless communications.

Key words FET multiplier, filter, multiplier and amplifier integrated modular, waveguide-to-microstrip transition.

引言

随着新工艺、新材料的使用,毫米波技术在近二十年里得到了日新月异的发展,毫米波元器件的性能有了极大的提高,为实现低价、小型化、高性能的毫米波通信系统奠定了良好的基础.同时,随着系统工作频率向毫米波频段延伸,要求频率高、并且有良好稳定性和相噪特性的毫米波源已提到研究日程.返波管、速调管等真空电子器件虽然满足系统对“源”的功率要求,但它们体积大、电源电压高,而且价格昂贵,因而不适合在很多实际系统中使用.固态器件因其体积小,易于集成而且使用寿命较长已成为许多系统的优选器件.

Ka 波段倍频放大组件的研制工作,其主要功能是将厘米波信号通过二次倍频和四次倍频方式提升

到 Ka 波段,并通过功率放大器获得有倍频增益输出,为无线通信系统前端提供本振源.这样不仅降低了产生 Ka 波段信号技术难度,噪声小,稳定性高.而且由于采用 FET(有源)倍频,利用非线性电阻产生谐波,单向性、隔离度好,放大级数少、功率低,并有增益,同时提供较高的效率和较宽的工作频带,不需要空闲电路,对输入功率要求较低;通过采用 MMIC,从而降低了成本、减小了体积、提高了可靠性.

1 基本原理与电路设计

Ka 波段倍频放大组件组成电路如图 1 所示,由毫米波和微波两部分组成.

1.1 微波电路部分

在微波电路部分,输入频率为 3.4GHz,输出频

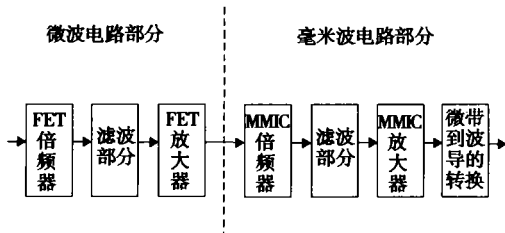


图1 Ka波段倍频放大集成组成
Fig.1 Frequency multiplier amplifier module at Ka-band

率为6.8GHz. 其中采用GaAsFET作为倍频器件,场效应管产生谐波的非线性主要为当FET被置于饱和或截止状态时射频漏极电流 I_D 被限幅引起的非线性. 由于FET工作在饱和状态时要求更大的直流漏极电流,导致较低的直流到射频的转换效率,因栅极电流尖峰而使FET损坏,因故采用FET工作于截止状态的模式,即 $V_{GS} = V_p$. 此时FET直流漏极电流很小,因而可靠性较高. 再则,由于它是有源电路,我们主要对它的匹配电路和偏置电路进行设计. 整个倍频电路均使用平面微带集成电路,输入输出均采用抽头式,其电路拓扑结构如图2所示. 各部分简述如下.

输入端为对基波(f_0)的匹配和对二次谐波的反射. 为保证输出谐波在输入端短路,选择电长度(对 f_0 而言)为 $\pi/4$ 的开路线. 用谐波平衡法可算出二次谐波的输出功率,研究表明,二次谐波的输出功率跟二次谐波的反射位置和传输线损耗有关. 在本文中,由于传输线损耗不能忽略,因此为了获得最大输出功率,必须优化确定二次谐波的反射位置^[4]. 输出端为对基波的反射和对二次谐波的匹配.

直流偏置 FET的偏置是倍频器设计中重要的一环,偏置电路的设计考虑应包括:效率、噪声、对寄生振荡的抑制、独立的电源供电、射频扼流和阻抗匹配. 本文中选取栅极偏置在夹断电压($V_p = -1.5v$)

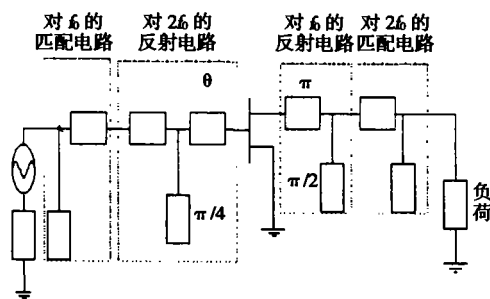


图2 电路拓扑结构图
Fig.2 Circuit topological structure

附近,漏极电压(V_{ds})在4V附近. 倍频器平均直流分量小、管耗小、效率高、不易产生自激.

对带通滤波器,我们采用微带抽头式交指带通滤波器. 由于这种滤波器的拓扑结构较为特殊,理论分析非常复杂. 在利用软件(ADS)进行设计时,只建立了双耦合线和三耦合线模型,所以在软件中建立交指多耦合线滤波器模型时直接利用双耦合线和三耦合线模型就无法考虑多根耦合线之间的耦合. 这给分析和设计交指滤波器带来一定的困难. 为了解决以上的缺陷,这里我们采用在双耦合线模型的基础上建立虚拟的负传输线模型的方法,也就是使用多对双耦合线,单根传输线以及电流控制电流源(CCCS)和电压控制电压源(VCVS)的负传输线模型方法. 每根耦合线的宽度可以不相等. 此方法,考虑了多耦合线中各相邻线之间的耦合. 这样,对 n 根耦合线滤波器模型, n 根耦合线变成了 $(n-1)$ 对双耦合线和 $2(n-2)$ 根传输线,每根传输线两端各接一倒向器(negator),倒向器(negator)由电流控制电流源和电压控制电压源构成,如图3所示.

其数学思想:一段无损耗、特性阻抗为 Z_0 的负传输线的矩阵为

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -jZ_0 \tan(\theta) \\ -j \tan(\theta) / Z_0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 θ 为电长度.

式(1)可变换为如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & jZ_0 \tan(\theta) \\ j \tan(\theta) / Z_0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -jZ_0 \tan(\theta) \\ -j \tan(\theta) / Z_0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)可以看成是:[ABCD]矩阵由3个2端口网络级联而成. $\begin{bmatrix} \cos(\theta) & jZ_0 \tan(\theta) \\ j \tan(\theta) / Z_0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$ 对应于特性阻

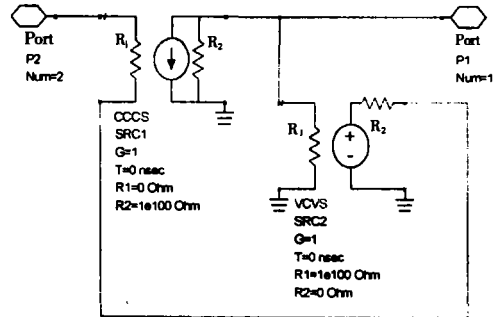


图3 倒向器模型
Fig.3 A negator circuit module

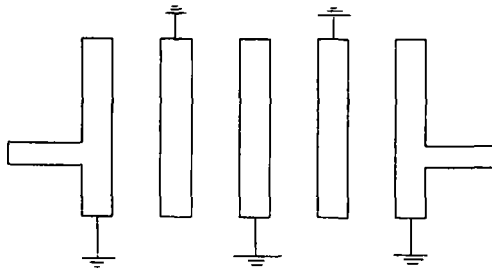


图 4 滤波器结构
Fig. 4 A filter structure



图 6 倍频放大组件实物照片图
Fig. 6 The photograph of the frequency multiplier amplifier module at Ka-band

抗为 Z_0 的传输线,前面和后面的矩阵 $\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 对应于倒向器,可用 CCCS 和 VCVS 来实现. 这样一负传输线即可由一特性阻抗为 Z_0 的传输线和两个倒向器(negator)来代替. 于是,滤波器电路的原型由图 4 变为图 5 的情形.

1.2 毫米波电路部分

在毫米波电路部分,输入频率为 6.8GHz,输出频率为 27.2GHz,其中包括有四倍频器、滤波和放大. 同样,为了减小体积,倍频器和放大器均采用 MMIC(HMMC-5040). HMMC-5040 芯片是一个四级的宽带微波增益块,即包含四级 PHEMT 放大电路,覆盖范围为 20 ~ 40GHz. PHEMT 器件本质上是一种 FET. 它是采用深亚微米栅(约 0.2 μ m)制备技术,利用异质结材料制成的可以工作于毫米波频段的功率器件. 它是利用异质结界面处的导带不连续性产生的量子势阱内二维电子气(2DEG)所具有的量子效应和载流子空间压缩效应,提高沟道内载流子的输运特性使器件的直流及射频特性较传统的 GaAs MESFET 得到显著的改善. 异质结功率器件在保持频率优势的前提下,具有输出功率密度大(可大于 0.5w/mm 栅宽)、功率转换效率高(PAE > 30%)等优点. 因此是一种理想的功率器件. 当 HMMC-5040 用做四倍频器,输出信号频率为 20 ~

28GHz 时,则可利用它的频率—增益特性有效地抑制不需要的输入信号谐波,其输出功率可达 20dBm,并能获得 7dB 的变频增益,输入功率可通过实验来确定. 值得注意的是,实际的四倍频器输入输出没有对各次谐波附加任何电路.

对带通滤波器,我们采用平行耦合微带线带通滤波器. 经分析,平行耦合微带线的插损对缝隙s/H的变化十分灵敏,而且这种灵敏度随着频率的增加而增大;同时在设计中,随着设计带宽的增加,通带内电压驻波比的波动超过设计值,特别是在截止频率附近;而且实际制作的滤波器的带宽以无法预知的状况偏离指定的设计带宽. 这些都必须在设计中考虑到.

由于 Ka 波段倍频放大组件的输出中心频率为 27.2GHz(Ka 波段),所以在输出端,我们采用微带到波导过渡,以达到降低损耗的目的. 目前,波导到微带线过渡的方法主要有:通过对极鳍线转换,利用脊波导转换,用探针转换等. 在微波频段普遍采用阶梯或渐变式单脊波导过渡. 在毫米波频段,由于基片薄软,导带窄,如此结构在工艺制作上带来困难. 波导脊与导带的连接采用压力接触而不用焊接,其性能与压力接触状况密切相关,且可靠性差,所以这种过渡方式较少采用. 由于鳍线内存在各种模式,抑制所有不需要的反馈不容易,另外在截止频

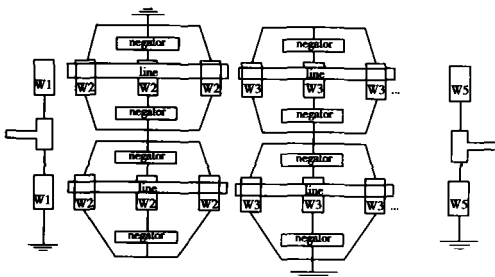


图 5 滤波器的等效模型
Fig. 5 Filter's equivalent module

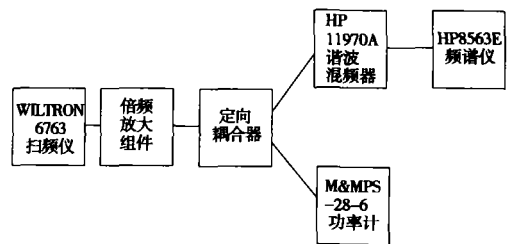


图 7 测试框图
Fig. 7 Diagram testing

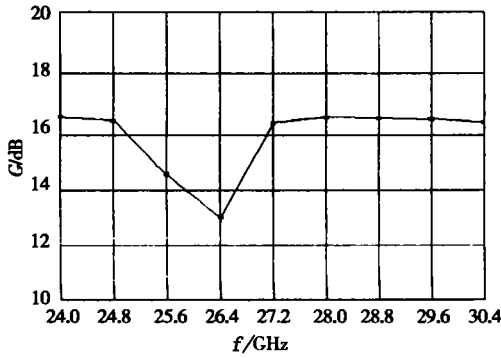


图8 测试结果

Fig. 8 The result of testing

率下输入输出的鳍线提供一个纯电抗源阻抗或负载阻抗,使有源器件处于不稳定区域,易出现自激振荡。这里,我们采用微带探针转换,并且在阻抗变换器段用渐变过渡。它有明显的优点:插入损耗低,回波损耗小,具有较大频宽,且其结构紧凑,加工方便,装卸容易,渐变过渡器便于机械加工,制造成本相对较低,而且带宽比较宽,实验证明,采用渐变过渡可以在带宽中心对应的3个波长长度内获得极好的过渡特性。但由于它在同样过渡特性时的实际长度比阻抗变换器要长,因而是一种以增大体积为代价的结构。

2 倍频放大链的测试

输入信号源为 WILTRON6763 扫频源,用功率计测量输出功率,通过定耦合器用频谱仪测量频谱。测试前先对 WILTRON6763 扫频源的输出电平进行

校准,并测出同轴线电缆和波导的损耗,然后改变输入频率,同时对偏置电压进行调整。记录数据。

测试结果可以看出,输出频率在 24 ~ 30.4GHz 范围内,最大的倍频增益为 16.63dB,输出功率大于 50mW,最大输出功率大于 100mW。

3 结论

我们用 FET 倍频和芯片集成的方式在 Ka 波段设计了 Ka 波段倍频放大集成组件。测试结果与设计值有很好的 consistency,可以直接用作无线通信系统毫米波前端的本振源和辐射源。该项工作的完成,对于以后工作的开展将是非常有益的。¹

REFERENCES

- [1] RUAN Cheng-Li. *Millimeter-wave Theory and Technologies*. Chengdu: University of Electronic Science Technology of China (阮成礼. 毫米波理论与技术. 成都:电子科技大学出版社), 2001, 122—145
- [2] GAN Ti-Guo. Millimeter-wave integrated circuit technology. *Supplement of telecommunication technology* (甘体国. 毫米波集成电路技术. 电讯技术增刊), 1991, 30
- [3] GAN Ti-Guo. The apply of Millimeter-wave multiplier amplifier module for double frequency segment. *Telecommunication technology* (甘体国. 双频段应用的毫米波倍频—放大器组件. 电讯技术), 1995, 35(5): 5—7
- [4] Yoshitada Iyama. Second-harmonic reflector-type high gain FET frequency doubler operating in K-band. *IEEE MTT-S Digest*, 1989, 1291—1294
- [5] Gustavo Lopez-Risueno, Jose Alonso I. Simulation of interdigitated structures using two-coupled-line models. *Micro-wave journal June*, 2000, 70—82