

一种抽头式交指带通滤波器的设计及实现

彭卫东, 周 超, 张 熙

(中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘 要: 传统的交指带通滤波器设计采用公式计算归一化自电容和互电容, 并通过查表计算得到滤波器的参数, 该方法计算繁琐, 且计算误差较大. 文中介绍了一种根据谐振器的直接耦合原理, 利用两终端的外部品质因数 Q 和谐振器间的耦合系数 K 设计抽头式交指型带通滤波器的方法. 据此, 设计了一种用于微波选频的交指滤波器, 借助 ADS 软件对滤波器进行仿真和优化. 通过仿真及实测结果的分析对比, 进一步给出了设计改进方案.

关键词: 交指滤波器; 耦合系数; 外部品质因数; 抽头式

中图分类号: TM930.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)05-0197-04

Design of Microstrip Tapped-Input Interdigital Bandpass Filters

PENG Wei-dong, ZHOU Chao, ZHANG Xi

(Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The traditional method to design interdigital filter, which obtains the filter parameters from calculating self-capacitance, mutual capacitance and Look-up table, proved to be complicated and inaccurate. In this paper, a new method utilizing external quality factor Q and the inter-resonator coupling coefficient K was introduced. As a sequent, an interdigital filter was designed for the microwave frequency-selector. The simulation results were compared with the experimental results. Further, the modulated method for bandpass filter was presented in detail.

Key words: interdigital filters; coupling coefficient; external quality factor; tapped-line

1 引言

微波带通滤波器是现代电子系统中的关键部件之一. 尤其是在射频接收机前端, 其性能的优劣直接影响整个接收机系统的性能指标^[1]. 用波导, 同轴线等构成的滤波器一般体积较大, 因此在实用中容易受到限制. 抽头式结构的交指带通微波滤波器具有相对带宽范围大, 吸收衰减低, 而且阻带较宽, 易与微波电路相匹配连接等优点.

对于抽头式结构滤波器, 抽头线单元对滤波器整体性能的影响较大^[2], 采用等效电路法对抽头线输入/输出(I/O)单元存在较大的分析误差, 研制周期长. 随着高频电磁仿真软件的仿真精度和效率不断提高, 利用射频电路仿真软件, 结合传统的等效电路法原理, 可以提高设计精度, 缩短研制周期, 从而

快速、有效地设计出给定技术参数的微波滤波器.

2 设计原理

对于窄带和中等带宽($FBW < 30\%$)的滤波器来说, 交指滤波器通常选择终端短路结构. 图 1 为 N 级抽头式终端短路式交指带通滤波器的基本结构, 它由平行耦合线谐振器阵相互交叉组成, 每根耦合线一端开路、一端短路, 长约四分之一波长(相对中心频率而言), 载 TEM 模. 滤波器输入输出分别采用抽头形式. 其中, 每个四分之一波长谐振器的宽度为 W_i , 长度为 L_i , ($i=1, 2, \dots, n$), 相邻两个谐振器的间距为 $S_{i,i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$), 抽头的线宽为 W_t , 抽头到首末两级谐振器短路端的距离为 L_t .

传统终端短路式带通滤波器的设计方法采用从低通原型映射到带通形式, 然后查表, 利用公式计算

收稿日期: 2011-09-08; 修回日期: 2011-10-30

基金项目: 中国民用航空飞行学院自然基金项目(J2007-23)

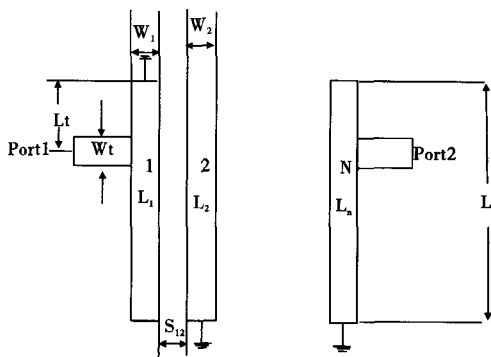


图1 终端短路式交指滤波器示意图

归一化自电容和互电容,计算出 W_i , $S_{i,i+1}$, 及 L_i . 在许多微波滤波器设计中,常用一段开路传输线或短路传输线作为谐振器^[3-4]. 对于耦合谐振,通常是通过阻抗变换器的原理进行设计. 在上述的传统设计方法中,很多公式都是经验性的,且计算繁杂. 本文采用另外一种设计思路:利用两终端的外部品质因数 Q 和谐振器间的耦合系数 K ,根据谐振器的直接耦合进行微波滤波器设计. K 和 Q 与电路结构尺寸的关系,可以利用电磁场仿真软件分析得到,进一步通过运算即可获得滤波器的物理尺寸和滤波特性.

所谓终端的外部品质因数 Q 值,就是终端电阻反射到第一个串联谐振器(或第 n 个)中所得出的 Q 值,其用来表征选择性的优劣和能量损耗的程度. 耦合系数 K 和外部品质因数 Q 值可由式(1)、(2)求得^[5].

$$Q = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (1)$$

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (2)$$

由式(2)计算得到的耦合系数 $K_{i,i+1}$,再利用 ADS 软件 full-wave EM 仿真得到耦合系数与间距之间的关系曲线,从而获得相邻谐振器的间距 $S_{i,i+1}$. 考虑边缘效应的谐振杆长 L 可由式(3)确定.

$$L = \lambda_g/4 - 0.412h \frac{\epsilon_e}{\epsilon_e} \cdot \frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \quad (3)$$

其中, $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_e}$

$$L_t = \frac{2L}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{\frac{\pi Z_0}{4Z_{01}Q}} \quad (4)$$

3 设计及仿真

微波选频组件的在各类微波设备中应用相当广泛,采用交指型滤波器的选频组件体积小,并可直接

平面化. 依据上述分析,设计了微波选频组件中的一个交指滤波器. 该滤波器中心频率为 1.75 GHz, 相对带宽 FBW 为 28%,带内波纹小于 1 dB,在频率 1.2 GHz 和 2.4 GHz 时,有大于 35 dB 衰减. 设计中采用 Rogers 公司的 RO4003 基板,介电常数 $\epsilon = 3.55$, 基片厚度 $h = 0.508$ mm, 导体厚度 $t = 35$ μ m, 金属电导率 $\text{Cond} = 5.88e+7$. 根据滤波器设计指标,采用切比雪夫型终端短路式交指带通滤波器,取级数 $n=7$,低通原型的归一化元件值查表可得: $g_0 = g_8 = 1$, $g_1 = g_7 = 2.1547$, $g_2 = g_6 = 1.1041$, $g_3 = g_5 = 3.0635$, $g_4 = 1.5734$. 根据式(1)、(2)分别计算出外部品质因数及相邻谐振器耦合系数分别为 $Q = 7.6953$, $K_{12} = K_{67} = 0.1845$, $K_{23} = K_{56} = 0.1522$, $K_{34} = K_{45} = 0.1275$, 相应的 50 Ω 抽头线的线宽为 1.097 mm,为计算、加工方便,各谐振器杆取等宽为 1.5 mm. 根据前述方法和原理,可以求得相应的谐振杆间距分别为 $S_{1,2} = S_{6,7} = 0.1832$; $S_{2,3} = S_{5,6} = 0.2213$; $S_{3,4} = S_{4,5} = 0.2572$.

根据计算所得到的滤波器各谐振器杆长、宽及间距的初值,采用 ADS 软件仿真并优化,电路的仿真结构原理如图 2 所示. 经优化后的仿真结果如图 3 所示.

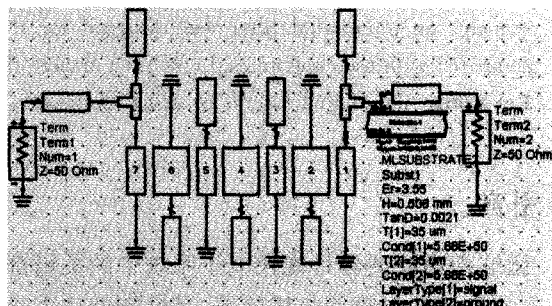


图2 抽头式交指滤波器电路仿真结构图

由图 3 可知,滤波器的各项指标基本符合设计要求. 但是由于原理图的仿真是在完全理想的状态下进行,而实际电路板的制作往往和理论有较大的差距. ADS 软件的 Momentum 工具采用矩量法仿真,在仿真时能产生准确的 EM 模型,其仿真结果更加接近实际效果. 为了进一步得到比较精确的滤波器参数,使用 Momentum 工具进行版图仿真. Momentum 版图仿真的结果如图 4 所示.

由图 4 可见,仿真结果离指标要求还有一些差距,这主要是由于手工计算时只考虑到相邻 2 根微带线之间的耦合关系,且忽略了交指型带通滤波器中每一级耦合杆终端处的开路节与介质基片之间所

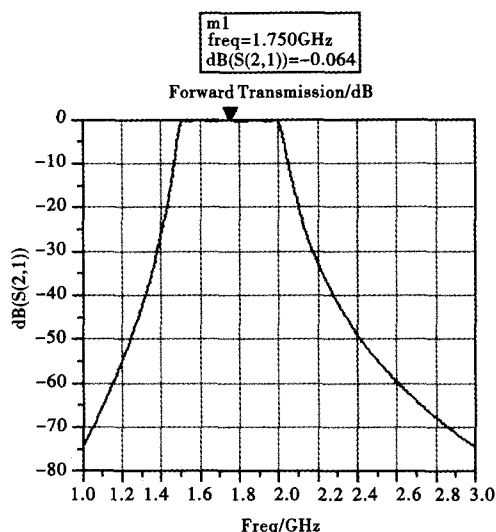


图3 滤波器的原理图仿真结果

存在的边缘耦合电容.然而 Momentum 仿真会将所有的微带谐振线之间的耦合效应都计算进去.通过仿真的滤波器 S21 曲线,可以看到滤波器的通带带宽变窄,中心频率有了一定的偏移.

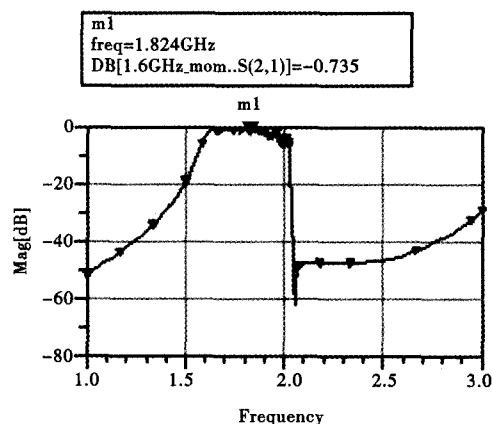


图4 未优化的 Momentum 版图仿真

为了使 ADS 仿真获得较好的优化效果,往往需要尽可能多地设置优化点,但是这会大幅增加优化时间.为缩小优化时间,首先需要对参数进行手动调谐,以确定一个比较小的优化范围.使用 ADS 软件中的调谐功能,缩小相邻谐振器之间的间距,使滤波器通带带宽变宽,直到基本符合要求.通过缩短谐振器的长度来调整滤波器的中心频率,以解决滤波器的中心频率偏移.当将滤波器 S21 曲线手动调谐到大致满足指标的形状时,就可进行优化,直到版图仿真达到设计要求为止.优化调谐后的最终滤波器参数值如表 1 所示.

表1 滤波器各参数 (单位:mm)

W_i	$S_{i,i+1}$	L_i	L
$W_1=W_7=1.453$	$S_{1,2}=S_{6,7}=0.1792$		
$W_2=W_6=1.636$	$S_{2,3}=S_{5,6}=0.2380$	5.647	21.816
$W_3=W_5=1.658$	$S_{3,4}=S_{4,5}=0.2475$		
$W_4=1.660$			

4 实验测试分析及调试

根据最终优化的参数,本文制作的滤波器实物如图 5 所示.利用 ROHDE&SCHWARZ 公司的 ZVB20 矢量网络分析仪,测得滤波器的 S21 响应曲线如图 6 所示.

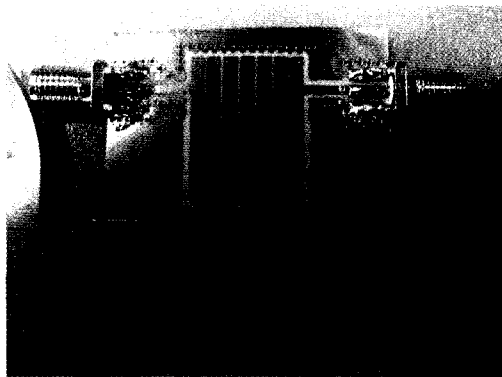


图5 滤波器实物

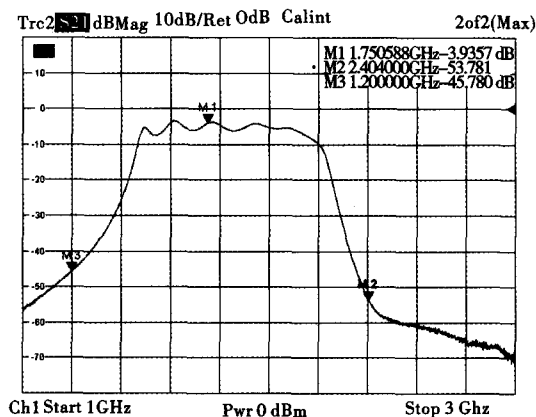


图6 滤波器的性能实测曲线

从图 6 可以看出,该带通滤波器的带通基本性能曲线已形成,但该仿真曲线中滤波器通带的带内波纹抖动及插入损耗比较大,这是因为通带内的损耗包括电阻损耗和电抗损耗,而电抗损耗与耦合和频率都有关,因此导致带内损耗的起伏.电磁场仿真软件优化可以消除电抗损耗,却无法消除电阻损耗.另外,本实测没有添加屏蔽外盒,这也是影响带内损

耗偏大及带内平坦度不够的原因之一。

同时,滤波器的相对带宽变宽,中心频率出现了一定量的偏移,这主要有以下几个原因。一方面,抽头线的加载效应使得第一个谐振器的高度与其它谐振器的高度存在差异,从而导致相对带宽较大。另一方面,实际基片的介电常数不均匀,这样会引起中心频率的偏移,随着基片的介电常数的升高,滤波器的中心频率会降低。另外,SMA 头插针的焊接,也不一定处在抽头微带理想中心,这种与仿真条件存在的差异,也会带来小量的误差。

根据以上分析,在现有实验条件下,本文采取以下方法对滤波器进行一些改进。根据实际测试结果,可以通过截断或延长焊接等手段,调整谐振杆长度以弥补基片介质不均匀所带来的频率偏移,以使中心频率符合设计要求。抽头与 SMA 头连接时,尽量紧凑,以使 SMA 头的插针能紧贴印制电路板,减少焊锡球的反射因素。经改进后的滤波器实测曲线如图 7 所示。

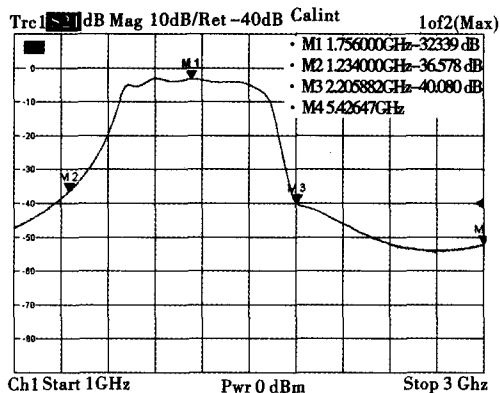


图 7 调整后滤波器性能实测曲线

由图 7 可见,滤波器的平坦度和频率偏移均得到了改善,其指标也基本满足微波选频组件中滤波器的要求。

5 结束语

本文以终端短路式交指滤波器的基本原理为基础,介绍了一套新颖的耦合谐振带通滤波器的设计思路和方法。该方法借助 ADS 软件对滤波器进行仿真和优化。应用该方法设计和加工了一个七级抽头式交指型带通滤波器,并对仿真和实测结果进行对比分析,给出的滤波器调试手段对实际工程设计有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Kang Wook kim, Chan-Ho Park, Sung-Jim Han. A new design procedure of tapped coupled-line filters. Antennas and Propagation Society Symposium [J], 2004: 2863-2866.
- [2] 郑清扩. 抽头式微波滤波器的分析与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [3] 甘本祯, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1973, 218-238.
- [4] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [5] Xu Jia, Yu Na, Shi Bingxia, et al. The Miniaturization Design of Microstrip Interdigital Bandpass Filter [C]// IEEE International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System [s. l.]: IEEE, 2009: 74-76.

作者简介:

彭卫东 男, (1968—), 副教授, 硕士生导师。研究方向为计算机测控、计算机仿真。

周超 男, (1980—), 硕士, 讲师。研究方向为电磁兼容、电子电气设备故障诊断及预测。

张熙 女, (1969—), 高级实验师。研究方向为传感器应用、计算机测控。