

# 一种基于双级支线功分/功合网络的毫米波固态功率放大器

恽小华, 孙琳琳, 楚 然, 申明磊

(南京理工大学微波工程研究中心, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 本文综合考虑影响合成效率的因素以及毫米波段的工艺精度, 设计了一种改进型的双级支线功分/功合网络, 改善了驻波比和幅相特性, 保证了良好的合成效率. 并在此基础上, 研制了一种高性能的毫米波固态功率放大器, 在 38 ~ 40GHz 的通带内, 实现 34.8dBm 输出功率, 55dB 增益的良好电性能, 具有结构简单、加工简易等特点.

**关键词:** 毫米波; 功率分配/合成; 微波单片集成电路; 固态功率放大器

**中图分类号:** TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2347-03

## A Millimeter-Wave Solid State Power Amplifier Based on Two Stage Branch Dividing/ Combining Network

YUN Xiao-hua, SUN Lin-lin, CHU Ran, SHEN Ming-lei

(Microwave Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** In this paper an upgraded two stage branch dividing/ combining network is designed to improve the VSWR, amplitude and phase characteristic. During the design the factors that will influence the combining efficiency and the fabricating precision of the millimeter-wave band are considered synthetically, all those ensure the good combining efficiency of this network. Based on the network a millimeter-wave solid state amplifier with high performance is developed. In the band of 38-40GHz the minimum output power of the amplifier is more than 34.8dBm and the minimum gain is more than 55dB. The results show that this amplifier has good electrical performance, simple structure and is easy to be fabricated as well.

**Key words:** millimeter wave; power dividing/ combining; MMIC; solid state power amplifier

### 1 引言

毫米波固态功率放大器研究一直是毫米波理论与技术研究的重要课题. 由于受到毫米波固态器件自身半导体物理特性的影响以及加工工艺等诸方面的限制, 大功率毫米波固态功率芯片还未能达到设计需求的要求, 为解决这一毫米波应用方面的难题, 国际上自七十年代中期起相继开展了旨在提高毫米波固态功率放大器输出功率的研究, 最常用的即为毫米波功率合成技术. 功率合成就是一种由较小功率组合成更大输出功率的方法, 有电路型合成、芯片型合成、空间型合成以及混合型合成等多种功率合成方式. 由于工艺水平等因素的限制, 采用有较大功率输出能力的微波单片集成电路 (MMIC) 进行电路级功率合成, 是目前研制大功率输出的毫米波固态功率放大器的有效方法.

良好的功率合成是实现固态功率放大器功能和性能的首要因素之一. 但实际上, 由于功率合成器存在损耗, 分路的幅度、相位不可能完全一致, 输出总功率比理想情况要小. 本文从功率分配和合成两个方面着手, 在强调结构简单和加工简易且易于批量生产的前提下, 重点研究多级支线定向耦合结

构, 通过多路分配和合成网络的改进设计和优化仿真, 采用多芯片微组装机最终研制了一款性能优良的毫米波固态功率放大器, 在 38 ~ 40GHz 的通带内实现输出功率大于 34.8dBm, 增益高于 55dB.

### 2 毫米波固态功率放大器方案设计

本文旨在研制一种工作于 38 ~ 40GHz, 输出功率为 34.8dBm (3W), 增益大于 50dB, 三阶交调小于 -25dBc 的毫米波固态功率放大器, 接口形式为 2.92mm 同轴接头, 具备可批量生产性.

经指标分解和器件调研, 该毫米波固态功率放大器可由三级级联放大电路组成, 如图 1. 并含有增益补偿电路和检波电路, 整个放大器共包

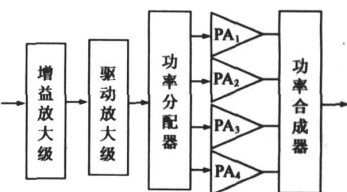


图 1 毫米波固态功率放大器原理框图

括 6 片毫米波 MMIC.

末级功率放大电路应由 4 片平行放置的功率放大 MMIC 组成,通过四路平面微带结构的功率分配/合成网络实现所需大功率的合成.该放大器信号传输电路载体材料选用低损耗的熔融石英,偏置电路等则采用 FR4 板,腔体材料为黄铜.

### 3 电平计算与器件的选择

经电平分配计算可知,以毫米波固态功率放大器的最终输出功率 34.8dBm 为目标,预设实际加工后四路功率分配/合成网络插损分别大约为 1.2dB,微带-同轴接头以及输出端传输线损耗共约为 0.5dB.选用 MCPA-3830B 型毫米波 MMIC 作为固态功率放大器的最后一级,该芯片经单芯片电路验证在 37~40GHz 频带范围内的输出功率大于 30.8dBm,增益为 20dB,可满足四路合成实现 34.8dBm 输出功率的需求.

经计算可推知驱动级输入至功率分配网络的功率应达到 18.5dBm,考虑到驱动级至功分网络的传输损耗约为 0.3dB,第二级驱动放大级的芯片输出能力应至少达到 20dBm,经综合比较功耗、性能、尺寸等因素,选用 TGA4036 为第二级芯片,该芯片在工作频段内可实现 22dBm 的输出功率和 20dB 的增益,尺寸仅为 1.69mm × 0.75mm.

此外,在第一级增益放大级设计中,考虑到低噪声放大器良好的线性特性,故经综合比较选用噪声系数较低,增益达 21dB,尺寸仅为 1.7mm × 0.8mm 的 TGA4508 来满足整个毫米波固态功率放大器增益大于 50dB 的设计要求.

### 4 功率分配/合成网络

#### 4.1 功率分配/合成网络的选择

易于设计和用微带工艺实现平面电路的功率分配/合成器的基本形式主要有:(1)Lange 耦合器;(2)威尔金森(Wilkinson)功分器;(3)支线定向耦合器.

在构成功率分配/合成放大电路时,从电气性能上讲,这三种电路形式各有其优点.Lange 耦合器体积小、频带宽、隔离度良好;Wilkinson 功分器结构简单、两路幅相平衡度较好;支线定向耦合器输入输出反射系数小、隔离度好.

从工艺角度来看,Lange 耦合器中的耦合线宽和缝隙都很小,频率越高,加工越困难,在毫米波频段,线宽一般只有几十微米,国内工艺水平很难实现.Wilkinson 功分器中的隔离电阻的位置很关键,安装却很困难,特别在毫米波频段,由于电路尺寸很小,隔离电阻的位置对电路性能的影响更为严重.在支线定向耦合器中没有很细的微带线,也没有很窄的缝隙,其隔离端口所加的隔离电阻的位置对电路性能影响很小,能够在国内的工艺水平下保证加工精度.

如果工艺上无法实现,设计的电路性能再好,对于工程应用来说也是没有意义的.综合调研国内工艺水平,我们选用支线定向耦合器作为基础单元来构成本文中的毫米波固态功率放大器的功率分配/合成网络.

#### 4.2 功分/功合网络设计

功分/功合网络效率受电路损耗以及信号分配/合成时的幅相位不一致等因素影响.由文献可知:单元电路损耗越大,合成效率越低,合成的路数越多,合成效率也越低;当相位一致时,幅度离散对合成效率的影响非常小,幅度一致时,相位

离散对合成效率的影响则较大;而当幅度、相位均存在离散时,在幅度差不大于 1dB 的范围内,合成效率主要受相位离散值的影响,合成效率等于幅度一致、相位离散时的合成效率与相位一致、幅度离散时的合成效率两者之积.

针对电路损耗这一因素,我们采用介质损耗小的熔融石英(介电常数为 3.78,厚度为 0.127mm)作为功分/功合网络的载体材料,以减少分配/合成网络的电路损耗.对于功分/功合网络的幅相一致性则通过电路优化设计来解决.

在以上原则的基础上,为了扩展工作带宽,并保证很好的幅度和相位一致性、低损耗和各端口间足够大隔离度,经论证和优化仿真



图 2 双级支线功分/功合网络

设计了如图 2 所示的双级支线定向耦合器作为毫米波功率分配的功率分配/合成单元,从仿真结果(图 3、4、5、6)可以看出:这种结构输入、输出驻波比小,隔离度高,工艺要求低,在毫米波频段体积也不大,并具有一定的工作带宽.

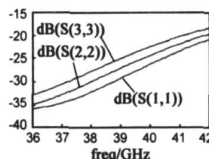


图 3 输入/输出驻波比特性

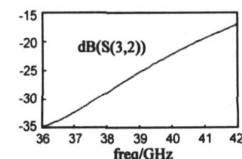


图 4 两输出隔离度特性

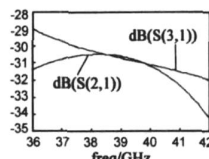


图 5 两输出幅频特性

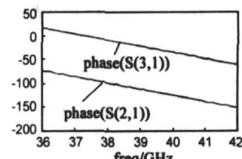


图 6 两输出相频特性

由仿真结果来看:在 38~40GHz 的频带内,电路的插入损耗小于 0.2dB,两路输出信号的幅度不平衡度小于 0.1dB,两路输出信号的相移差在 89.5°~90.5°之间,输入、输出驻波比小于 1.15,两个输出端口的隔离度大于 22dB.

根据以上优化得到的双级支线定向耦合电路组成四路功率分配/合成电路,其中每个双级支线定向耦合电路的尺寸一致,仅在功分隔离端和功合隔离端稍作修改,如图 7 所示.

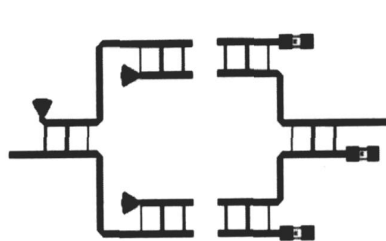


图 7 四路功分和功合网络

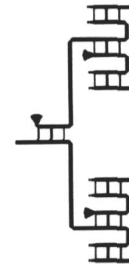


图 8 改进后的功率分配网络

通过仿真计算,发现功分网络四个输出端口的驻波特性在频带内恶化较为严重为 1.5,而幅相不一致性在频带内也有所增大,这必然会降低合成效率,影响输出功率.所以,对功率分配网络作了一些改进设计,如图 8.

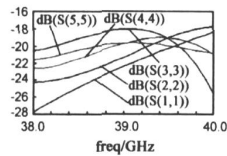


图 9 输入/输出驻波比特性

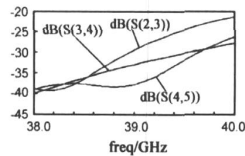


图 10 输出隔离度特性

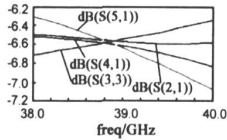


图 11 输出幅频特性

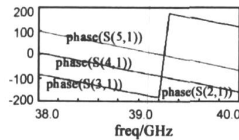


图 12 输出相频特性

由以上仿真结果可以看出该功分网络工作频带有所拓宽,在频带内四端输出出口的驻波特性得到了显著改善小于 1.3,幅度和相位的不平衡度也有所改善,幅度最大差异不超过 0.6dB,相邻端口的幅度不平衡更小,相位不平衡度小于 5 度,相邻端口的相位不平衡度更小.这种改进仅牺牲了 0.3dB 的电路损耗.

## 5 末级功放电路设计

在图 8 所示的改进后的四路功率分配网络和图 7 所示四路功合网络之间加入毫米波功放 MMIC 进行整体末级功放电路仿真计算.

由于毫米波 MMIC 内部采用了管芯合成和内匹配,由此构成的放大芯片插入相位在毫米波频段相差十几度、几十度为常见现象.通过对选用的毫米波 MMIC 按照插入相位进行筛选分类,确保进行四路功率合成的四片 MMIC 有相近的插入相位,以提高合成效率.

同时,因选用的 MMIC 是双边供电,将偏置网络从功率分配网络底部穿过,这里需磁场分析软件配合仿真,采用普通的 FR4 印制板即可完成偏置电路设计,设计中应保证加到每个 MMIC 上的电压同步.加工完成的末级功率放大电路如图 13 所示.

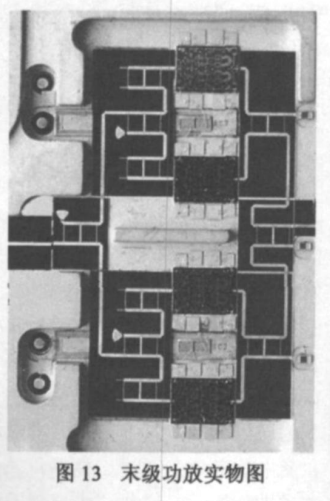


图 13 末级功放实物图

## 6 研制结果和结论

在末级功率放大电路的基础上加入第一、第二级芯片进行整体电路仿真计算,同时,为了调整整个电路的增益平坦度,在电路中还设计了增益补偿电路.最终在国内工艺的基础上,我们实现了该毫米波固态功率放大器的研制,尺寸为 50mm × 35mm × 20mm.

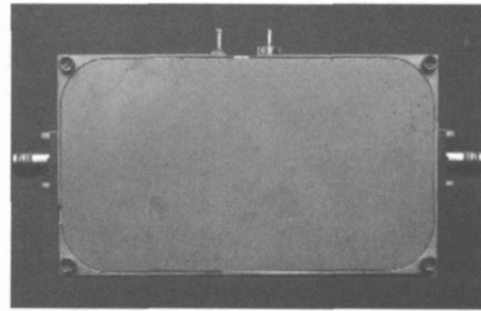


图 14 毫米波固态功率放大器实物图

经测试,该毫米波固态功率放大器在 38 ~ 40GHz 输出功率大于 34.8dBm,增益大于 55dB,输入驻波比为 1.5:1,输出驻波比为 1.5:1,增益平坦度达到  $\pm 0.5$ dB/500MHz,三阶交调小于 -25dBc,满足设计要求,并已应用于毫米波系统.若进一步改善电路和加工工艺,双级支线功合网络效率有望进一步提高.

## 参考文献:

- [1] Michael R Lyons, Christopher D Grondahl, Scarlet M Daoud. Design of low-cost 4W & 6W MMIC high power amplifiers for Ka-band modules [A]. IEEE MTT-S Digest [C]. IEEE, 2004. 1673 - 1676.
- [2] Nestor Escalera, William Boger, Phil Denisuk, James Dobosz. Ka band, 30 watts solid state power amplifier [A]. IEEE MTT-S Digest [C]. IEEE, 2000. 561 - 563.
- [3] S Nelson, M Youngblood, J Pavo, B Larson, R Kottman. Optimum microstrip interconnects [A]. IEEE MTT-S Digest [C]. IEEE, 1991. 1071 - 1074.
- [4] Daisy L Ingram, D Ian Stones, Jeffrey H Elliott, Hwei Wang, Richard Lai, Michael Biedenbender. A 6-W Ka-band power module using MMIC power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45 (12): 2424 - 2430.
- [5] Kohji Matsunaga, Ikuo Miura, Naotaka Iwata. A CW 4-W Ka-band power amplifier utilizing MMIC multichip technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35 (9): 1293 - 1297.

## 作者简介:



恽小华 男,1965 年生于江苏省武进,1988 年毕业于中国科学技术大学无线电系,获硕士学位,1996 年晋升为教授.现任南京理工大学微波工程研究中心主任、浙江大学纳米电子首席科学家.主要研究方向:纳米电子技术、微波毫米波技术、微波单片集成电路.  
E-mail: xhyun@188.com