

基于 ADS 的平行耦合带通滤波器的设计

陈 黎, 吴孟强, 肖 勇, 张树人

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要:介绍了一种设计平行耦合带通滤波器的方法,通过 ADS 软件设计,优化了中心频率为 1.0 GHz、带宽为 100 MHz 的带通滤波器。针对 ADS 电路仿真中很多寄生和耦合因素均被忽略而导致很大误差的情况,借助 momentum-2.5D 对滤波器模型进行多维电磁仿真,优化滤波器的结构参数,然后用性能良好的陶瓷基板加工出滤波器实物。实物测试结果和仿真设计吻合较好。最后得到的滤波器具有良好的端口反射特性。通带衰减小于 2 dB,端口反射系数小于 -20 dB;阻带衰减大于 40 dB,达到了技术指标的要求。

关键词:微带线;平行耦合;ADS 仿真;带通滤波器;电磁仿真

中图分类号:TN713 **文献标识码:**A

Design of Parallel Coupled Band-pass Filter Based on ADS

CHEN Li, WU Mengqiang, XIAO Yong, ZHANG Shuren

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A way of designing the parallel coupled microstrip band-pass filter has been presented. The filter with the center frequency of 1.0 GHz and band-pass 100 MHz has been designed and simulated by using the software ADS. Since the parasitic and coupling factors are neglected in the ADS circuit simulation and resulted in great errors, the momentum-2.5D is used to simulate the filter model multi-dimensionally and the structure parameters of the filter have been optimized. The ceramic substrate with good performance has been used to fabricate a physical filter. The test results agree well with the simulation and design results as well as the design specifications. The filter has good reflection characteristics of the ports, the pass-band attenuation is less than 2 dB; the port reflection coefficient is less than -20 dB; and the stop-band attenuation is more than 40 dB that meet the requirements of the technical specifications.

Key words: microstrip; parallel coupling; ADS stimulation; band-pass filter; electromagnetic simulation

0 引言

微波滤波器在通信系统中占有重要地位,广泛应用于卫星通信、微波测量、雷达技术及电子对抗技术中^[1]。因此,高性能的滤波器对一个好的射频通信系统具有重要意义。微带线具有体积小,质量轻,易与射频电路匹配等优点,因此,采用微带线加工成微波滤波器在工程中得到广泛的应用。平行耦合谐振器在滤波器的设计中非常重要,特别是在窄带滤波器的设计中,如果需滤波器具有很高的选择性,用耦合谐振电路易实现。在设计滤波器方面,传统设计方法是通过经验公式和查表来求得相关的设计参数,计算复杂且精度不高,很难达到要求的性能指标。应用 ADS 对微带线滤波器进行初始仿真,再结

合 Momentum(矩量法)对其进行电磁优化、仿真,能克服理论精度低的缺点,且设计周期短、成本低。

1 平行耦合滤波器的设计过程

1.1 基本原理

平行耦合微带线滤波器由平行的耦合线节相连组成,构成谐振电路。每一个耦合线节左右对称,长度约为 1/4 波长(对中心频率而言)。典型的微带滤波器结构如图 1 所示。



图 1 典型的微带滤波器结构

单独的耦合线节单元不能提供良好的滤波器响

收稿日期:2011-07-27

基金项目:四川省青年基金资助项目(JS0303001)

作者简介:陈黎(1986-),女,重庆合川人,硕士生,主要从事微波介质材料与器件的研究。E-mail:chenli428@126.com。吴孟强(1970-),男,四川崇州人,教授,主要从事微波介质材料与器件、新能源材料与器件的研究开发。E-mail: mwwu@uestc.edu.cn。

应及陡峭的通带——阻带过渡,因此大多使用多个耦合线段单元级联来构成实用的滤波器。

1.2 设计指标

- 中心频率:1 GHz;
- 带宽(BW):100 MHz,即 0.95~1.05 GHz;
- 带内衰减:<2 dB;
- 端口反射系数:<-20 dB;
- 阻带衰减:0.8 GHz 以下及 1.2 GHz 以上,衰减>40 dB。

1.3 理论参数计算

本设计选择切比雪夫滤波器原型,滤波器的阶数可根据 1.2 GHz 频率点的衰减大于 40 dB 的要求确定。低通滤波器的归一化频率为^[2]

$$\Omega = \frac{\omega_c}{\omega_0 - \omega_1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} - \frac{\omega_c}{\omega} \right) = 3.67 \tag{1}$$

式中: ω_c 为截止角频率; ω_0 为上边频; ω_1 为下边频; ω 为中心频率。

要在归一化频率 $\Omega=3.67$ 的频率点获得 40 dB 的衰减,经查表和综合考虑确定滤波器的阶数 $N=5$ 。已知具有 3 dB 波纹的 5 阶切比雪夫滤波器的元件参数: $g_1=g_5=3.4817, g_2=g_4=0.7618, g_3=4.5831, g_6=1$ ^[3]。

耦合传输线奇、偶模的计算公式为^[3]:

$$Z_{0\alpha}|_{i,i+1} = Z_0 [1 - Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2] \tag{2}$$

$$Z_{0\alpha}|_{i,i+1} = Z_0 [1 - Z_0 J_{i,i+1} + (Z_0 J_{i,i+1})^2] \tag{3}$$

式中:下标 $i, i+1$ 为耦合段单元; $J_{i,i+1}$ 为微带线 i 和 $i+1$ 之间的耦合系数; Z_0 为滤波器输入、输出端口的传输线特性阻抗。

$$J_{0,1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi BW}{2g_0 g_1}} \tag{4}$$

$$J_{i,i+1} = \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{\pi BW}{2g_i g_{i+1}}} \tag{5}$$

其中,滤波器的带宽

$$BW = (\omega_u - \omega_l) / \omega_0 \tag{6}$$

计算出的耦合微带线各段的奇、偶模特性阻抗如表 1 所示。

表 1 各段微带线的奇、偶模

i	$Z_0 J_{i,i+1}$	$Z_{0\alpha} / \Omega$	$Z_{0\alpha} / \Omega$
0	0.212 4	41.635 6	62.876 0
1	0.096 5	45.642 6	55.287 6
2	0.084 5	46.132 8	54.580 9
3	0.084 5	46.132 8	54.580 9
4	0.096 5	45.642 6	55.287 6
5	0.212 4	41.635 6	62.876 0

1.4 电路参数设置

微带线基板的介电常数 $\epsilon_r=9.6$,基板厚度 $H=0.8$ mm,铜导体的厚度 $T=0.004$ mm。微带线的线宽 W 、间距 S 和线长 L 由 ADS 软件中的 LineCalc 工具计算得到。平行耦合微带线滤波器的结构是对称的,6 个耦合线段中,第 1、6,2、5 及 3、4 节微带线的 W 、 S 、 L 是相同的,其值如表 2 所示。电路原理图如图 2 所示。

表 2 微带线的参数

耦合线段	W/mm	S/mm	L/mm
0	0.786 4	/	29.550 0
1,6	0.730 5	0.510 8	29.936 7
2,5	0.762 7	1.139 3	29.672 5
3,4	0.766 5	1.268 2	29.644 1

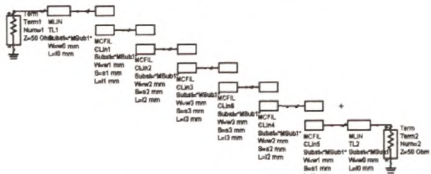


图 2 微带线滤波器仿真原理图

1.5 电路参数优化

滤波器的 S 参数如图 3 所示。由图可看出,在通带范围内, S_{21} 小于 -2 dB,通带衰减太大。而 S_{11} 大于 20 dB,说明微带线的阻抗不匹配,反射系数较大。因此需调整微带线的尺寸参数 W 、 S 、 L 的值,使各节微带线的耦合阻抗相互匹配。在 ADS 中,把 S_{21} 和 S_{11} 参数作为目标函数,对微带线的尺寸参数进行优化和调谐仿真。图 3 中,微带线的结构具有对称性,所以设置的变量为 $W_1, W_2, W_3, S_1, S_2, S_3, L_1, L_2, L_3$ 。在 ADS 的参数优化中,先用随机(Random)进行大范围扫描,再用梯度(Gradient)进行局部收敛扫描。观察状态窗口显示的优化结果,其中“CurrentEF”表示与优化目标的偏差,数值越小表示越接近优化目标,当 CurrentEF=0 时,表示达到了优化目标, S 参数的曲线图如图 4 所示。

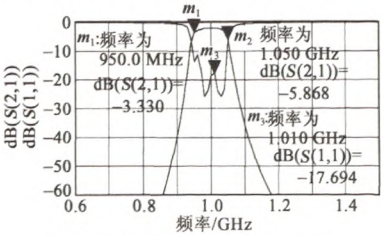
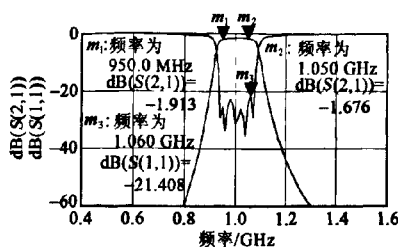


图 3 优化前的 S_{21} 和 S_{11} 参数曲线

图4 优化后的 S_{21} 和 S_{11} 参数

2 滤波器的电磁仿真优化

2.1 电磁仿真

在ADS中对滤波器原理图优化仿真,达到设计指标后,生成版图。矩量法(Momentum)的版图仿真是采用矩量法直接对电磁场进行计算,其结果比ADS的原理图仿真的结果更准确^[4]。图5为优化前后的版图仿真对比。由图5(a)、(b)可知,版图仿真得到的结果较差, S_{21} 和 S_{11} 的损耗过大。ADS的电路仿真不准确,根本原因是电路模型建立不准确,电路仿真是在理想状况下进行的,和实际情况相差较大,很多寄生和耦合因素都被忽略,所以得到的结果离实际还差很多。Momentum电磁仿真,将更多的4HGR-S/实际存在而被电路原理模型忽略的因素考虑进去,所以结果更精确。

2.2 矩量法(Momentum)优化分析

S参数损耗较大的主要原因是微带线之间的耦合不好^[5]。观察生成的版图,发现CLin1和CLin2微带线间有部分重合,导致耦合不好。在原理图中修改 W_1 、 S_1 、 W_2 的值,使微带线之间不相互重叠。同时,使微带线的间距满足 $S_1 < S_2 < S_3$ 。然后再用调谐工具对微带线的尺寸进行微调。最后在Momentum中得到了较理想的优化版图,如图5(c)、(d)所示。

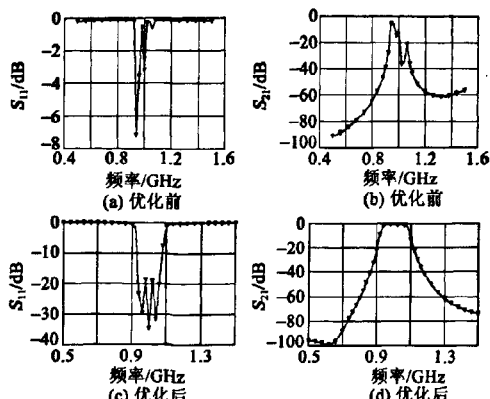


图5 优化前后的版图仿真对比

版图仿真结果表明,通带0.95~1.05 GHz内, S_{21} 衰减为-1.4 dB,阻带衰减在40 dB以上,带内端口处的反射系数 S_{11} 为-18.7 dB,满足工程设计指标。

2.3 滤波器测试结果

选定 $\epsilon_r=9.6$ 的陶瓷基板,经磁控溅射、光刻和刻蚀等工艺,按照设计的滤波器电路原理,加工出平行耦合微带线滤波器。用Agilent E5061A矢网分析仪对加工的微带线带通滤波器实物进行了测试,测试的S参数如图6所示。对比图4仿真结果和图6实测曲线,可发现它们吻合较好。实测的滤波器中心频率为1.01 GHz,通带带宽为115 MHz,略大于设计指标100 MHz,这是因为在电路仿真设计时对各种参数留有一定的余度^[6],使加工出来的实物达到设计指标的要求。在阻带范围内,频率 $f > 1.2$ GHz,滤波器的S参数曲线出现一定的波动,衰减性能没有仿真结果理想。相比电路仿真设计,产生实测误差的原因可能是介质板介电常数的准确性、生产工艺误差等。中心频率处插损为1.153 dB,整个通带内插损均 < 2 dB,因此该微带线滤波器可较好地实现滤波的功能。

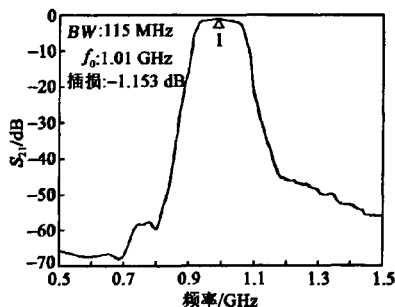


图6 微带线滤波器实物的S参数图

3 结束语

本文从平行耦合微带线滤波器的基本原理出发,完整地阐述了用ADS设计带通滤波器的仿真过程和优化方法,时间短,设计结果较可靠。ADS的优化仿真结果和实际的设计指标存在较大误差,Momentum电磁仿真很好地克服了这个问题,使设计更精确、速度更快。实物测试结果与仿真设计指标吻合较好。该滤波器具有带内插损较小,价格低,易实现等特点,在项目中实际应用效果良好。

参考文献:

- [1] 王安国. 全等宽平行耦合微带线带通滤波器设计[J]. 电路与系统学报, 2005, 5(1): 46-48.
- [2] LUDWIG R, BRETCHKO P. RF circuit design: theory and applications[M]. Prentice Hall, 2002, 171-175.
- [3] ROHDE U L, NEWKIRK D P. Microwave circuit design for wireless applications[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 2004: 128-133.
- [4] 徐兴福. ADS2008 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 98-106.
- [5] HONG J S, LANCASTER M J. Compact microwave elliptic function filter using novel microstrip meander open-loop resonators[J]. Electron Lett, 1996, 32(5): 563-564.
- [6] 梁飞, 吕文中, 汪小江, 等. $1/4\lambda$ 同轴型微带介质滤波器的设计与仿真[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(4): 104-107.
- LIANG Fei, LV Wenzhong, WANG Xiaojang, et al. Design and simulation of $1/4\lambda$ coaxial microwave dielectric filters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(4): 104-107.
- (上接第 482 页)
- [7] 唐黎明, 张玉兴. 一种快速设计梳状线滤波器的新方法[C]//CHINA SCI TEC: 中国第五届学术年会论文集, 2008.
- [8] 黄好强. 大功率腔体滤波器优化设计[J]. 河北省科学院学报, 2008, 25(2): 35-38.
- HUANG Haoqiang. The optimization design of high-power cavity filter[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2008, 25(2): 35-38.
- [9] 甘本拔, 吴万春. 现代滤波器的结构与设计[M]. 北京: 北京科学出版社, 1974.
- [10] 周建梅, 贾宝富, 李军. 同轴腔体对称广义切比雪夫滤波器耦合系数的讨论[J]. 空间电子技术, 2010(1): 119-127.
- ZHOU Jianmei, JIA Baofu, Li Jun. Discussion of the coaxial cavity chebyshev filter symmetric generalized coupling coefficient[J]. Space Electronic Technology, 2010(1): 119-127.
- [11] 朱挺挺, 吴先良. 梳状 SIR 腔体带通滤波器的设计[J]. 安徽大学学报, 2008, 32(3): 41-43.
- ZHU Tintin, WU Xianliang. Design of SIR comb cavity bandpass filter[J]. Journal of Anhui University Natura lScience Edition, 2008, 32(3): 41-43.
- [12] 董利芳, 王锡良, 王晓会. 小型化 SIR 同轴腔体滤波器的设计[J]. 电子·电路, 2009, 22(10): 4-6.
- DONG Lifang, WANG Xiliang, WANG Xiaohui. Design of miniature SIR coaxial-cavity filter[J]. Electronic Circuit, 2009, 22(10): 4-6.

欢迎订阅《压电与声光》杂志

欢迎在本刊刊登广告

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, 致力和专注于微波、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/>