

文章编号: 1001-9014(2008)06-0433-04

## 毫米波 10W 空间功率合成放大器研制

赵晨曦, 谢小强, 徐锐敏

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

**摘要:**提出了一种结构新颖的  $2 \times 2$  空间功率合成结构. 该结构在 30 ~ 36GHz 范围内, 回波损耗优于 10dB, 插入损耗小于 1dB. 以此结构为基础再利用 4 块 GaAs MMIC 单片制作出了一个新型的功率合成器. 该功率合成器在 31 ~ 34GHz 的频率范围内, 在  $\pm 0.64$ dB 的增益波动下能得到大于 10W 的输出功率, 并且在 31GHz 时具有最大的饱和输出功率 13.8W, 在带内的平均合成效率大于 80%.

**关键词:**功率合成; 毫米波; 输出功率

**中图分类号:** TN73 **文献标识码:**

## STUDY ON A 10W MILLIMETER-WAVE POWER AMPLIFIER BASED ON SPATIAL COMBINATION STRUCTURE

ZHAO Chen-Xi, XIE Xiao-Qiang, XUE Rui-Ming

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A  $2 \times 2$  spatial combination structure was presented. The measured insertion loss of 1 dB was achieved with a return loss of 10 dB at 31.0 ~ 34.0GHz. By using 4 GaAs monolithic microwave integrated circuit (MMIC), a new power combining was made which could produce up to 10W maximum power output with a gain variation of  $\pm 0.64$ dB in the bands of interest (31.0 ~ 34.0GHz). At 31 GHz, this combining amplifier circuit provides a maximum output power of 13.8W, and the average combining-efficiency in the band of interest exceeds 80%.

**Key words:** power-combining; millimeter-wave; output power

### 引言

毫米波频段是目前军事电子技术发展的主要频段, 广泛应用于导弹精确制导, 雷达, 保密通信, 电子对抗和测试技术等方面. 对雷达与通信系统而言, 系统功率的提高即意味着具有更大的作用半径, 更强的抗干扰能力和更好的通信质量等优点. 作为毫米波发射系统的关键部件—功率放大器, 其输出功率的大小直接决定了发射机的作用距离、抗干扰能力及通信质量.

近几十年来, 随着半导体工艺水平的不断提高, 采用 GaAs 材料的毫米波单片集成电路 (MMIC) 被广泛用于卫星通信, 相控阵雷达, 电子对抗和其它要求小型化的机载应用系统之中. 鉴于大功率的 MMIC 功率单片较难购买到, 而国内由于诸多因素目前在 Ka 频段还无法提供较大功率的 MMIC 功率单片, 这在相当程度上影响到我国在此领域的开发.

因此, 只有以小功率 MMIC 单片作为单元电路, 运用功率合成技术来获取毫米波系统所需的大功率电平<sup>[1]</sup>.

目前, 应用最多的功率合成技术是电路合成和空间功率合成<sup>[2]</sup>. 电路合成由于传输线损耗以及电路面积随器件数量增加成非线性增长, 从而其能够合成的固态器件数目受到限制, 不能满足毫米波雷达的发射功率要求. 空间功率合成最大的优点是合成效率基本与固态器件数量无关, 更适合多器件的大功率输出. 本文提出了一种宽带高效并且对称性好, 结构简单的毫米波功率合成器. 该功率合成器在 30 ~ 36GHz 的频率范围内能得到大于 9W 的输出功率, 最大合成效率为 94.2%.

### 1 空间功率合成网络的设计

空间功率合成技术是八十年代提出的一种功率合成技术. 尽管这门技术是在八十年代初提出的, 但

收稿日期: 2007-10-15, 修回日期: 2008-06-25

Received date: 2007-10-15, revised date: 2008-06-25

作者简介: 赵晨曦 (1981-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要研究方向是微波毫米波电路.

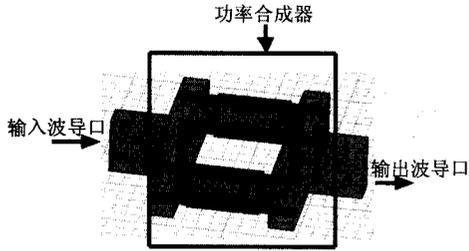


图1 功率合成器模型图  
Fig.1 The model of the combining circuit

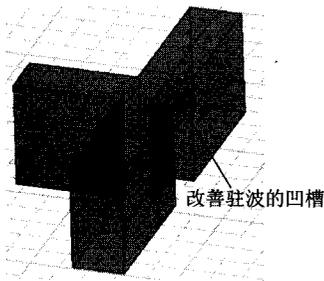


图2 改进后的T型结  
Fig.2 Improved T-junction structure

它真正被人们所重视和加以广泛研究却是在八十年代后期和九十年代. 空间功率合成放大器又大致可分为准光学空间功率合成放大器<sup>[3]</sup>和波导内空间功率合成放大器<sup>[4]</sup>.

本文提出的空间功率合成器结构不同于上面提到的传统的两种合成结构. 该合成器是以T型结和微带双探针结构<sup>[5]</sup>为基础的. 在图1中给出了 $2 \times 2$ 路功率合成器的模型图.

从图1可以看出该电路由以下几部分组成. 第一部分是一个T型结(如图2所示). 由它来实现输入功率的二等分. T型结部分还包括一个凹槽. 此凹槽的作用是用于改善输入端口的驻波. 其长度和宽度可以通过电磁仿真软件很快捷地模拟出来. 第二部分是改进的双探针结构(如图3所示). 将原来的位于同一平面上分处波导两边的探针改为面对面位于上下两层处于波导同一边的结构. 这样改进以后避免了合成时的微带拐弯从而减小了损耗, 并且大大地缩小了体积, 实现了小型化. T型结的两臂各加入一个改进后的双探针结构, 这样组合起来就可以实现输入功率的四等分了.

## 2 仿真及测试结果

电路制作在厚度为0.254mm, 相对介电常数  $\epsilon_r = 2.22$  的 RT Duroid5880 基片上. 应用 Ansoft 公司

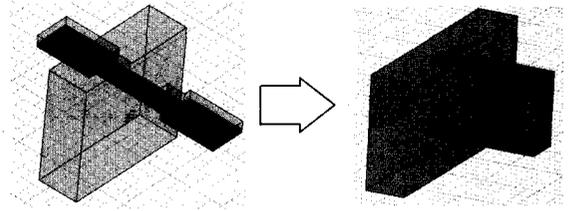


图3 双探针结构的变形  
Fig.3 Improved double-probe structure

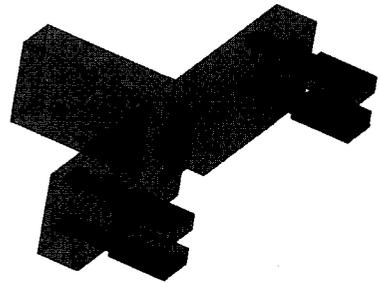


图4 功分网络模型图  
Fig.4 The model of power divider circuit

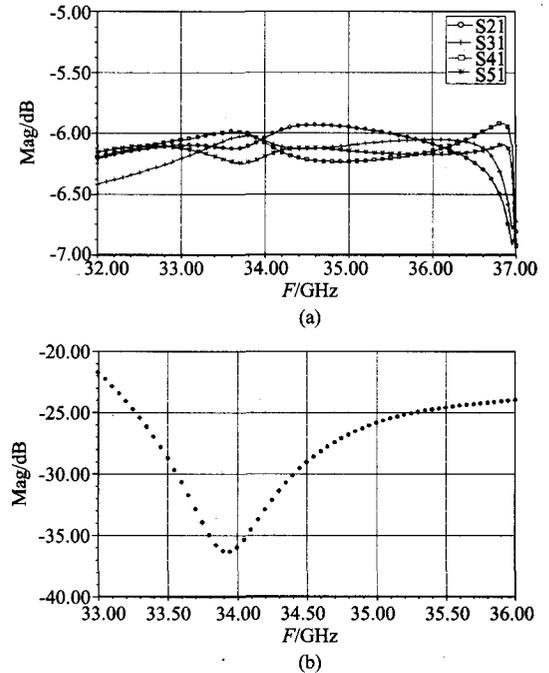


图5 (a) 四路功分幅度情况 (b) 回波损耗仿真结果  
Fig.5 Simulation results for four-way dividing circuit part (a) power division (b) return loss

的 HFSS 软件对整个功率合成器无源功分网络进行了电磁场仿真模拟, 通过合理改变电路尺寸以消除不连续性对电路性能的影响, 从而得到优化的结果. 由于电路结构固有的对称性, 仅需优化  $S(1, 1)$ , 即使1端口回波损耗最小就可达到目的. 仿真时所有的导电材料, 包括波导壁微带线以及接地面都视为

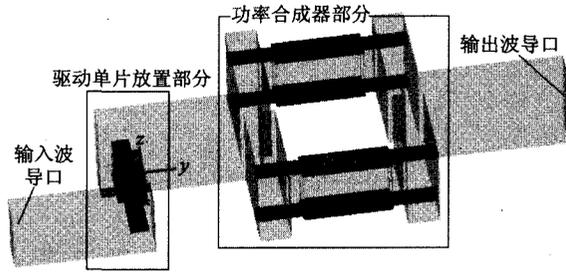


图6 整体模型图  
Fig.6 Structure of the whole model

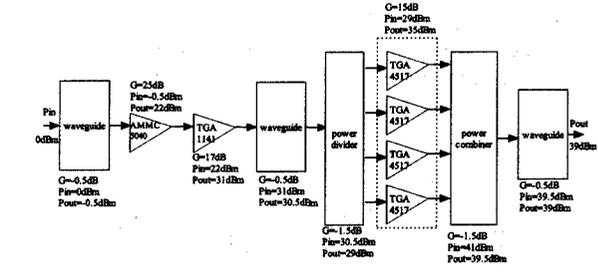


图8 各级增益指标分配  
Fig.8 The assignment of the gain



图7 无源网络测试曲线  
Fig.7 Measurement of the back-to-back combiner

所以该功分合成网络的损耗大约就为 1dB 左右. 达到了设计的要求. 但同时从测试曲线图中仔细分析可以看出, 在 30.4 ~ 34.8GHz 范围内插入损耗是小于 2.1dB 的, 在 28.8 ~ 30.4GHz, 34.8 ~ 35.2GHz 和 36.8 ~ 37.8GHz 这三段区间内插入损耗曲线呈一个漏斗状并且都是 > 2.1dB 的, 这表明在这些区间插入损耗是偏大的. 分析造成这种现象的原因可能是因为在功率分配合成器部分为了放置大功率单片, 腔体部分有所扩大, 从而引起了轻微的谐振现象, 导致插入损耗增大. 在接下来的工作中可以使用仿真软件进行多次仿真和优化, 从而得出更加好的结果.

### 3 毫米波空间功率合成放大器的实现

在以上功率分配合成网络的基础上, 我们做出了四路功率放大合成电路, 以分析该功率分配合成网络的性能. 高增益放大器选用的是 Agilent 公司的 HMMC5040, 驱动放大器选用的是 TRIQUINT 公司的 TGA1141-EPU, 功率合成器部分使用的高输出功率单片也为 TRIQUINT 公司的产品 TGA4517-EPU. 各级的指标分配如图 8 所示. 为了实现功放的小型化, 将直流馈电电路放在了该功放模块上下两层的背部. 考虑到 TGA4517-EPU 单片工作时的电流较大, 采取了每一块 TGA4517-EPU 单片分别用一个可提供较大电流的稳压块 LM338 带动的办法. 这样可以大大简化直流馈电电路.

同样利用 Agilent 公司生产的矢量网络分析仪 E8363B 进行小信号增益测试. 在进行测试时需要在合成器输出端添加一个 20dB 的衰减器, 避免输出功率过大损坏测试仪器. 测试结果如图 9 所示.

从图 9 中可以看出, 在 30.5 ~ 37.5GHz 的范围内, 小信号增益都是 > 49dB 的. 但是同时从曲线可以看出, 增益平坦度不是很好, 在 33 ~ 36GHz 范围内有一定的不平衡度. 对比无源测试曲线分析,

理想导体, 并假设波导端口边界上只存在  $TE_{10}$  模. 经过对上述关键参数的优化,  $2 \times 2$  功分模型进行了仿真(结构如图 4 所示). 仿真结果如图 5 所示. 从仿真结果可以看出, 由于该功率合成器具有良好的对称结构, 所以在 33 ~ 36GHz 范围内四路的功分幅度较好, 为  $-6 \pm 0.2$  dB (如图 5(a) 所示), 基本上达到了理想的四等分状况, 回波损耗也优于 20dB (如图 5(b) 所示).

为了验证仿真结果, 对该结构进行了加工及测试. 考虑到在接下的功率放大器制作中需要推动大功率的 MMIC 单片, 将放置驱动单片的电路和此功率合成器制作在了一起. 其整体的模型如图 6 所示.

用 Agilent 公司生产的矢量网络分析仪 E8363B 对此无源结构进行了测试, 实测结果如图 7 所示. 在 30 ~ 36GHz 范围内, 回波损耗优于 10dB, 插入损耗 < 2.8dB. 在这 2.8 dB 的插入损耗内包括了长度为 45mm 的微带线损耗, 驱动部分两个微带-波导的过渡结构损耗, 以及功分合成网络的损耗. 长度为 45mm 的微带线部分的损耗加上驱动部分两个微带-波导的过渡结构的损耗大约为 1.5dB 左右,

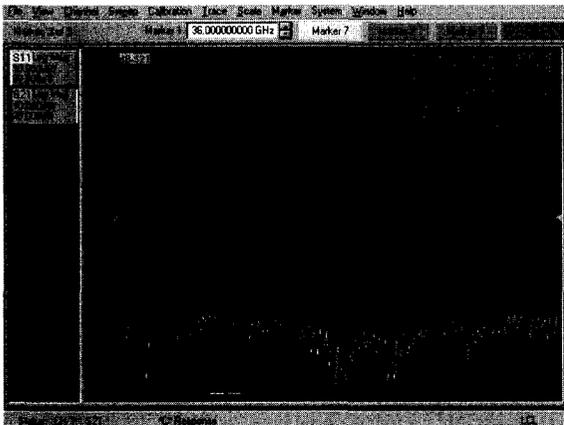


图9 小信号增益测试曲线

Fig. 9 Measurement of small-signal gain

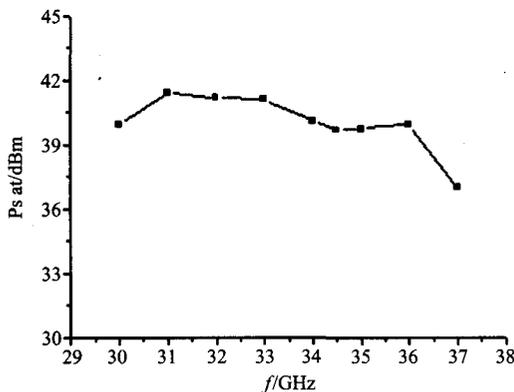


图10 输出功率与频率的关系

Fig. 10 Output power versus frequency

造成这种现象的原因可能是因为在 33 ~ 36GHz 范围内的插损曲线并不平坦,从无源测试曲线上可以看出有几段频率范围内存在着轻微的谐振现象.所以到达放大器的信号就有一定的不平衡度,经放大器放大以后就造成了小信号增益曲线有的不平衡现象.

本实验采用 Angilent 公司生产的 N1912A 功率计测试饱和输出功率.测试结果如图 10 所示.

从图 9 可以看出该功率合成器在 30 ~ 36GHz 的频率范围内,在 0.85dB 的增益波动下能得到 > 9W 的输出功率并且在 31 ~ 34GHz 范围内输出功率是 > 10W 的.在 31GHz 处该功率合成器具有最大的输出功率 13.8W.

由合成效率计算公式我们计算出各个频点合成效率如表 1 所列

$$\eta = \frac{\text{放大器实际输出功率}}{\text{各路放大单元功率和}} \times 100\%$$

从以上的测试结果可以看出,在 32 ~ 33GHz 得

表 1 各频点合成效率

Table 1 The combining-efficiency of some frequencies

f(GHz)	32	33	34	34.5	35	36
$P_{\text{单}}(\text{W})$	3.5	4	3.7	3.3	3	2.63
$P_{\text{out}}(\text{W})$	13.2	12.88	10.29	9.33	9.44	9.89
$\eta_{\text{效率}}(\%)$	94.2%	80.5%	70%	70.7%	78.6%	94%

到了高于 80% 的合成效率.但是在 33GHz 和 36GHz 合成效率下降很快.分析其原因是可能是单片在金丝键合时引入的电感效应改变了其相位.而四路放大器装配不一致,使得相位差很大.在 Ka 波段即使 0.1nH 的电感也会引入 22° 的相位差.在相位相差 40° 以后,合成效率会急剧恶化.还有就是对比无源测试曲线可以看出,在 34.8 ~ 35.2GHz, 36.8 ~ 37.8GHz 这两段区间内插入损耗较大,使得在这些频段范围内的输出功率减小,从而影响了合成效率.

由于两臂之间隔离度不好,反射回来的功率会在两臂处叠加,从而影响合成效率.可以考虑把两臂的芯片位置错开 90° 微带线的长度.这样反射回来的功率就可以在两臂处抵消,从而提高合成效率.

#### 4 结语

本文所设计的毫米波空间功率合成放大器在 Ka 频段实测输出功率为 10W,带宽为 3GHz,最大合成效率约为 94.2%,其输出功率指标在国内还未见报道.对毫米波频段的中大功率放大器来说,该功率合成器将会是一种具有很强竞争力的实际结构,其优越的工作性能预示了其在高效率、宽频带毫米波功放中将会具有良好的应用前景.

#### REFERENCES

- [1] XIE Xiao-Qiang, LIN Wei-Gan, XU Rui-Min. New-style millimeter wave power combining circuit [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢小强, 林为干, 徐锐敏. 一种新型的毫米波功率合成电路. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 25—28.
- [2] CHEN Chang-Ming, XU Jun, YU Meng-Xia, et al. Study on a 6W millimeter-wave solid-state integrated power-combining amplifier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈昌明, 徐军, 喻梦霞, 等. 毫米波 6W 固态集成功率合成放大器研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(1): 35—37.
- [3] Lothar wandinger, Vahakn nalbandian. Millimeter-wave power combiner using quasi-optical techniques [J]. *Trans. Microwave Theory Tech.*, 1982, 19: 793—801.
- [4] Alexanian A, York R A. Broadband spatially combined amplifier array using tapered slot transitions in waveguide [J]. *IEEE. Microwave and Guided Wave Letters*, 1997, 7(2): 42—44.
- [5] Vessen Vassilev, Victor Belitsky, Denis Irbain. A new 3-dB power divider for millimeter-wavelengths [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components*, 2001, 11: 30—32.