

文章编号:1001-9014(2006)01-0025-04

一种新型的毫米波功率合成电路

谢小强, 林为干, 徐锐敏

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:针对毫米波功率合成技术研究, 吸取传统 Wilkinson 电桥的优点, 提出了一种新型低损耗毫米波微带集成 3dB 电桥, 其成本低、加工制作容易、在 32GHz~37GHz, 插损为 0.2dB; 以此 3dB 电桥为基础的 Ka 频段功率合成网络, 在频率 33~35GHz, 合成效率达 75%。

关键词:毫米波; 功率合成; 微带集成 3dB 电桥; 效率

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A

NEW-STYLE MILLIMETER WAVE POWER COMBINING CIRCUIT

XIE Xiao-Qiang, LIN Wei-Gan, XU Rui-Min

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

Abstract: For researching millimeter wave power combining technique, a new style low loss millimeter wave microstrip integrated 3dB hybrid, extracting advantages from traditional Wilkinson hybrid, was proposed. It is easily fabricated and with low cost, and its insert loss is about 0.2dB in 32GHz~37GHz. Based on this new style 3dB hybrid, a Ka-band power combining network was presented, and in 33~35GHz frequency band, the combining efficiency about 75% was obtained.

Key words: millimeter wave; power combining; microstrip integrated 3dB hybrid; efficiency

引言

提高毫米波固态电路输出功率一直是个热门话题, 采用的基本技术就是功率合成技术, 即通过组合若干个相干工作单元, 或者通过叠加多个分离电路功率的方法, 获取更大的输出功率。经过近 40 年的发展, 毫米波功率合成技术大致可以划分为 4 类: 芯片级合成、电路合成、空间合成、以及多级合成的方法^[1]。

毫米波单片集成电路(MIMIC)的广泛应用降低了毫米波集成电路制作的难度与成本, 以毫米波单片功率放大器为放大单元, 3dB 电桥为基本合成构架的多级二进制功率合成(图 1)技术得到迅速发展^[1]。图 2 所示为 3dB 电桥功率合成基本单元电路。文献[2]对影响合成电路性能进行了详细的分析。合成信号在相位和幅度上的不平衡对合成效率的影响可由下式表达:

$$\eta_c = \frac{1 + 10^{D/10} + 2\cos\theta \times 10^{D/20}}{2(1 + 10^{D/10})} \quad (1)$$

式中, D 为两路信号的幅度差 (dB), θ 为两路信号的相位差 (度)。合成效率 η_c 与合成网络损耗 L 和合成级数 N 的关系为:

$$\eta_c = L^{-N} \quad (2)$$

可见, 仅计合成信号不平衡的影响, 在相差 30° 以内, 功率差小于 3dB 时, 可以达到较高的合成效率(90%以上)。仅计损耗的影响, 对单级合成, 要达到 90% 的效率, 损耗不能高于 0.5dB; 多级合成时,

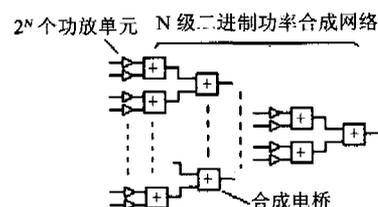


图 1 N 级二进制功率合成网络
Fig. 1 An N-Stages binary power combining network

收稿日期: 2005-04-30, 修回日期: 2005-10-15

基金项目: 预研基金资助项目(51408040203DZ02)。

作者简介: 谢小强(1972-), 男, 四川安县人, 电子科技大学博士生, 主要研究方向: 微波毫米波集成电路, 毫米波功率合成技术。

Received date: 2005-04-30, revised date: 2005-10-15

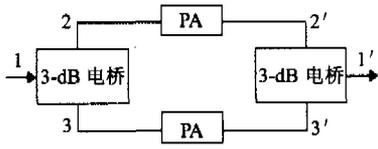


图2 3dB电桥功率分配-合成基本单元
Fig.2 A 3dB hybrid power dividing-combining basic unit

要达到80%的合成效率,当单级损耗为0.3dB时,合成级数不能超过3级,而当单级损耗为0.2dB时,合成级数 N 可以高到5级.因此,在功率合成电路中合成网络损耗与合成信号不平衡度均是影响功率合成效率的关键因素,其中损耗的影响最为主要.若放大单元采用同一批次的功率MMIC,要达到较高的合成效率,设计出低损耗的合成网络是非常关键的.

基于毫米波固态功率合成技术研究,本文首先提出了一种新型Ka频段低损耗3dB微带集成电桥,并对以此电桥为基本构架的毫米波功率合成网络进行了详细讨论.

1 功率合成用3dB电桥选取

毫米波集成电路可采用的电桥^[3]主要有:环形电桥(rat-race hybrid)、Wilkinson电桥(功分器)、Lange电桥等.分支线电桥只能用于低频率情况,当工作频率较高,微带线宽和工作波长处于同一数量级时,其性能会很差.Lange电桥中,要获得3dB的耦合度,耦合微带间的间隔非常的小,要求较高的制作加工精度.环形电桥、分支线电桥和Lange电桥都需要在隔离口匹配接地连接,这对微带等平面电路工艺来说极不方便.相对于其他3种电桥,Wilkinson电桥电路结构更简单(图3),隔离端口无接地要求,电路制作容易;电路中虽然采用了四分之一波长线,但传输信号在幅度和相位上平衡主要依靠电路结构固有的对称性来满足,因而带宽较宽,较容易满足功率合成时信号平衡度的要求.因此以Wilkinson电桥为基本合成单元的多级功率合成、分配网络,具有结构紧凑、平衡性好、带宽宽、集成度高的优良性能,广泛应用于功率MMIC中,以提高单器件的输出功率,如Triquint公司的TGA1141、TGA4517等.

对于毫米波微带集成电路来说,由于工作波长短,传统微带集成Wilkinson电桥电路实际尺寸相对较大,若仍以传统设计公式死搬硬套,已不能得出有实际价值的结果了.另一方面,对于电桥隔离电阻的实现,若采用一般的厚膜电阻,在毫米波频段性能很差,若采用硬基片(如陶瓷),在基片上制作薄膜电

阻,但这增加了制作工艺的复杂程度和成本.另外,隔离电阻的引入,无疑会带来额外的电路损耗,从而影响合成效率.

在功率合成网络设计中,为达到低损耗,工艺简化,成本低的目的,在选用的3dB电桥保留Wilkinson电桥优点的同时,我们尝试去掉隔离电阻.分析如下.在3dB电桥功率分配-合成网络中(如图2),理想情况下,功率分配时,信号应能够无反射地进入3dB分配电桥1口,由2、3口等分输出,后经功放平衡放大.这里,要求3dB电桥1口输入驻波小,2、3口与功放输入端匹配,以保证能量能顺利传输给功放.功率合成时,经功放放大后的等幅同相信号应能够无反射地输入到3dB合成电桥的2'、3'口,由1'口合成输出.这里,要求3-dB电桥2'、3'口与功放输出端匹配,以保证能量能顺利进入合成电桥,1'口有较小的输出驻波.在以上功率分配-合成网络中,若采用传统Wilkinson电桥,由于Wilkinson电桥固有的对称结构,通过电桥分路的信号无论在幅度还是相位上,总是平衡的,这样电桥的隔离电阻两端电压总是相等而并无电流流过,于是,去掉Wilkinson电桥的隔离电阻后,并不会影响功率分配-合成网络的性能.而且,隔离电阻去掉后,电路制作工艺更加简化,可采用加工方便成本更低的软基片实现.

基于以上分析,我们要设计的3dB电桥可以看作传统Wilkinson电桥去掉隔离电阻后,经优化设计的结果.由于电路中无阻性元件,若忽略微带传输线的损耗,该3dB电桥可看作无损互易三端口网络.设计时按照合成电路输入、输出口驻波最小的要求来进行,反映到网络参数上,为1端口 $S(1,1)$ 为零,由对称性,其 S 参数应满足下式:

$$|S| = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 Ka频段微带集成3dB电桥及功率分配-合成网络设计

我们拟设计的微带集成3dB电桥电路拓扑如图4所示.按式(3)要求,设计目标为port1反射最小, port2与port3对称.在功率合成电路中,电路损耗是一个重要的指标,金属损耗是微带传输线损耗的主要部分.因此,选用Rogers公司RT Duroid5880

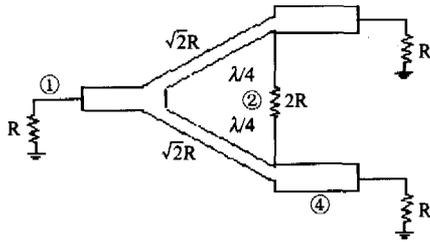


图3 传统 Wilkinson 电桥

Fig. 3 A conventional Wilkinson hybrid

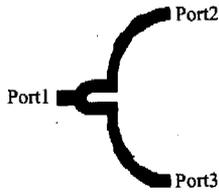


图4 Ka 频段微带集成 3dB 电桥的初始建模

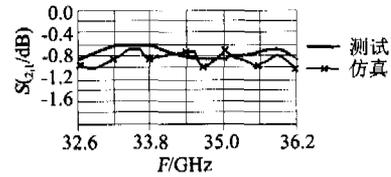
Fig. 4 The initial model of a Ka-band microstrip integrated 3-dB hybrid

基片,介电常数相对较小($\epsilon_r = 2.2$),对相同阻抗的传输线,金属导带更宽,传输线金属损耗越低;同时,在保持端口阻抗为 50 欧姆不变的前提下,尽量加宽金属导带的宽度,对本电路来说,主要是加宽与 Wilkinson 电桥 75 欧姆线相对应的那部分微带传输线的宽度.应用 AGILENT 公司 EESOF 工具 ADS MOMENTUM 对整个 3dB 电桥进行电磁场仿真模拟,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.

根据优化结果设计出了背靠背 BJ320 波导接口 3dB 功率分配-合成网络,波导-微带过渡采用 E-面探针结构.图 5 一并给出了测试结果与仿真结果,结果中均计入了两个波导-微带转换的损耗(计 0.5 dB)和两电桥间的一段长约 10mm 的微带传输线的损耗(约 0.1dB).经比较,二者具有较好的一致性.据此,实际背靠背 3-dB 功率分配、合成网络在 32GHz ~ 37GHz 频率范围内损耗约为 0.4dB,单个 3dB 三端口网络损耗为 0.2dB.据笔者所知,对于 Ka 频段采用微带集成方式实现的 3dB 电桥而言,该电桥已达当前最高水平了^[4,5].

3 Ka 频段固态功率放大合成

在以上功率分配-合成网络的基础上,我们做出了两路功率放大合成电路,以分析该功率分配-合成

图5 仿真结果与测试结果比较; $S(2,1)$,均计入了两个波导-微带过渡损耗Fig. 5 The measured $S(2,1)$ compared with the simulated, including loss of two waveguide-to-microstrip transitions

网络的性能.放大单元采用 Agilent 公司的中功率单片集成放大器 HMMC5040.同时,为使两放大支路上器件与微带线连接处等不连续性引起的反射回波在 3dB 电桥处反相抵消,以进一步提高整个网络端口驻波性能,放大芯片的安装位置相互错开 90° ,如图 6 所示.

最后,我们利用功率计对整个电路的输出功率进行了测试,以分析合成效率.对两路功率放大合成电路,合成效率 η_c 应计算为:

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{2 \times P_s} \quad (4)$$

式中, P_s 为单支路输出饱和功率, P_{out} 为实测功率放大合成网络饱和功率.由于无法预知单支路具体输出功率大小,我们依据厂家资料给出的单器件饱和输出功率进行粗略地估算,最后在 33 ~ 35GHz 范围内,得出合成效率 η_c 大约 75% (图 7).

由前述分析,单个 3-dB 三口网络与的损耗约为 0.2dB,再加上波导-微带转换的损耗 0.25dB,合成时,电路损耗约为 0.45dB,它引起的合成效率约为 90%.当然,按产品手册给出的芯片饱和输出功率来计算合成效率,并未计如微带键合等电路加工、安装因素的影响;对毫米波功率合成电路来说,电路的加工工艺是引起合成效率降低的一个重要因素.同时,

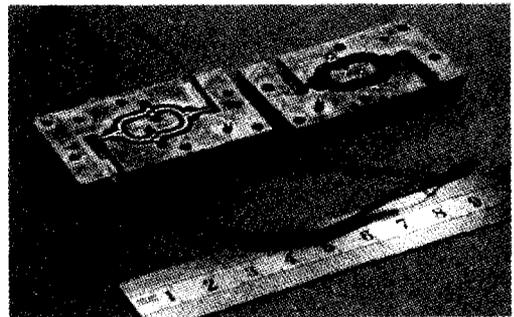


图6 两路功率合成放大器的实物照(放大单元为 HMMC5040)

Fig. 6 The photograph of a two-way power combining amplifier (the amplifying unit is HMMC5040)

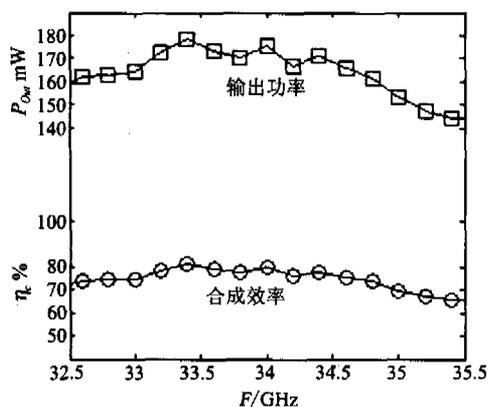


图7 输出功率 P_{out} 与合成效率 η_c

Fig. 7 The output power P_{out} and the combining efficiency η_c

合成信号不平衡程度也会引起功率合成效率降低. 两个 MMIC 本身 S 参数的不一致, 再加上电路加工、安装等过程带来不平衡影响, 使得两路信号在幅度和相位上均存在一定差异, 从而合成信号并不是两路信号的简单标量和. 所有这些, 均引起了实测合成效率与理论值的差异. 可以预计, 进一步提高加工工艺等方面的技术水平, 采用此种电桥进行毫米波固态功率放大合成, 可以达到 80% 的合成效率.

4 结语

毫米波集成电路技术实现功率合成, 基本合成

单元是两路电桥合成, 关键技术是制作出低损耗 3dB 合成电桥. 本文描述的毫米波微带集成 3dB 电桥及相应功率合成网络具有低损耗、低成本、设计加工容易等优点, 具有一定实用价值.

以该合成网络为基本构架, 采用更高功率的放大单元, 或采用多级合成框架, 或与其他功率合成方式配合, 均可实现更高毫米波固态功率输出.

REFERENCES

- [1] Kai Chang, Cheng Sun. Millimeter-wave power-combining techniques [J]. *IEEE MTT*, 1983, **31**:91—107.
- [2] Nevarez J R, Herokowitz G J. Output power and loss analysis of 2" injection-locked oscillators combined through an ideal and symmetric hybrid combiner [J]. *IEEE MTT*, 1969, **17**:2—10.
- [3] Stephen A Maas. *Nonlinear microwave and RF circuits* [M], Artech House, 2003: 277—296.
- [4] Daisy L I, Ian Stones, et al. A 6-W Ka-band power model using MMIC power amplifier [J]. *IEEE MTT*, 1997, **45**: 2424—2430.
- [5] Dimitrios Antsos, Rick Crist, Lin Sukanto. A novel wilkinson power divider with performance at K and Ka-band [J]. *IEEE MTT-S Digest*, 1994:907—910.
- [6] CHEN Li-Wei, NIU Xin-Jian, LI Xiao-Yan, et al. Phase rematch on high-power millimeter wave mode converter [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈立伟, 牛新建, 李晓燕, 等. 高功率毫米波模式变换中的相位重匹配, *红外与毫米波学报*) 2004, **23**(1): 51—54.