

文章编号:1005-6122(2004)02-0055-04

同轴腔带通滤波器的一种设计方法*

徐鸿飞¹ 朱成钰¹ 刘 坚² 孙忠良¹

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室,南京 210096; 2. 西南电子电信技术研究所上海研究处,上海 200232)

摘要: 采用负阻线子网络^[1]构造了多腔耦合的同轴带通滤波器电路模型,应用电路分析软件对滤波器进行了分析优化,得到腔体之间耦合系数和接入点位置。应用三维全波分析软件,分析了腔体结构参数与耦合系数和耦合窗的关系。以这种路和场的仿真、优化相结合的方法,得出了滤波器的耦合和输入输出结构参数。运用该方法设计的中心频率 2.4GHz、通带 100MHz 的六腔滤波器的实际测试结果与仿真分析结果基本一致。

关键词: 带通滤波器, 同轴腔谐振器, 全波分析, 电路优化

A Design Method for Coaxial Cavity Band Pass Filters

Xu Hongfei¹, Zhu Chenyu¹, Liu Jian², Sun Zhongliang¹

(1. State Key Millimeter Wave Lab, Southeast University, Nanjing 210096;
2. Shanghai Branch WestSouth Research Institute of Electronic communication, Shanghai 200232)

Abstract: A circuit model for coaxial cavity filter constructed from negative sub networks^[1] is presented in this paper. Based on this model, circuit parameters such as cavity coupling factors and input-output locations of are optimized by commercial microwave circuit simulation software. The width of coupling windows between the cavities and diameters of input-output lines are acquired by modal frequency analysis and full wave optimization with commercial 3D full wave simulation software. A six-cavity band pass filter with a pass band of 100MHz at 2.4GHz designed in this way has the response coincided with the result of circuit simulation.

Key words: Band pass filter, Coaxial resonator, Full wave analysis, Circuit optimization

引言

同轴腔带通滤波器广泛应用于通信、雷达等系统,按腔体结构不同一般分为标准同轴、方腔同轴等。同轴腔体具有 Q 值高、易于实现的特点,特别适用于通带窄、带内插损小、带外抑制高的场合。其传统设计方法是:按照响应要求(如切比雪夫响应)查表,推算腔体之间耦合系数,在此基础上利用近似的计算方法设计相应耦合及输入输出结构。^[2~4]

近年来,商用微波电路仿真、优化软件和电磁场分析优化软件迅速发展。其功能也越来越齐全,为微波元件和电路的设计起到很大的推动作用。就滤波器而言,大多数微带、带状线结构的滤波器在提出拓扑结构后,可以借助于这些商用软件进行分析和优化。Gustavo L. R. 等利用负阻线网络建立多根带状线耦合电路模型,用于设计微带和带状线梳状线、

交指线滤波器电路仿真。但对同轴腔体滤波器而言,目前还没有设计电路仿真模型。

本文采用负阻线子网络^[1]构造了多腔耦合的同轴带通滤波器电路模型,对中心频率 2.4GHz、通带 100MHz 的六腔滤波器进行了分析优化,得到腔体之间耦合系数和接入点位置。应用三维全波分析软件,分析了腔体结构参数与耦合系数和耦合窗的关系,得出了滤波器的耦合和输入输出结构参数。设计的滤波器的实际测试结果与电路仿真结果基本一致。

1 电路模型

1.1 负阻线模型

Gustavo L. R.^[1] 采用一个电流控制电流源(CCCS)和一个电压控制电压源(VCVS)构造了如图1所示的网络n,通过合理设置其参数(具体设置

* 收稿日期:2003-05-27;定稿日期:2003-12-04

见参考文献[1]),使其 $ABCD$ 矩阵近似为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

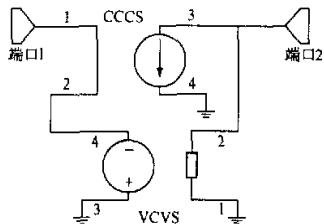


图1 负阻线子网络

利用该负阻线子网络将3个TEM耦合线(图2)化为两对双耦合线(图3)。相邻传输线的耦合系数保持不变,忽略非相邻耦合线1,3之间的耦合,而与两个负阻线子网络n相连的一段独立传输线的特性阻抗和电长度与传输线2-2'一致。

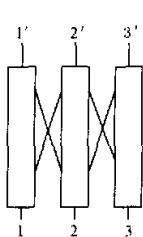


图2 3个TEM耦合线

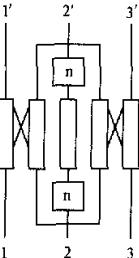


图3 两对双耦合线的连接

1.2 滤波器电路模型

通常,同轴腔带通滤波器中心导体长度l选择约为 $\lambda_0/8$ (λ_0 为通带中心频率对应的波长)特性阻抗 Z_c 为 $75\Omega^{[2,3]}$,接入点位置离短路面高度为 l_1 (图4)。利用负阻线模型,将六腔分解为(1,2)、(2,3)、(3,4)、(4,5)、(5,6)五对耦合腔。用5对理想耦合线表示,其单线特性阻抗 Z_0 为 75Ω ,考虑到实际腔体中存在损耗,将传输线损耗 α 设为 0.3dB/m ,耦合线对的奇偶模阻抗分别为(Z_{e12}, Z_{o12})、(Z_{e23}, Z_{o23})、(Z_{e34}, Z_{o34})、(Z_{e45}, Z_{o45})、(Z_{e56}, Z_{o56}),输入输出线阻抗为 Z_{10} ,构造电路模型如图4所示。

一对互相耦合的同轴腔之间的耦合系数可以用其奇偶模特性阻抗表示为:

$$k = \frac{Z_e - Z_o}{Z_e + Z_o} \quad (2)$$

奇偶模特性阻抗与特性阻抗 Z_c 之间的关系为:

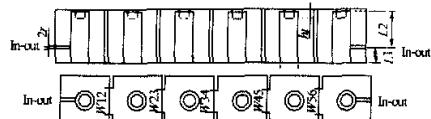


图4 同轴滤波器示意图

$$Z_e Z_o = Z_c^2 \quad (3)$$

因此:

$$k = \frac{Z_e^2 - Z_o^2}{Z_e^2 + Z_o^2} \quad (4)$$

在Agilent ADS中,建立如图5所示的电路模型,将各腔体的奇偶模阻抗(Z_{e12}, Z_{o12})、(Z_{e23}, Z_{o23})、(Z_{e34}, Z_{o34})、(Z_{e45}, Z_{o45})、(Z_{e56}, Z_{o56}),输入输出线阻抗 Z_{10} 和引线位置 l_1 以及各腔的加载电容 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$ 作为优化参数。设立优化目标使通带 $2400 \pm 50\text{MHz}$ 内 $|S_{21}| > -0.5\text{dB}$, $|S_{11}| < -20\text{dB}$,带外抑制 $> 35\text{dB}$ ($f_{d1} = 2300\text{MHz}, f_{d2} = 2500\text{MHz}$)。主要优化结果见表1,此时滤波器电路响应如图6所示。

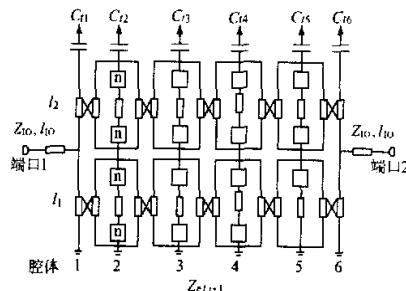


图5 滤波器电路模型

表1 电路优化结构

$Z_e(\Omega)$	$Z_o(\Omega)$	k
78.63	71.54	0.047
77.52	72.56	0.033
77.40	72.67	0.0315
77.52	72.56	0.033
78.65	71.54	0.047

2 电磁仿真与优化和电路结构的实现

将电路优化的结果作为电路结构设计和电磁仿真的出发点。在该滤波器实现中,选择方腔边长15mm,高度16.5mm,中心导体外径5.6mm,内径4mm,长度15.6mm。腔体上盖上设置调谐导体柱

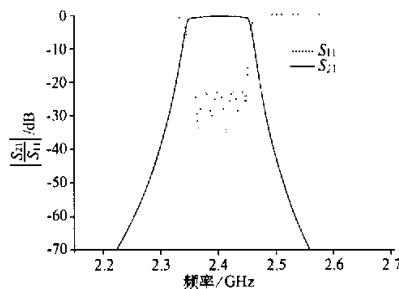


图6 滤波器电路模拟响应

直径3mm,长度 $ht_i(i=1,2,\dots,6)$,来实现加载调谐电容。通过开窗大小 $W_i(i=1,2,\dots,6)$ 来调节腔体之间耦合。输入输出线的半径为 r 。结构设计参数主要有耦合窗的大小和输入输出线的半径。

利用Ansoft HFSS分析不同窗口宽度两谐振腔之间的耦合系数(图7)。通过本征模计算出两个独立谐振频率为 f_0 的双腔的本征模频率 f_1, f_2 。耦合系数为^[5]:

$$k = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (5)$$

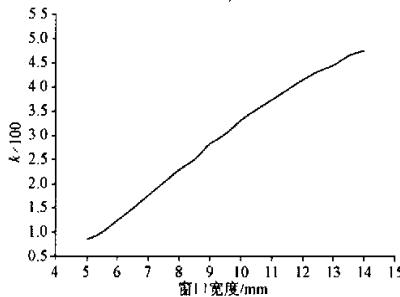


图7 耦合窗宽度与耦合量的关系

输入输出采用抽头方式,这种方式可以有许多等效电路表达方式^[6],本文采用一段高阻线表示,根据电路模拟结果,输入输出引出线特性阻抗 $Z_{10} = 180\Omega$,抽头位置离短路面3.9mm。为得出引出线的半径,将应用电路分析和电磁场仿真相结合的方法。本文提出以下几个步骤:构造单腔,与图4中腔尺寸一致;利用HFSS本征模分析;优化调谐柱的长度 ht ,使本振模频率 $f_0 = 2.4\text{GHz}$,优化结果 $ht = 2.73$ 。此时,终端加载电容 C_t 为:

$$C_t = \frac{1}{2\pi f_0 Z_c \operatorname{tg} \frac{2\pi l}{\lambda_0}} \quad (6)$$

计算得 $C_t = 0.885\text{pF}$ 。

保持该结构不变,设置输入输出结构,输入输出线半径 r ,长度为4.7mm,抽头点离短路面距离 l_2 为3.9mm,输入输出端口阻抗为 50Ω ,等效电路如图8所示。此时输入电抗为 $X_c(f)$,忽略电路损耗,反射系数 Γ_c 的相位 φ_c 近似为:

$$\varphi_c \approx -2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_c(f)}{Z_{10}} \quad (7)$$

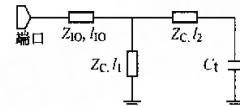


图8 输入输出结构等效电路

在谐振频率点附近,电磁模型中输入电抗 $X_{em}(f)$,应与电路模型中输入电抗 $X_c(f)$ 一致,其输入人

反射系数的相位 φ_{em} 也应一致。因此,在2.3~2.5GHz频段内,以 $\Delta f = 10\text{MHz}$ 等间隔取 $n = 21$ 个频点,设目标函数 F 为:

$$F = \sum_{i=1}^n (\varphi_{em}(f_i) - \varphi_c(f_i))^2 \quad (8)$$

然后,采用HFSS对图9表示的电磁结构进行分析和优化,取 r 的初值为0.4mm,优化 r 值使目标函数 F 最小化。优化结果 $r = 0.61\text{mm}$,此时 φ_{em}, φ_c 见图10。

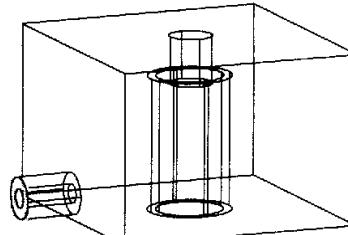


图9 输入输出结构示意图

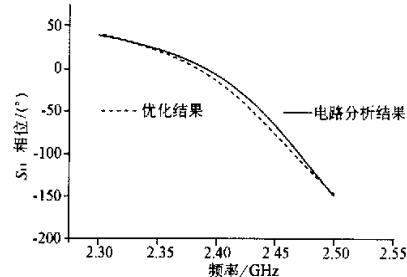


图10 输入反射系数相位

通过上述步骤,由电路优化的结果通过电磁分析和优化得到滤波器的结构参数(表2)。

表 2 滤波器优化结构参数 mm

W_{12}	W_{23}	W_{34}	W_{45}	W_{56}	r	L_{30}
13.1	9.9	9.6	9.9	13.1	0.61	4.7

注: W_{ij} 为第 i, j 谐振腔之间开窗大小, 见图 4

3 实测结果和讨论

利用上述方法, 设计和制作了一个同轴腔带通滤波器, 其设计目标为: 通带 $2400 \pm 50\text{MHz}$ 内 S_{21} 小于 -0.5dB , S_{11} 小于 -20dB , 带外抑制 $>35\text{dB}$ ($f_1 = 2300\text{MHz}, f_2 = 2500\text{MHz}$)。所使用的腔体材料为铝材, 调谐杆为铜螺钉, 未镀银。实际测试结果是: 通带 $2400 \pm 46\text{MHz}$ 带内插损 -0.9dB , 反射系数为 -18dB , 带外抑制 36dB 。实测结果如图 11 所示。

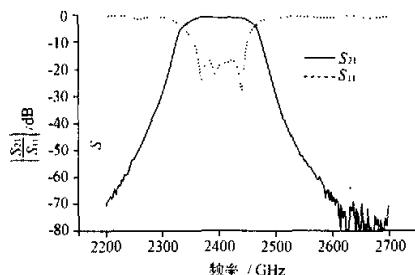


图 11 滤波器响应测试结果

分析和优化中主要存在以下两个方面的误差来源: 1) 电路模型的中负阻线子网络模型是一个近似。将多腔耦合化为两个腔的耦合再由负阻线子网络连接起来, 忽略了不相邻腔体之间的耦合, 对通带较宽的滤波器势必造成较大的误差。2) 电磁分析中, 计算两腔之间耦合与窗口大小的关系时, 忽略了两边相邻窗口, 从而影响了耦合度计算的准确性。进一步的电磁优化和电路优化相结合的研究中, 需要从这两方面探讨减少误差的途径。

4 结 论

本文采用负阻线子网络模型, 构造同轴腔带通滤波器的电路模型, 应用微波电路分析优化软件进行分析和优化, 得到腔体之间的耦合系数和输入输出接点等关键参数, 然后应用电磁波全波分析优化软件, 设计滤波器的结构参数, 包括腔体之间的开窗大小输入输出线的直径。对按照设计参数加工的

实物进行调试和测试。从测试结果来看, 除带宽稍窄(约小 10%)外, 带内插损和驻波、带外抑制等主要指标的测试结果与电路优化后的滤波器模拟性能基本一致。

致谢: 感谢过常宁教授提供负阻线模型的文献来源和其他有益的建议。

参 考 文 献

- [1] Gustavo L R, Jose I Alonso. Simulation of interdigitated structures using two-coupled-line models. *Microwave Journal*, 2000(6): 73~82
- [2] Mattaei G, Young L, Jones E M T. *Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures*. New York: McGraw-Hill, 1964
- [3] Caspi S, Adelman J. Design of combline and interdigital filters with tapped-line input. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36(4): 759~763
- [4] Richard J Cameron. General coupling matrix synthesis methods for chebyshev filtering functions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(4): 433~442
- [5] Yu Rong, Kawther A Zaki. Full-wave analysis of coupling between cylindrical combline resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(9): 1921~1929
- [6] Amir Borji, Dan Busuioc, Safavi-Naeini S, et al. ANN and EM based models for fast and accurate modeling of excitation loops in combline-type filters. *IEEE MTT-S Digest*, 2002, 2(6): 2105~2108

徐鸿飞 1989 年毕业于东南大学电磁场与微波技术专业, 获硕士学位。现在东南大学毫米波国家重点实验室攻读博士学位。主要从事微波毫米波电路、目标电磁散射特性试验研究。

朱成钰 东南大学国家重点实验室高级技工, 长期从事微波毫米波电路结构设计加工、调试。

刘 坚 1986 年毕业于东南大学微波技术专业, 现为西南电子电信技术研究所高级工程师。主要从事微波元件与电路设计工作。

孙忠良 中国工程院院士, 东南大学毫米波国家重点实验室教授、博士生导师。长期从事毫米波电路与技术研究。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>