

## 一种 VHF 频段高性能定向耦合器的设计与实现

胡桐宁<sup>1</sup>, 李 冬<sup>2</sup>, 杨 军<sup>2</sup>, 余调琴<sup>2</sup>

(1 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074; 2 华中科技大学 电气学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 设计了一种用于功率检测和获取的无源器件——定向耦合器。首先利用传输线耦合器与集总参数耦合器的等效性, 分析得出了集总参数耦合器各个元件参数与性能指标的理论公式。再针对甚高频(VHF)频段, 传输线耦合器一般无法做到结构紧凑, 而集总参数元件传输功率的限制等问题, 同时考虑到弱耦合以及高定向性的设计要求, 提出了微带线电感与集总参数相结合的解决方案, 并设计出定向耦合器的模型。然后, 结合在研 RF 系统 100 MHz 中心频率、300 W 传输功率的实际需求为例, 验证了耦合器模型的正确性, 并利用 ADS 软件对其做出了原理图和矩量法仿真。最后给出了制版后实际测量的性能曲线, 并对测试结果做出了分析。

**关键词:** 定向耦合器; 无源器件; 功率检测; 微带线; 集总参数

**中图分类号:** TM934.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2011)06-0180-04

## Design and Realization of a High-performance Directional Coupler at VHF Bands

HU Tong-ning<sup>1</sup>, LI Dong<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>, YU Tiao-qin<sup>2</sup>

(1 Department of Electronic and Information Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2 Department of Electronic and Information Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper designs a kind of passive device - directional coupler used for power detection and extraction. At first, analyses and obtains the theory formulas contacting each component and performance target, by using the equivalent of transmission line (TL) couplers and lumped element (LE) couplers. Then for the high frequency (VHF) bands, TL couplers are hard to carry out to be tight structures, and lumped elements have the limits of transmission power, considering the design targets of loose coupling and high directionality as well, this paper proposes a solution method consisting of lumped elements and microstrip inductors, and designs a coupler model. Furthermore, according to the real requests as 100 MHz centre frequency and 300 W transmission power of the developed RF system, the validation of model correctness is given, and the schematic and momentum simulation are implemented by ADS software in this paper. The measured performance curves of real circuit and measured results analysis are presented at last.

**Key words:** directional coupler; passive device; power detect; microstrip; lump elements

### 1 引言

自 1922 年首个定向耦合器问世以来, 由四分之一波长传输线组成的各种定向耦合器就应用于很多 RF 系统中。其中微带线耦合器因其结构紧凑, 故使

用较为广泛, 但由于微带线型结构的不均匀性导致奇偶模相速度不相等, 故在弱耦合时很难达到方向性的设计要求<sup>[1-2]</sup>。一般采用在微带线中间添加电容或电感补偿<sup>[3-6]</sup>的方法来改善, 但是程度有限。

另外, 本文是针对华中科技大学电气学院研发的 CYCHU-10 的 100 MHz RF 系统, 设计相应的

定向耦合器. 而在此甚高频(VHF)频段, 由于波长较长, 微带线型结构尺寸很难达到紧凑型的要求. 而集总参数耦合器相对于传输线电路来说, 有更小的尺寸, 且多层电路板制造工艺发展也使得其更容易实现<sup>[7-8]</sup>.

本文综合考虑了各项性能指标、结构尺寸以及实际应用的要求, 设计并仿真了一种微带线与集总参数相结合的定向耦合器, 最后给出了制版后实际测量的性能曲线, 并与仿真结果做了比较.

## 2 集总参数耦合器的原理设计

### 2.1 理论公式推导

传输线耦合器和集总参数耦合器具有等效性. 利用传输线耦合器的纵向对称性, 将其分为奇模和偶模两种模型并做出分析. 然后对集总参数耦合器做出相应的分析, 再利用等效性, 即可得到元件参数值. 图 1 给出了改良后的集总参数定向耦合器的原理图.

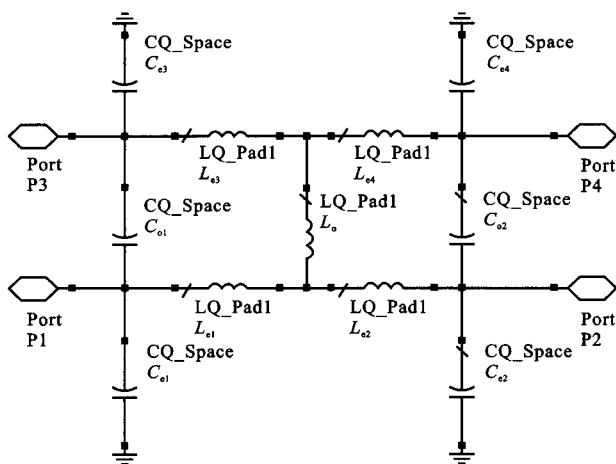


图 1 改良后的 LE 定向耦合器

图 1 中各个元器件满足如下等式:

$$L_{e1} = L_{e2} = L_1/2 = L_2/2 \quad (1)$$

$$C_{e1} = C_{e2} = C_{e3} = C_{e4} \quad (2)$$

$$C_{o1} = C_{o2} = C_o \quad (3)$$

为使得奇偶模相速度相等, 提高方向性, 增加一个电感器  $L_o$ . 另外电容器  $C_o$  保证了集总参数耦合器的后向耦合.

根据偶模等效电路<sup>[9]</sup>, 得到方程组:

$$\begin{cases} j\omega C_e = jY_{oe} \tan \frac{\theta}{2} \\ j\omega C_e + \frac{1}{j\omega L_e} = -jY_{oe} \cotg \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $Y_{oe}$  是偶模特征导纳,  $\theta$  是传输线的有效电长度.

可计算出元件参数值:

$$C_e = \frac{Y_{oe}}{\omega} \tan \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

$$L_e = \frac{1}{2\omega Y_{oe}} \sin \theta \quad (6)$$

同上述分析方法, 可得到奇模等效电路<sup>[9]</sup>时的方程组:

$$\begin{cases} j\omega(C_e + 2C_o) + \frac{1}{j\omega(L_e + L_o)} = jY_{oo} \tan \frac{\theta}{2} \\ j\omega(C_e + 2C_o) + \frac{1}{j\omega L_e} = -jY_{oo} \cotg \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $Y_{oo}$  是奇模特征导纳.

解出:

$$C_o = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\omega^2 L_e} - \frac{Y_{oo}}{\omega} \cotg \frac{\theta}{2} - C_e \right) \quad (8)$$

$$L_o = \frac{1}{\omega^2 (C_e + 2C_o) - \omega Y_{oo} \tan \frac{\theta}{2}} - L_e \quad (9)$$

### 2.2 原理图设计

设计一个适用于 CYCHU-10 的 RF 系统的定向耦合器. 中心频率  $f_c = 100$  MHz, 带宽 1 MHz, 特征阻抗  $Z_0 = 50 \Omega$ , 耦合度  $-30$  dB, 方向性  $-20$  dB. 利用 ADS 计算得到偶模和奇模特征阻抗分别为:  $Z_{oe} = 48.44 \Omega$ ,  $Z_{oo} = 51.61 \Omega$ . 利用式(5)、(6)、(8)和(9), 计算得到元件参数值如表 1 所示.

表 1 LE 定向耦合器的元件参数值

| 元件    | 理论值       |
|-------|-----------|
| $C_e$ | 32.845 pF |
| $L_e$ | 38.569 nH |
| $C_o$ | 1.008 pF  |
| $L_o$ | 590.55 nH |

从图 2 可以看到中心频率 100 MHz 时, 回波损耗  $S(1,1)$  约为  $-64$  dB、耦合度  $S(1,3)$  约为  $-30$

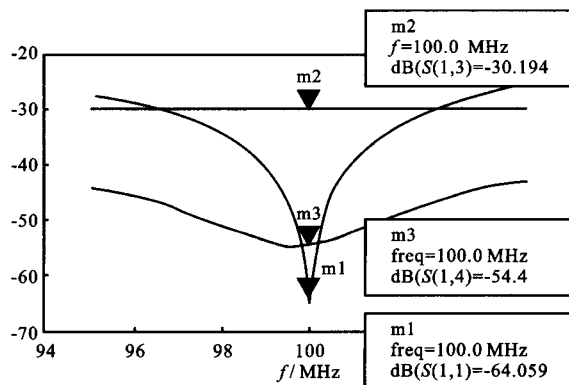


图 2 理论值仿真的 S 参数

dB、隔离度  $S(1,4)$  约为  $-54$  dB, 即方向性  $-24$  dB, 且  $1$  MHz 的带宽内各项性能指标均达到。

### 3 实际应用的定向耦合器设计

#### 3.1 微带线电感的设计

根据实际情况, 应用到 CYCHU-10 的 RF 系统的定向耦合器, 耦合度为  $-20$  dB, 方向性为  $-20$  dB, 需要传输  $300$  W 的功率, 其主路通过的最大电流接近  $2.5$  A, 而目前工作于 VHF 波段的电感几乎没有能达到此电流值要求的。为解决这个问题, 本文采用在多层介质上设计螺旋状微带线电感的方法来替代上节中的集总参数电感元件  $L_e$ 。

图 3 和图 4 分别给出了二层介质上的微带线电感三维视图, 以及电感的仿真值。图 4 中的两条直线分别是电感的理想值  $38.569$  nH, 以及设计值, 中心频率处为  $38.31$  nH。

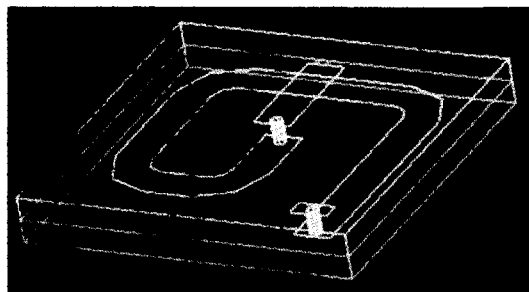


图 3 螺旋状微带线电感

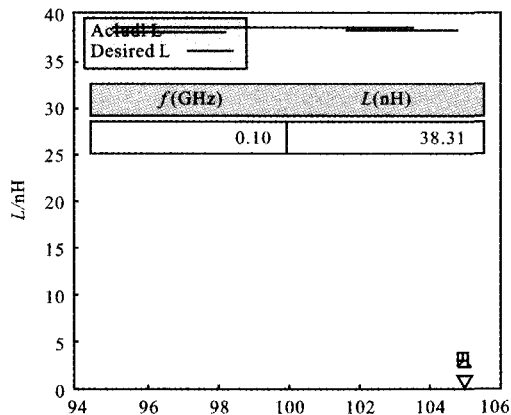


图 4 微带线电感的仿真值

为设计得到最后的版图, 需要将以上微带线电感代入图 1 中的原理图, 并根据电感的仿真值, 对其其他的元件参数值做出相应的调整。

#### 3.2 矩量法电磁仿真

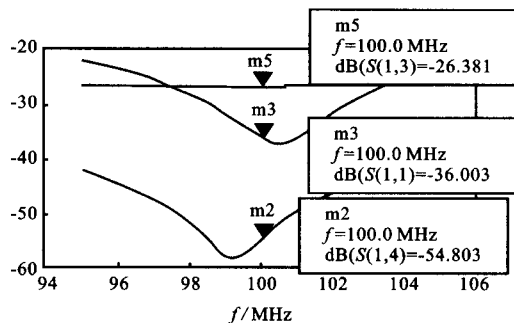
考虑到工作于 VHF 波段的电路板, 其性能受导线及板材等环境影响很大, 故在原理设计完成之后, 制版之前, 必须进行版图的电磁仿真。这里采用 ADS 里的版图与原理图交互仿真, 主要步骤是:

(1) 在版图界面, 考虑到允许通过的最大电流及击穿场强等因素, 选择合适的板材及铜箔微带线宽厚; 需要连接其他集总参数元件处设置内部端口; 用合适的微带线代替理想导线; 考虑好接地过孔等因素, 再对绘制好的版图用矩量法进行电磁仿真。

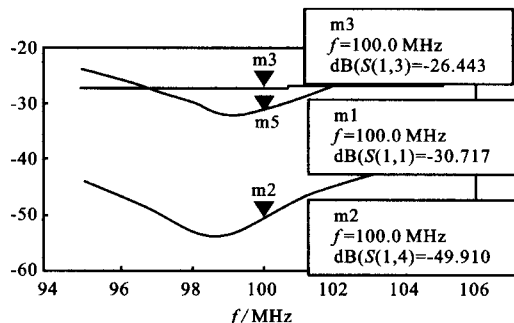
(2) 生成版图元件代入原理图界面, 并连接所有的集总参数元件, 运行仿真。

(3) 根据仿真结果与理想结果的比较, 适当调整版图微带线的结构和集总参数元件的大小, 以求达到设计指标。

以上给出了交互仿真的  $S$  参数曲线。图 5(b) 是在图 5(a) 的基础上考虑了过孔影响的仿真结果。很明显, 在 VHF 频段, 过孔产生的分布参数影响使得  $S$  参数性能变差, 其中回波损耗  $S(1,1)$  和隔离度  $S(1,4)$  改变了约  $-5$  dB。



(a) 未考虑过孔影响的  $S$  参数曲线



(b) 考虑了过孔影响的  $S$  参数曲线

图 5 版图与原理图交互仿真的结果

### 4 制版及测量结果

将设计好的版图制成四层电路板, 板材选用 FR-4, 铜箔表面镀锡, 成品如图 6 所示。

通过图 6 可看到, 制成的微带线与集总参数混合型定向耦合器, 尺寸远小于微带线结构, 且克服了 VHF 频段的一般集总参数元件不能应用于大功率传输的缺点, 同时其结构并不复杂, 较容易实现。

图 7 给出了矢量网络分析仪测量得到的  $S$  参数曲线, 中心频率为  $100$  MHz, 由上至下的三个框图

依次为:回波损耗、耦合度及隔离度.从图中可以看到,性能最优的中心频率向右偏移,但在工作频率 100 MHz 处,回波损耗  $-39.78$  dB、耦合度为  $-23.28$  dB、隔离度为  $-45.10$  dB,即方向性为  $-21.82$  dB.各项性能基本满足设计指标.

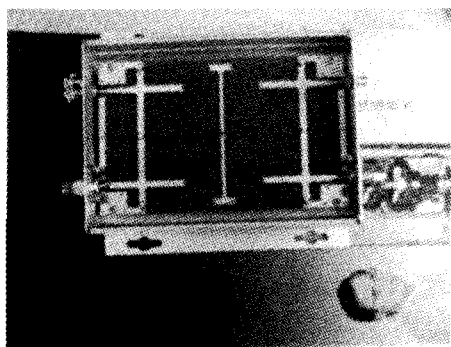


图6 混合型定向耦合器成品

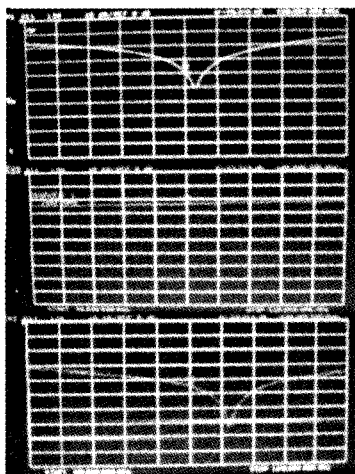


图7 矢量网络分析仪测量的实际 S 参数曲线

## 5 结束语

本文设计了一种工作于 VHF 频段的大功率传输的弱耦合高方向性定向耦合器.其特点是,在利用 TL 耦合器与 LE 耦合器的等效性原理的基础上,综合考虑各项性能指标、结构尺寸以及实际应用的要求,采用了集总参数元件与微带线混合的多层板结构.此结构的主要优点是克服了微带线结构不能同时做到弱耦合及高方向性的弊端,避免了集总参数元件的功率限制,且其尺寸较小、结构简单且适用于大功率传输.

最后设计制成的定向耦合器,测量得到的性能指标基本满足要求.但由于微带线本身的不均匀性、

实际接地与理想地的差异,以及所选购的高频电感电容元件的精度限制等客观原因,使得实际的 S 参数曲线中心频率向右偏移.为解决此问题,可在选用高精度元器件的同时,保证接地的良好.

## 参考文献:

- [1] Andrei Grebennikov. Power Combiners, Impedance Transformers and Directional Couplers[J]. High Frequency Electronics, 2007.
- [2] Rajesh Mongia, Inder Bahl, Prakash Bhartia. RF and Microwave Coupled-Line Circuits[M]. Boston, London: Artech House, 1999.
- [3] Dydyk M. Microstrip directional couplers with ideal performance via single-element compensation[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47(6): 956-964.
- [4] Chang S F, Chen J J, Jeng Y H, et al. New high-directivity coupler design with coupled spurlines [J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2004, 14(2): 65-67.
- [5] Phromlounsri R, Chongcheawchamnan M. A high directivity design using an inductive compensation technique[C]// Proceedings of the Asia - Pacific Microw Conf. Suzhou, China: IEEE, 2005: 2840-2843.
- [6] Kim C S, Lim J S, Kim D J, et al. A design of single and multi-section microstrip directional coupler with the high directivity[C]// IEEE MTT-S Int. Microwave Symp Dig. Sendai: IEEE, 2004: 1895-1898.
- [7] Iwata Sakagami. Derivation of two- and three-branch lumped element codirectional couplers and their frequency characteristics[C]// IEEE International Symposium on circuits and systems. Kobe, Japan: IEEE, 2005.
- [8] Sakagami I, Tahara M, Hao Y, et al. Simplified lumped element rat-race for a mobile receiver[C]// IEEE 2003 Inter Sym On PIMRC Proc. Japan: IEEE, 2003: 2465-2469.
- [9] Hu Tongning, Li Dong, Cao Lei, et al. Design and Simulation of Microstrip Directional Coupler with Tight Structure and High Directivity[C]// Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada: 2009.

## 作者简介:

胡桐宁 女, (1983-), 博士. 研究方向为回旋加速器 RF 系统的设计与实现.