

交叉耦合谐振腔滤波器的研究与设计

张贞鹏 王清源 廖翱 高秀晓

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

zp.zhang007@gmail.com

摘要：交叉耦合滤波器具有陡峭的边缘特性。本文讨论了群时延在设计交叉耦合滤波器的作用，阐述了利用群时延设计交叉耦合滤波器的方法。并且利用该方法设计出一交叉耦合滤波器。

关键字：叉耦合谐振腔滤波器，群时延，传输零点

An Approach to Design and Tuning Cross-coupled Resonator Filter

Zhenpeng Zhang Qingyuan Wang Xiuxiao Gao

(chool of physics and electronics , UESTC of China Chengdu 610054)

Abstract: With sharp cutoffs at the edge of passband and high selectivity, cross-coupled resonator filter are used frequently. An useful approach to the design and tuning cross-coupled resonator filter using group delay has described. And a 4-order cross-coupled filter is designed using this method.

Keywords: cross-coupled resonator filter, group delay, transmission zero

1 引言

随着移动通讯系统、微波通信技术的飞速发展，频谱的日益拥挤，对滤波器的性能指标提出了越来越高的要求，高选择性、小尺寸、通带内低插入损耗的射频/微波带通滤波器变得十分重要。通常宽的做法是在不相邻额谐振腔间引入额外的交叉耦合，在阻带产生有限的传输零点，以此来增加截止频率的陡度，提高滤波器的优越性。虽然对这种耦合滤波器的综合和设计已有了广范研究^[1, 2]但是这型的交叉耦合滤波器的调节却是一个困难而重要的过程。本文重点介绍如何利用仿真软件调节所需要的交叉耦合滤波器。

2 群时延调节滤波器的原理^[3]

设计滤波器的标准方法是低通 带通 耦合频率、低端截止频率、高端截止频率。腔谐振。连接线和输入输出谐振器间的耦合与Q值相关，谐振腔之间的耦合系数K_{ij}可以由原型滤波器的g值和相对带宽确定。一旦这些耦合系数确定，同时谐振腔在中心频率处谐振，所设计的耦合腔滤波器便会出现低通原型滤波器预测的曲线。当各谐振腔谐振时Q_E和K_{ij}可以由S₁₁确定。这些参数通过简单的公式与S₁₁的相位和群时延相联系。S₁₁的群时延定义为

$$\Gamma_d(w) = -\frac{\delta\Phi}{\delta w} \quad (1)$$

这里 Φ 是S₁₁的弧度相位，w是角频率。

由于S₁₁可以由归一化的g值和带通滤波器的带宽来表示，所以群时延也可以由它们表示

$$\Gamma_d(w) = -\frac{\partial\Phi}{\partial w^1} \frac{\partial w^1}{\partial w} \quad (2)$$

这里 Φ 是低通原型S₁₁的弧度相位， w^1 是低通原型的角频率。

利用低通到带通的转换公式

$$w_1 \rightarrow \frac{w_0}{(w_2 - w_1)} \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right) \quad (3)$$

这里 w_0 、 w_1 、 w_2 分别为带通滤波器的中心

带通滤波器的群时延可以得出

$$\begin{aligned} \Gamma_d(w) &= -\frac{w_0}{(w_2 - w_1)} \left(\frac{1}{w_0} + \frac{w_0}{w^2} \right) \frac{\delta\Phi}{\delta w^1} \\ &= -\frac{w^2 + w_0^2}{w^2 (w_2 - w_1)} \frac{\delta\Phi}{\delta w^1} \end{aligned} \quad (4)$$

由于

$$S_{11} = \frac{Z_{IN} - Z_0}{Z_{IN} + Z_0} \quad (5)$$

同时对于无损的情况 Z_{IN} 是纯虚数，所以

$$S_{11} = \frac{jX_{IN} - Z_0}{jX_{IN} + Z_0} \quad (6)$$

因此

$$\begin{aligned} \Phi &= -\tan^{-1} \frac{X_{IN}(w)}{Z_0} - \tan^{-1} \frac{X_{IN}(w)}{Z_0} \\ &= -2 \tan^{-1} \frac{X_{IN}(w)}{Z_0} \end{aligned} \quad (7)$$

所以

$$\Gamma_d(w) = -\frac{2(w^2 + w_0^2)}{w^2(w_2 - w_1)} \frac{\delta}{\delta w^1} \tan^{-1} \frac{X_{IN}(w^1)}{Z_0} \quad (8)$$

将 g_1 考虑为并联电容，可以得到

$$X_{IN} = -\frac{1}{w^1 g_1} \quad (9)$$

$$Z_0 = g_0 \quad (10)$$

$$\tan^{-1} \frac{X_{IN}(w^1)}{Z_0} = \tan^{-1} -\frac{1}{w^1 g_1 g_0} \dots \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta w^1} \tan^{-1} \left(-\frac{1}{w^1 g_1 g_0} \right) &= \frac{g_0 g_1}{1 + (g_0 g_1 w^1)^2} \\ \therefore \Gamma_d(w) &= -\frac{2(w^2 + w_0^2)}{w^2(w_2 - w_1)} \frac{g_0 g_1}{1 + (g_0 g_1 w^1)^2} \\ &= -\frac{2(w^2 + w_0^2) g_1 g_0}{w^2(w_2 - w_1) \left(1 + (g_0 g_1)^2 \left(\frac{w_0}{w_2 - w_1} \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right) \right)^2 \right)} \end{aligned} \quad (12)$$

在中心频率处 $w = w_0$

$$\therefore \Gamma_{d1}(w_0) = \frac{4g_0 g_1}{(w_2 - w_1)} \quad (13)$$

同理可以得到以下公式

$$n = 1 \rightarrow \Gamma_{d1} = \frac{4g_0 g_1}{\Delta w}$$

$$n = 2 \rightarrow \Gamma_{d2} = \frac{4g_2}{g_0 \Delta w}$$

$$n = 3 \rightarrow \Gamma_{d3} = \frac{4g_0(g_1 + g_3)}{\Delta w}$$

$$n = 4 \rightarrow \Gamma_{d4} = \frac{4(g_2 + g_4)}{g_0 \Delta w}$$

$$n = 5 \rightarrow \Gamma_{d5} = \frac{4g_0(g_1 + g_3 + g_5)}{\Delta w}$$

$$n = 6 \rightarrow \Gamma_{d6} = \frac{4(g_2 + g_4 + g_6)}{g_0 \Delta w}$$

表中的 $n = 1$ 表示第一腔的群时延， $n = 2$ 表示前两腔的群时延，以此类推。

通过上面的分析我们可以看出只要得到所设计的滤波器的各个腔的群时延便可以通过群时延调节得到需要的响应曲线。

3 四腔交叉耦合滤波器设计

用一个四腔交叉耦合滤波器作为例子来加以说明。

3.1 设计要求

通带中心频率: $f_0 = 2.0175\text{GHz}$

通带: $2.01-2.025\text{GHz}$

带 宽: $f = 15\text{MHz}$

带内反射: $RL \leq -20 \text{ dB}$

带内插损: $< 1\text{dB}$

3.2 ADS仿真

查得的四阶切比雪夫响应的 g 值为

$1.000, 0.8539, 1.2707, 1.4900, 0.7283, 1.1726$

可以看出 g 值不是对称的，但算出的 K_{12} 与 K_{34} 值却是对称的， K_{01} 与 K_{45} 不相等，为了让其相等，以免设计实际微波滤波器时结构不对称，在此人为设置为 $g_5 = (g_0 \times g_1) / g_4$ ，以使 $K_{01} = K_{45}$ 。

求出耦合系数^[4]为 $0.10774, 0.00952, 0.00720, 0.00952, 0.10774$

交叉耦合系数 K_{14} 实际是电容耦合，在此将传输线电长度改为 -90° 即可实现。 K_{14} 的值在一定范围内变化时，对通带影响不大，主要是影响零点的位置，可用 ADS 的 tune 功能调整 K_{14} 的值，使零点处于需要的地方。此处取为： $K_{14} = 0.000101205$ 。

在 ADS 中搭建的电路如图 1 所示。

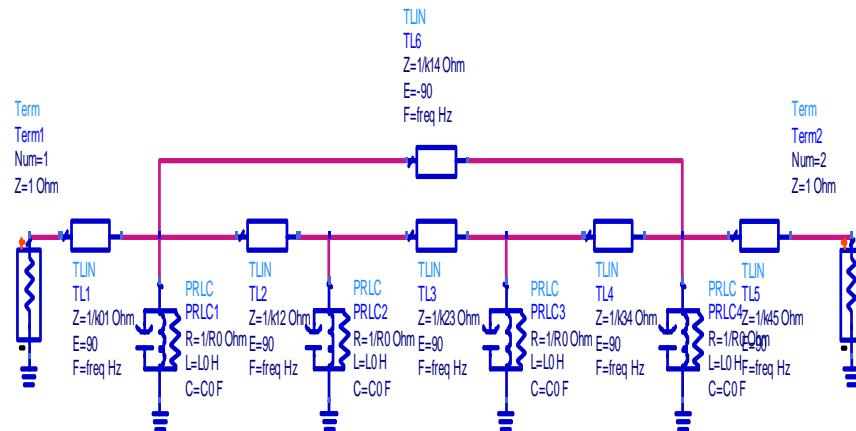


图 1 ADS 仿真电路

优化以后的图形如图2所示。

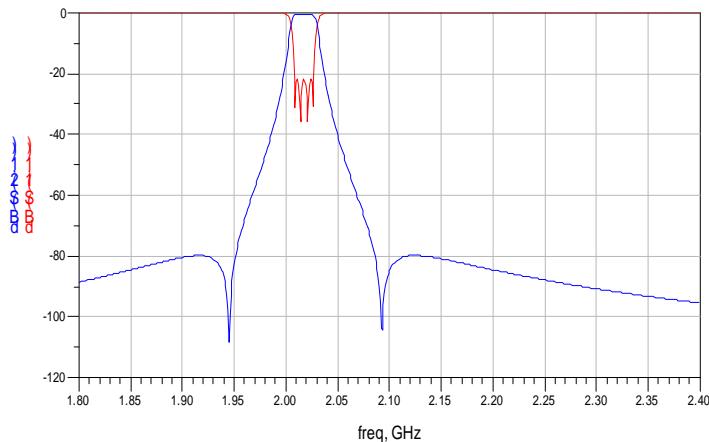


图 2 ADS 仿真结果

通过分别将1腔短路，2腔短路，3腔短路可以得到中心频率处三个群时延 $t_1 = 29.518\text{ns}$ ， $t_2 = 42.512\text{ns}$ ， $t_3 = 80.104\text{ns}$ 。

3.3 CST仿真

采用同轴腔体谐振器，使每个谐振腔在中心频率谐振，分别调节1/2腔，2/3腔和3/4腔之间的耦合模片的大小，使得耦合系数分别为0.00952，0.00720，0.00952。

计算耦合系数的公式为 $K = \frac{fe^2 - fm^2}{fe^2 + fm^2}$ ，其中

fe 为对称面是电壁时的第一模式谐振频率， fm 为对称面是磁壁时的第一模式谐振频率。

建立的模型如图3所示。

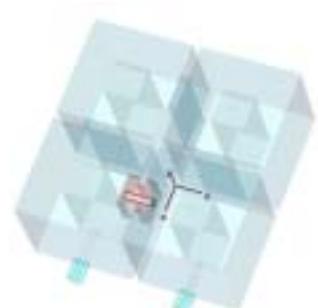


图 3 CST 模型

利用群时延调节的具体步骤如下：

(1) 使2、3、4腔短路，调节输入耦合和第一腔的柱体高度(影响谐振频率)，使群时延为 t_1 ，同时使群时延图形尽量对称。

(2) 使3、4腔短路，调节1、2腔之间的耦合和第二腔柱体高度，使群时延为 t_2 ，同时使群时延图

形尽量对称。

(3) 使4腔短路，调节2、3腔之间的耦合，使群时延为 t_3 ，同时使群时延图形尽量对称。

CST仿真后的各个参数如表1所示。

表1 CST仿真出的参数

变量	值	描述
a	25	腔体宽度
b	25	腔体长度
c	25	腔体高度
h4	8	交叉耦合柱体距底部的长度
h_in	2.493	输入输出同轴线距底部的长度
hb1	0.922	调谐螺钉1的长度
hb2	0.717	调谐螺钉2的长度
hb3	0.713	调谐螺钉3的长度
hb4	0.922	调谐螺钉4的长度
hp1	23.5	柱体1的高度
hp2	23.5	柱体2的高度
hp3	23.5	柱体3的高度
hp4	23.5	柱体4的高度
l	6.92	交叉耦合柱体的长度
r	1	交叉耦合柱体的半径
t	2	模片的厚度
w1	9.515	耦合缝隙1的宽度
w2	8.3	耦合缝隙2的宽度
w3	9.515	耦合缝隙3的宽度
w4	8	耦合缝隙4的宽度

CST仿真出的图形如图4所示。

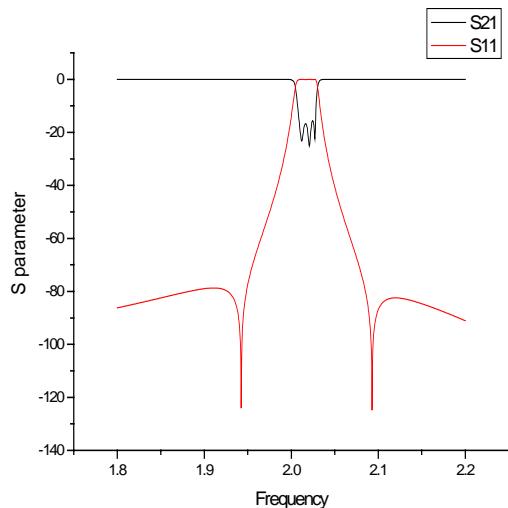


图4 CST仿真的结果

可以看出仿真的曲线与ADS中的曲线基本吻合，说明了这种设计方法的有效性。

4 加工测试曲线

滤波器实物外型图如图5所示。

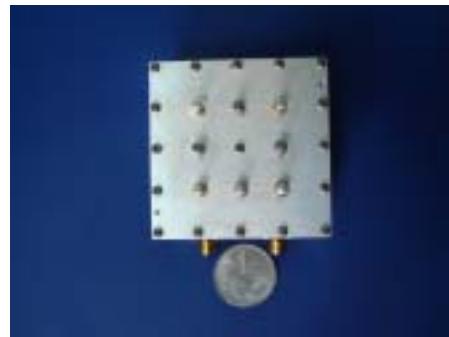


图5 滤波器实物外型

利用HP矢量网络分析仪测试的曲线如图6所示。

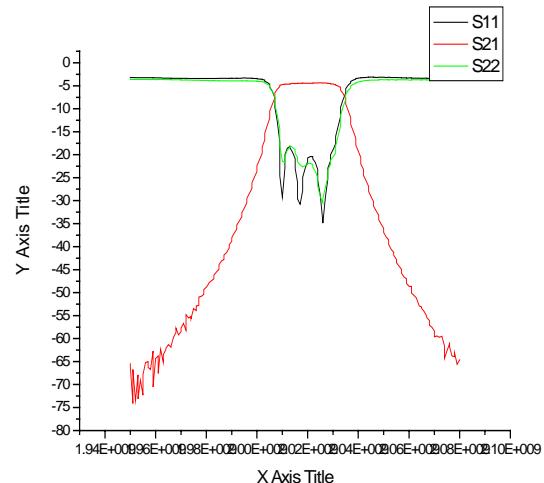


图6 矢量网络分析仪实测结果

通过测试曲线可以看出中心频率变为2.0177GHz，比设计要求高了2MHz。这是由于预偏太多引起的，与方法的有效性无关。

5 总结

通过理论推导得出了利用群时延设计滤波器的有效性，然后通过一个四腔交叉耦合滤波器的设计具体说明了该设计方法。通过仿真结构和实际测试曲线我们可以看到该设计方法可行，为设计交叉耦合滤波器提供了一种简单的程序。

参考文献

- [1] Atia A E, Williams A E, Newcomb R W. Narrow-band multiple-coupled cavity synthesis. IEEE Trans on Circuits Syst, 1974, 21(9):649-655

- [2] Atia A E, Williams A E. Narrow-bandpass waveguide filters. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1972, 20(4):258-265
- [3] John B. Ness. A Unified Approach to the Design, Mesurement, and Tuning of Coupled-Resonator Filters. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1998, 46(4):343-351
- [4] 甘本祓,吴万春.《现代微波滤波器的结构与设计》.科学出版社,1973

作者简介：张贞鹏，男，硕士研究生，主要研究领域为微波毫米波器件与电路、天线理论与技术等；王清源，男，博士生导师， 主要研究领域为微波毫米波电路与系统、天线理论与技术、信号完整性分析等。

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/>