

文章编号: 1672-2892(2007)06-0414-05

## 一种双频微波功率合成器的设计与实现

张文赋, 刘长军, 吴金国, 赵丽蓉

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 一种新型的双频微波功率合成器, 通过阶跃阻抗低通滤波器和平行耦合线带通滤波器构成的微带电路实现。该微波功率合成器实现了 915 MHz 和 2.5 GHz 两个非相干频率微波信号的功率合成。同时通过附加工作在 915 MHz 和 2.5 GHz 的 20 dB 微带定向耦合器, 就可以构建实验系统进行微波功率合成的测量。实验测量结果与数值模拟结果吻合, 双频微波功率合成器和定向耦合器的性能达到了要求, 可用于注入式微波器件效应的研究。

**关键词:** 微波技术; 功率合成; 滤波器; 定向耦合器

**中图分类号:** TN73

**文献标识码:** A

## Design and Implementation of a Dual Frequency Microwave Power Combiner

ZHANG Wen-fu, LIU Chang-jun, WU Jin-guo, ZHAO Li-rong

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

**Abstract:** A novel dual-frequency microwave power combiner is designed and implemented by the microstrip circuit composed of a stepped-impedance lowpass filter and a parallel-coupled bandpass filter. The power of two microwave irrelevant signals at 915 MHz and 2.5 GHz can be synthesized by the microwave power combiner. At the mean time, a 20 dB microstrip directional coupler that works at both 915 MHz and 2.5 GHz is fabricated to build an experiment system for monitoring the power synthesis. The measured results agree with the simulated results, which verifies the performance of the dual-frequency microwave power combiner and the directional coupler meet the design requirements. They can be applied to the research on radiation effects of microwave components within the power injection system.

**Key words:** microwave technology; power synthesis; filter; directional coupler

### 1 引言

微波功率合成技术已经在微波功率放大器、天线系统和微波测量系统中得到了广泛应用。常用的微波功率合成方式有分支线电桥、环形电桥、Lange 耦合线、传输线变压器和 Wilkinson 功率合成器等。分支线电桥和环形电桥有良好的性能, 但不易调整, 并且在低频段时体积较大; 传输线变压器为非平面结构, 具有良好的带宽特性, 适用于低频段小功率的场合; Wilkinson 功率合成器具有结构简单、损耗低、易于调整和平衡性好的优点, 在微波波段得到广泛应用, 但是 Wilkinson 功率合成器只能用于较窄频段微波功率的合成, 或者限定工作在主频和二次谐波处<sup>[1]</sup>。

微波非相干信号是指两个或者多个相位相互独立变化, 不存在一定关联性的微波信号。一般来讲, 来自两个或两个以上独立信号源的微波信号都是非相干信号。由两个独立信号源产生不同频率的微波信号也是非相干微波信号。在微波器件效应研究中涉及到微波非相干信号对电路的干扰、对微波器件的辐射效应等内容, 需要将两个不同频率的微波信号进行功率合成。在一些交叉学科的研究中, 比如在微波化学领域<sup>[2]</sup>, 也需要进行微波非相干功率合成以考察其对微波化学效应的影响。

收稿日期: 2007-07-10; 修回日期: 2007-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC60301004)

目前,介绍微波非相关功率合成器的文献较少。本文设计了一种基于微带滤波器的电路来实现非相干微波功率合成,对其进行了数值仿真和优化设计,最后进行了实际测量。该功率合成器可以将 915 MHz 和 2.5 GHz 的微波信号进行功率合成,并且具有相对较宽的工作频带,允许两个信号源频率分别在相对带宽 15% 和 10% 的范围内变化。测试结果达到了设计预期目标,本微波功率合成器可用于微波器件效应的实验研究。

## 2 功率合成器原理与设计

本文采用经典的低通和带通滤波器来实现功率合成器。测量系统结构示意图如图 1 所示。915 MHz 和 2.5 GHz 两路信号功率由微波功率合成器合成,然后通过定向耦合器将两路信号以 20 dB 耦合出来,由双通道功率计进行测量。

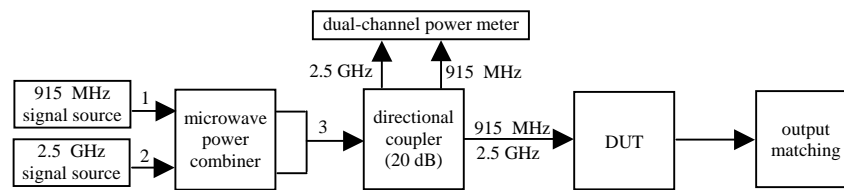


Fig.1 Experimental system  
图 1 测量和实验系统图

### 2.1 阶跃阻抗低通滤波器

由微波理论得到,高特性阻抗的短传输线等效为串联电感,低特性阻抗的短传输线等效为并联电容<sup>[3]</sup>。因此,本文选用交替串联高特性阻抗和低特性阻抗传输线来实现 L-C 电路,形成阶跃阻抗低通滤波器。微带线的特性阻抗和长度依赖于原型滤波器中电感和电容的数值。本文采用 3 阶高低阻抗变换低通滤波器,截止频率在 1.2 GHz;选用 0.5 dB 波纹的契比雪夫原型滤波器,功率源和负载阻抗为 50  $\Omega$ 。

设计阶跃阻抗低通滤波器需要注意:a) 满足条件  $Z_{0C} \ll Z_0 \ll Z_{0L}$ 。 $Z_{0C}$  和  $Z_{0L}$  表示相应的低阻抗和高阻抗微带线的特性阻抗, $Z_0$  是系统特性阻抗 50  $\Omega$ ;b)  $Z_{0C}$  越小,近似的电容集中参数特性越好,但是在工作频率处,低阻抗线宽可能引起横向谐振,产生其他模式;c)  $Z_{0L}$  越高,近似的电感集中参数特性越好,但是  $Z_{0L}$  取太高,则微带线太细,不但加工误差大,而且会成为大功率合成的瓶颈<sup>[4]</sup>。本文中低特性阻抗和高特性阻抗分别为 15  $\Omega$  和 80  $\Omega$ 。

### 2.2 平行耦合带通滤波器

平行耦合结构的长度只有半波终端耦合结构的一半,相对于半波终端耦合和发夹型结构<sup>[5]</sup>,它提供了比较大的耦合部分,且耦合缝较宽。在设计中,平行耦合微带线可以方便地根据要求选择合适原型参量,频带范围也较宽。本文选用 3 阶的平行耦合带通滤波器,中心频率在 2.5 GHz,带宽为 15%。设计公式如下:

$$J_{i,i+1} = \frac{1}{Z_0} \frac{\pi BW}{2\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (1)$$

$$Z_{0o}|_{i,i+1} = Z_0 \left[ 1 - Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2 \right] \quad (2)$$

$$Z_{0e}|_{i,i+1} = Z_0 \left[ 1 + Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2 \right] \quad (3)$$

根据 3 阶滤波器的原型参数  $g$  和设计带宽  $BW$  可以得到参数  $J_{0,1}$ ,  $J_{i,i+1}$  和  $J_{N,N+1}$ , 这些参数可用来计算传输线的奇模、偶模特性阻抗  $Z_{0o}$ ,  $Z_{0e}$  (下标  $o, e$  表示耦合段单元),  $Z_0$  是滤波器输入、输出端口的传输线特性阻抗。设计中介质板选用介电常数为 2.65 的聚四氟乙烯材料,最后根据得到的奇、偶模特性阻抗可以换算得到微带线的实际尺寸。

### 2.3 低通滤波器和带通滤波器间的连接

如图 2 所示,图中 2.5 GHz BPF 输出端口相对于 915 MHz 信号在理想情况下近似为开路。因此为避免 915 MHz

信号串扰到 2.5 GHz 信号源,可以利用  $\lambda_g/2$  传输线阻抗不变特性,在 3 端口到 2.5 GHz BPF 之间连接一根长为  $\lambda_{g915}/2$  (915 MHz 信号的半波长)的微带线。实际设计中,往往要综合考虑滤波器及弯曲的微带线等带来的影响,在 Smith 圆图上调整得到最合适的微带线长度<sup>[6]</sup>。915 MHz LPF 和 3 端口间的传输线设计同理。

### 3 定向耦合器原理与设计

微带平行耦合线的耦合性能较弱,实际应用中常增加各种结构来提高耦合性能和定向性,比如利用波纹状耦合<sup>[7]</sup>,添加集总参数电容<sup>[8]</sup>,覆盖一层电介质<sup>[9]</sup>等方法。本文设计采用一种包含平行耦合微带线和非对称延迟线的微带结构<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.1 设计原理

定向耦合器的理论分析模型如图 3 所示,利用  $l_1, l_2$  (不同长度的延迟线),耦合端  $C_T$  和隔离端  $I_T$  可用以下表达式表示(式中  $C_0, I_0$  代表耦合段的耦合和隔离系数),  $l$  为耦合段长度。

$$C_T \approx 2 \times C_0 e^{-j\beta(l_1+l_2+2l/2)} \times \cos \beta \left( \frac{l_1+l_2+2l}{2} \right) \quad (4)$$

$$I_T \approx 2 \times I_0 e^{-j\beta(l_1-l_2/2)} \times \cos \beta \left( \frac{l_1-l_2}{2} \right) \quad (5)$$

由式(4)和(5)可以得出:当  $l_1+l_2+2l=\lambda$ ,  $l_1-l_2=\lambda/2$  时,可以得到一个端口 3 为耦合端,端口 4 为隔离端的定向耦合器。这种耦合器的优点是:设计准确方便,具有高定向性与高隔离度,带宽和定向性可以通过级联多级的非对称延迟线调整。图 4 为一个 20dB 耦合器的结构设计。

#### 3.2 设计结果

耦合器设计仿真结果如图 5(a)所示,测试结果如图 5(b)所示。仿真与测试结果说明该耦合器的插入损耗小于 0.07 dB。可能由于加工过程产生误差,915 MHz 与 2.5 GHz 信号的耦合度的实测结果分别为:18.1 dB 和 18.8 dB,都比仿真结果 20 dB 略有下降。

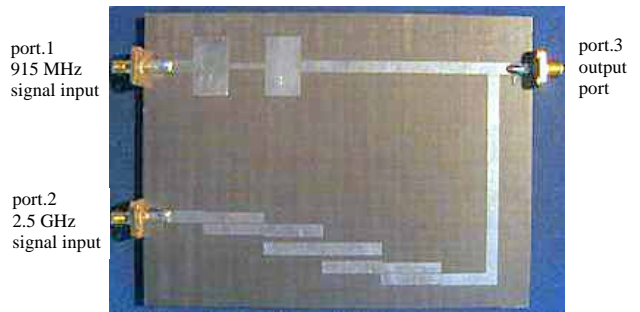


Fig.2 Microwave power combiner design  
图 2 微波功率合成器

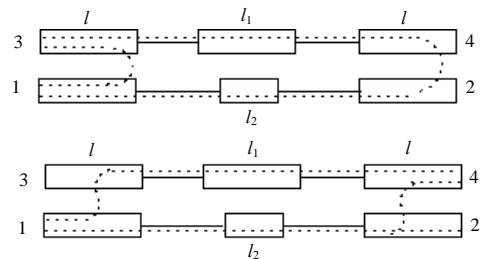


Fig.3 Analysis of the directional coupler circuit  
图 3 定向耦合器分析方法

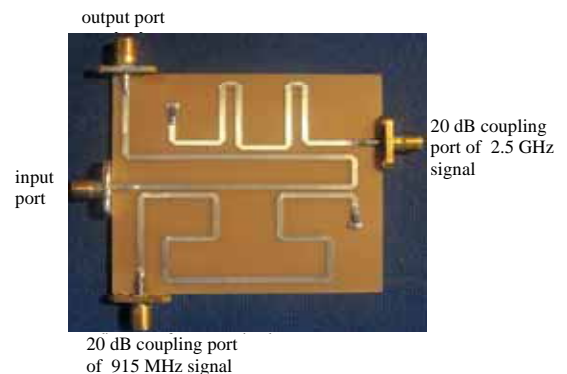
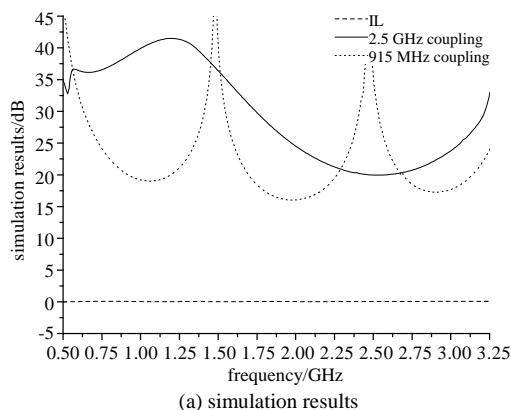
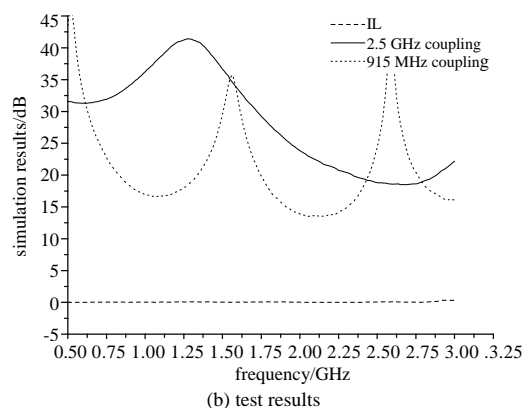


Fig.4 Directional coupler design  
图 4 定向耦合器设计



(a) simulation results



(b) test results

Fig.5 Simulation and test results of directional coupler

图 5 定向耦合器仿真和测试结果

## 4 仿真与测试

微波功率合成器利用高频分析软件仿真结果如图 6(a)所示,利用安捷伦微波矢量网络分析仪 E8263B 测试结果如图 6(b)所示。

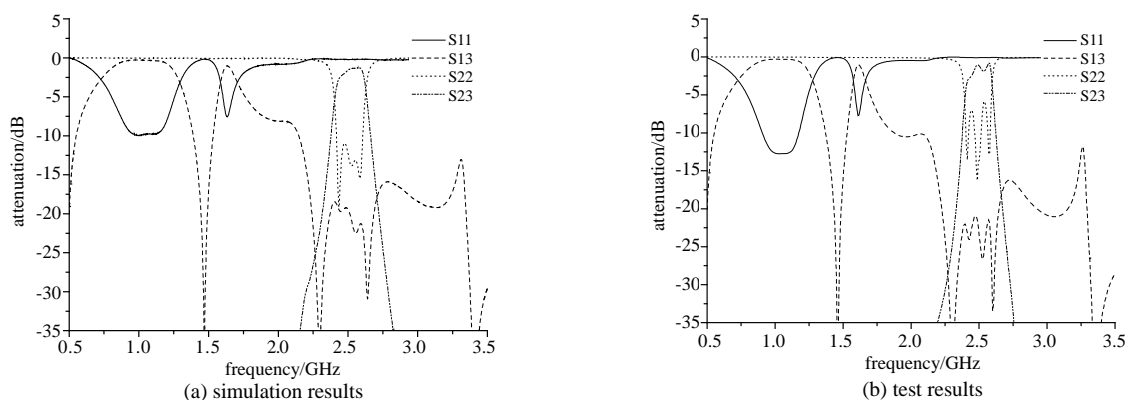


Fig.6 Simulation and test results of power combiner

图 6 功率合成器仿真和测试结果

测试数据如表 1 所示,实测结果与仿真吻合很好。两端口间良好的隔离保证了两端口间不会互相串扰。由实测结果计算得到功率合成器的插入损耗对于 915 MHz 信号时为 0.5 dB,对于 2.5 GHz 信号为 0.05 dB。

功率合成器的功率实验采用两个 915 MHz、2.5 GHz 的大功率微波功率源,功率测试结果如表 2 所示。

表 1 仿真与测试结果

Table1 Simulation and test results

S parameters	$S_{11}$ /dB (915 MHz)	$S_{22}$ /dB (2.5 GHz)	$S_{13}$ /dB (915 MHz)	$S_{23}$ /dB (2.5 GHz)
simulation results	-10.67	-13.64	-0.44	-1.06
measured results	-9.05	-12.33	-0.36	-1.60

表 2 测试结果

Table2 Test results

test number : i	input power of 915 MHz/ dBmW	input power of 2.5 GHz/ dBmW	output power of 915 MHz/ dBmW	output power of 2.5 GHz/ dBmW
1	32.6	29.2	31.7	27.8
2	36.4	32.1	35.6	30.5
3	27.1	34.1	26.3	32.4
4	32.6	37.2	31.7	35.5

从测试结果来看,合成器对于 915 MHz 信号的损耗小于 1 dB,对于 2.5 GHz 信号的损耗达到 1.5 dB,说明用滤波器实现功率合成是可行的。由于损耗的主要来源是滤波器的插入损耗,所以工作在 2.5 GHz 的平行耦合微带滤波器的插入损耗要明显大于 915 MHz 信号。

## 5 结论

本文设计了一个工作在 915 MHz 和 2.5 GHz 的双频微波非相干频率功率合成器,并设计了一个工作在双频的 20 dB 定向耦合器。设计采用微带电路实现,方法简单,加工方便,实验结果和设计吻合,工作稳定可靠,可应用于注入式微波器件效应的实验系统中。

参考文献:

- [1] Wu L,Yilmaz H,Bitzer T,et al. A Dual-Frequency Wilkinson Power Divider For a Frequency and Its First Harmonic[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005,15(2):107-109.
- [2] 钟淑蓉,刘长军,许小玲. 矩形波导中试管对液体柱散射特性的影响[J]. 信息与电子工程, 2006,4(1):10-13.
- [3] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍. 射频通信电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [4] 邓 哲,程崇虎,吕文俊,等. 微带发夹型谐振器滤波器得实验研究[J]. 微波学报, 2005,21(21):122-126.

(下转第 423 页)

## 参考文献:

- [1] 李淑萍. 雷达信号模拟器杂波的设计与实现[J]. 舰船电子对抗, 2005,32(3):14-19.
- [2] HY57V561620H(L)T 4 Banks  $\times$  4M  $\times$  16Bit Synchronous DRAM[Z]. 1999.
- [3] Tom Shanley Don Anderson. PCI 系统结构[M]. 4 版. 刘 晖,冀然然,夏意军,译. 北京:电子工业出版社, 2000.
- [4] PLXTechnology Inc. PCI9054 DataBook[Z]. 1998.
- [5] SUMSUNG Electronics Rev. DEVICE OPERATIONS-CMOS SDRAM[Z]. 1999.
- [6] 武安河,邵 铭,于洪涛. Windows 2000/ X PWD 设备驱动程序开发[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [7] 郑新春,冯小平. 脉冲压缩雷达地杂波模拟与系统实现[J]. 雷达与对抗,2005,(1):21-25.

## 作者简介:



张 辉(1982-),男,陕西省商洛市人,2005 年毕业于西安电子科技大学机电一体化专业,现为在读硕士研究生,主要研究方向为高速实时信号处理. E-mail: zhanghui243@126.com.

刘 峥(1964-),男,西安市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为高速实时信号处理.

## (上接第 417 页)

- [5] Alan Podell. A High Directivity Microstrip Coupler Technique[J]. IEEE Symposium Digest G-MTT International, 1970,70 (1):33-36.
- [6] Michael Dydyk. Microstrip directional Couplers with Ideal Performance via Single-Element Compensation[J]. IEEE Trans. on MTT, 1999,47(6):956-964.
- [7] Klein J L,Chang K. Optimum dielectric overlay thickness for equal even- and odd-mode phase velocities in coupled microstrip circuits[J]. Electronic Letters, 1990,26(5):274-276.
- [8] Chun Y H, Moon J Y,Yun S W,et al. Microstrip line directional couplers with high directivity[J]. Electronics Letters, 2004, 40(5):317-318.
- [9] Chun Young Hoon,Moon Ju Young,Yun Sang Won,et al. A Novel Microstrip Line Backward Directional Coupler with High Directivity[J]. IEEE MTT-S Digest, 2004,3:1891-1894.
- [10] Hong Jia Sheng,Lancaster M J.Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. New York:John Wiley & Sons.Inc., 2001.
- [11] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. RF Circuit Design Theory and Applications[M]. 北京:科学出版社, 2002.

## 作者简介:



张文赋(1983-),男,福州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波电路设计. E-mail: dickdick@163.com.

刘长军(1973-),男,河北省邢台市人,博士,教授,主要研究方向为电磁场与微波技术.

吴金国(1979-),男,湖北省荆州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波电路设计.

赵丽蓉(1983-),女,四川省绵阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波电路设计.