

交叉耦合微带滤波器的小型化设计

周 媛

摘要:本文提出的是一种小型化的交叉耦合微带滤波器,主要工作是将交叉耦合放在不相邻的谐振器之间,使在通带高端的附近产生两个传输零点,将扫频范围设置在 2GHz 到 14GHz 间,从得到的仿真结果中能看出抑制小于-20dB,寄生通带的中心频率为 13.83GHz,谐波抑制达到 3.9 倍频。

关键词: 微带滤波器; 交叉耦合; 传输零点

ABSTRACT:In this paper, the primary mission we need to do is putting the cross coupling between adjacent resonators, the near pass-band high-end generate two transmission zeros. Meanwhile, the sweep range set at 2GHz to 14GHz, from the simulation results we can see the inhibition of less than -20dB. Parasitic pass-band center frequency is 13.83 GHz. The ratio between first spurious pass-band and fundamental frequency is over 3.9.

Key Words: Microstrip Filter; Cross Coupling; Transmission Zeros

1. 引言

21 世纪以来,随着电子技术的迅速发展,要求通信技术的高质量的人越来越多,于是逐步扩大了通信市场,并推动了微波通信技术等相关产业的发展。通信技术正在向高速、宽带、大容量的方向发展^[1],它也推动了通信设备终端系统的发展,要求整个系统中的各个零部件达到小型化、高性能、易集成和高稳定性^[2]。

传统滤波器的尺寸相对较大,滤波性能也不能满足实际需要,难以让消费者满意,因此为了更好的实现系统性能的需要,迫切需要体积小且性能好的滤波器。目前,国内外专业人士就该需求进行了设计研究,解决方法主要就是采用交叉耦合结构来设计出达到小型化高性能要求的滤波器。在设计过程中,通过采用交叉耦合结构在带外产生所需的传输零点,达到高性能的阻带抑制目的,来实现高性能的滤波要求^[2]。

本文的主要工作是设计并仿真采用了交叉耦合结构的微带滤波器,它不仅在体积上更为小巧,而且在滤波性能上也比传统滤波器的要好,因此交叉耦合结构具有巨大优势,也成为国际上研究的热点。

2. 原理设计

2.1 传输零点原理

一般情况下,滤波器的传输函数如下: $|S_{21}(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 F_N^2(\Omega)}$ (2-1)

切比雪夫函数在添加传输零点后可表为: $F_N(\Omega) = \cosh\{(N-2)\cosh^{-1}(\Omega)\} + \cosh^{-1}\left(\frac{\Omega \cdot \Omega + 1}{\Omega + \Omega}\right) + \cosh^{-1}\left(\frac{\Omega \cdot \Omega + 1}{\Omega + \Omega}\right)$ (2-2)

其中, N 表示为滤波器的阶数。

Ω 表示为衰减极点的频率, $-\Omega$ 与 Ω 是相对的,即 $|\pm\Omega| = \Omega$ 。

其中, $\Omega_a > 1$ 。当 Ω_a 趋于无穷大时,意思是说当传输零点趋于无穷大时,对于被引入交叉耦合的滤波器来说,它的频率特性跟具有传输零点的切比雪夫型滤波器是一样的^[1]。

带通滤波器的频率变换式为: $\Omega = \frac{1}{FBW} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 - \omega} \right)$ (2-3)

其中, FBW 表示为相对带宽, ω_0 表示为中心频率。

结合上面三式可得以下公式: $\omega_{a1} = \omega_0 \frac{-\Omega_a \cdot FBW + \sqrt{(\Omega_a \cdot FBW)^2 + 4}}{2}$ (2-4)

$\omega_{a2} = \omega_0 \frac{\Omega_a \cdot FBW + \sqrt{(\Omega_a \cdot FBW)^2 + 4}}{2}$ (2-5)

依据式 (2-4) 和式 (2-5) 皆可计算出带外零点,在我们只需要单个传输零点的情况下,当传输零点处于带通滤波器的低端时,需计算式 (2-4),反之,当传输零点处于带通滤波器的高端时,需计算式 (2-5) ^[3]。

2.2 三阶交叉耦合结构

当滤波器的阶数为 3 即 N=3 时,该滤波器被称为三阶交叉耦合滤波器,它的等效电路如图 2-1 所示,当然,它也能用低通原型滤波器来表示,如图 2-2 所示^[2]。

在图 2-2 中, $J_{12} = J_{23} = 1$, $g_0 = g_4 = 1$, $g_1 = g_3$, $B_1 = B_3$ 。

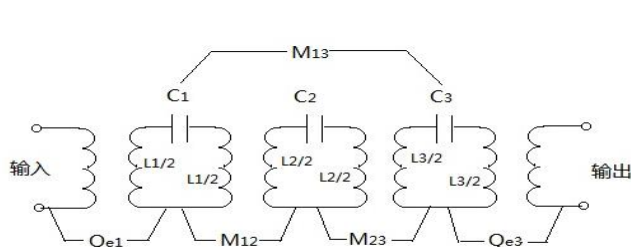


图 2-1 三阶 (N=3) 交叉耦合滤波器的等效电路

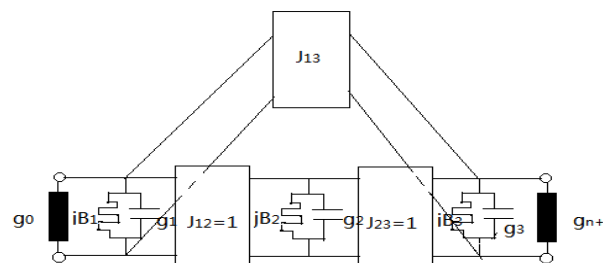


图 2-2 三阶 (N=3) 交叉耦合低通原型滤波器

其中,

$$\omega_{bi} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{B_i}{g_i / FBW + B_i / 2}} \quad (2-6)$$

$$Q_{e1} = \frac{\omega_{01}}{\omega_0 g_0} \left(\frac{g_1 + B_1}{FBW + 2} \right) \quad (2-7)$$

$$M_{ij} \Big|_{i \neq j} = \frac{\omega_0}{\sqrt{\omega_{0i} \omega_{0j}}} \cdot \frac{FBW \cdot J_{ij}}{\sqrt{\left(g_i + FBW \frac{B_i}{2} \right) \left(g_j + FBW \frac{B_j}{2} \right)}} \quad (2-8)$$

2.3 各项参数与模型结构

根据传输零点和三阶交叉耦合原理，再设计参数，中心频率 $f_0 = 3.55\text{GHz}$ ，带宽 $FBW = 0.355\text{GHz}$ 。目标为，在 2GHz 到 14GHz 的扫频范围内，阻带抑制将低于 -20dB 。

耦合系数的计算公式为：
$$k = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (2-9)$$

其中， f_1 为谐振器 1 的谐振频率， f_2 为谐振器 2 的谐振频率。

品质因数的计算公式为：
$$Q_c = \frac{f_0}{\delta f_{3dB}} \quad (2-10)$$

其中， f_0 表示为首个或末尾处的谐振器的谐振频率， f_{3dB} 表示为当谐振器只有一个端口激励时的 3 分贝带宽。经反复计算，可得各部分的尺寸，物理版图如下 2-3 所示，各尺寸如下表 1 所示：

表 1 滤波器的各项尺寸（单位：mm）

变量	值	变量	值	变量	值
W0	1.54	L1	3.85	S	0.1
W1	1.89	L2	3.36	S13	0.2
W2	0.38	L3	1.33	t	2.77

2.4 仿真结果与分析

打开 HFSS 软件，创建一个新文件（插入 HFSS 设计），求解类型选择终端模式，单位是毫米，将表 1 中的各数据定义好，之后开始作图。在本设计中，基片材质为罗杰斯 5880， $\epsilon = 2.2$ ， $\tan \delta = 0.0009$ ，基片厚度为 0.508mm 。在 HFSS 中建模如图 2-4 所示：

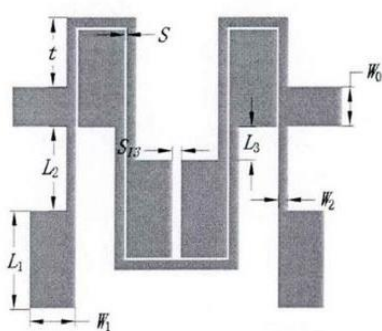


图 2-3 交叉耦合滤波器物理几何图

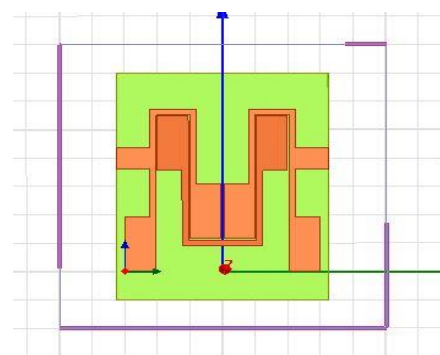


图 2-4 交叉耦合滤波器的模型

如图 2-5 即为该模型经运行后得到的仿真结果，从图中我们可以看出，在 4.2GHz 到 13.5GHz 的频段内，阻带抑制都位于 -20dB 之下，这就说明了该滤波器达到了体积小高性能的要求，但寄生带响应不明显，仿真结果不太理想。

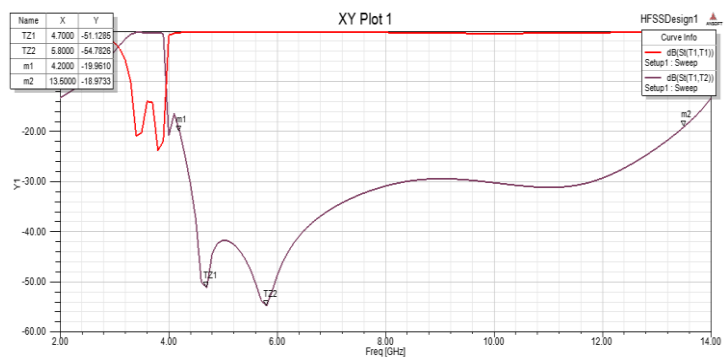


图 2-5 仿真结果

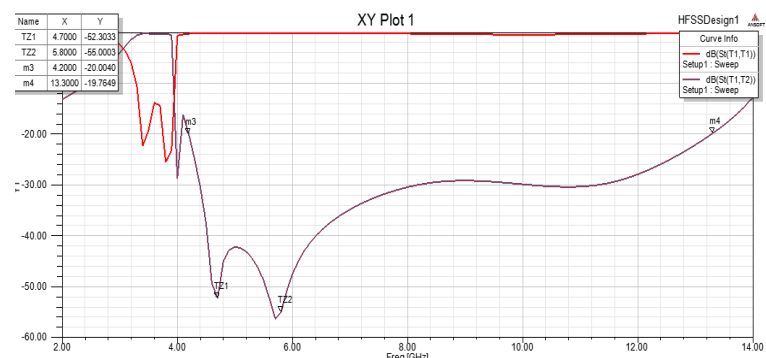


图 2-6 改正后的仿真结果

于是，保持原有的模型，将模型的尺寸数据进行稍微修改之后，如图 2-6 所示：

从结果看，可发现没有多大的变化，依旧与上个仿真结果大体相同，没有达到预期的效果，这时候猜测可能是模型出了问题，于是，再重新建造模型，如图 2-7 所示：

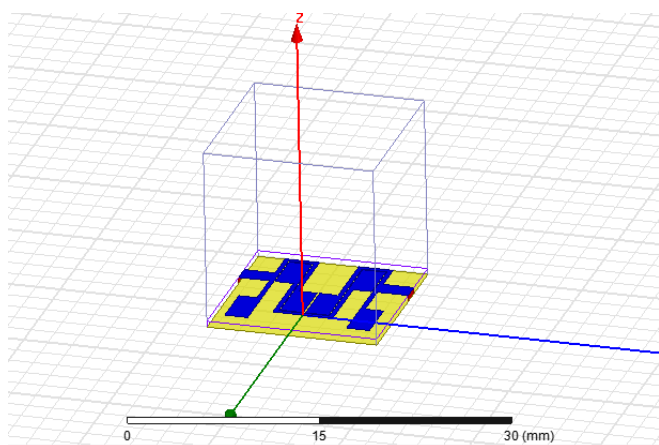


图 2-7 重建模型

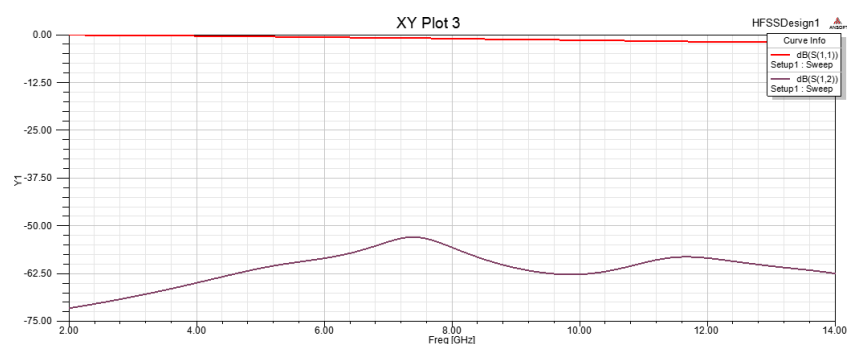


图 2-8 重建后模型的仿真结果

该模型中，空气腔的大小如图 2-7 所示，在这样的条件下得到的仿真结果如图 2-8 所示：

如图 2-8，两条线没有任何交集，没有达到所要求的，因此是错误的，造成错误的原因可能是空气腔的大小设置有误。于是，在此模型上稍加改造空气腔，改造后的模型如下图所示：

图 2-8 和图 2-9 的区别在于，改造后的模型的长和宽不再同基板的长和宽尺寸一样，空气腔的底面没有贴着接地板。重建模型的空气腔坐标为，(-11mm ,-7mm ,-0.508mm)，长宽高分别为 14mm ,14mm ,15mm。改造后的模型，它的空气腔坐标为 (-20mm ,-15mm ,-5mm)，长宽高分别为 30mm ,30mm ,20mm 。

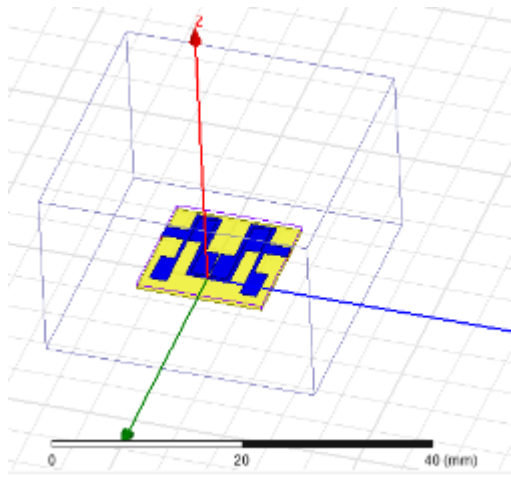


图 2-9 改造后的模型

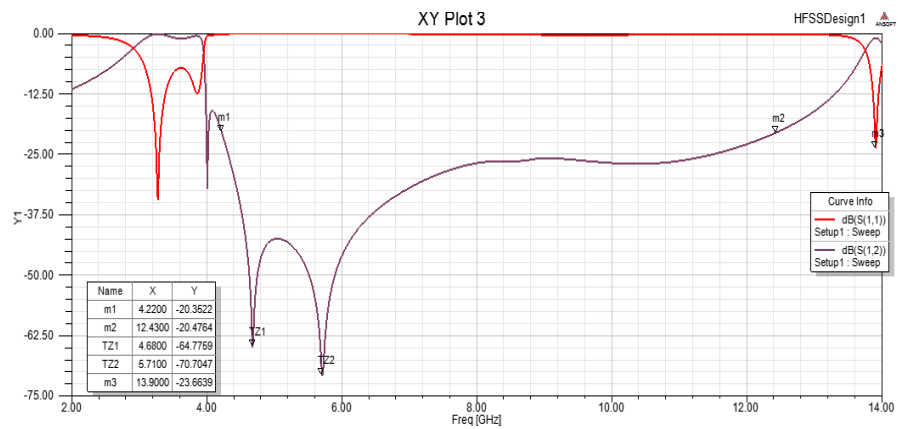


图 2-10 改造后模型的仿真结果

改造后的模型经运行之后得到的仿真结果如图 2-10 所示：

如图 2-10 所示，从 4.2GHz 到 12.5GHz 的频段内，阻带抑制小于-20dB，阻带很宽，并且发生寄生响应的中心频率为 13.9GHz，达到谐波的 3.92 倍频。这与本文初衷大体相同，达到了设计的三个目的，因此，这次的仿真结果尚可。

若对这次模型还有怀疑，不妨再做一次实验，验证一下，将该模型再一次重新做出，在 HFSS 中得到的模型，如图 2-11 所示，将这一次的模型运行，得到结果如图 2-11 所示：

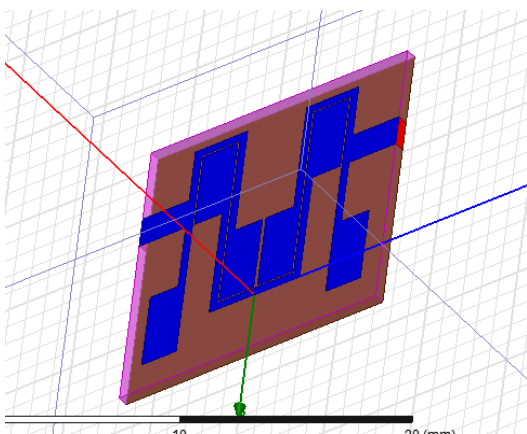


图 2-11 重新建立之后的模型

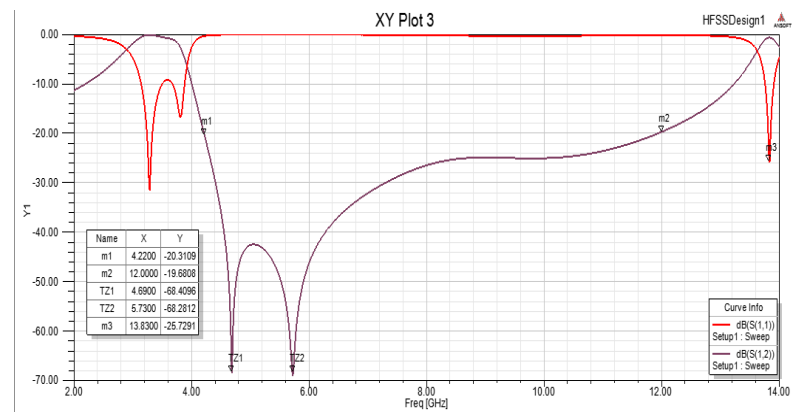


图 2-12 仿真结果

将图 2-12 与图 2-10 作比较，发现阻带要稍微窄些，但仍不妨碍阻带抑制。于是，改造后的模型是符合要求的。

3. 加工与测试

将实物加工出来后，如图 3-1：

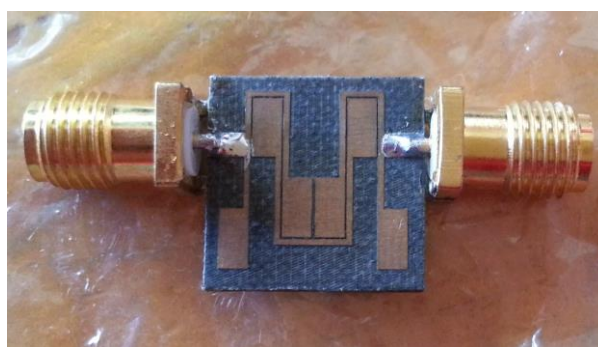


图 3-1 滤波器实物

将滤波器实物与矢量网络分析仪连接，对滤波器的性能进行实测，如以图 3-2 所示：实测的结果如图 3-3 所示：



图 3-2 实测

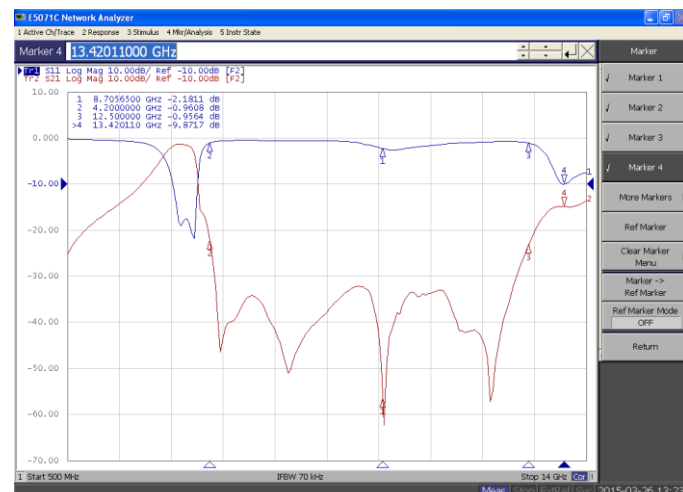


图 3-3 实测结果

如图 3-3, 在 4.2GHz 到 12.5GHz 的范围内, 形成宽阻带并且阻带抑制都低于-20dB, 在 13.42GHz 处产生寄生响应, 是基频的 3.78 倍, 这与理论值中心频率为 13.9GHz 以及寄生带达到 3.92 倍频有略微偏差。理论上基板的厚度为 0.508mm, 实际上为 0.526mm, 这是造成误差的重要因素之一, 其他误差也有接口处接触不良的因素。不过总体看来还是达到了预期效果。

4. 总结

在本文中, 结合传输零点和三阶交叉耦合的两个原则, 实现具有宽阻带的交叉耦合结构的滤波器的小型化设计, 并利用 HFSS 软件对其模拟。从仿真结果能看出, 在 2GHz 到 14GHz 的频段内, 阻带抑制都小于-20dB, 在带外高端处产生了两个传输零点, 并且寄生通带大约位于 14GHz 处。之后通过加工, 再实测, 发现误差较小, 且滤波器实际尺寸非常小, 达到了小型化、高性能要求。它突出了交叉耦合滤波器结构的优越性, 具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 冯文杰.小型化微带带通滤波器和平面魔 T 结构的设计与分析[D].南京理工大学, 2010.
- [2] 胡昌海.小型化微带带通滤波器的设计[D].西南交通大学研究生学位论文,2014.
- [3] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍.射频通信电路设计[M].科学出版社,2010.11.