

文章编号: 1001-893X(2007)02-0051-04

# 基于交指谐振结构的微带低通滤波器改进设计<sup>\*</sup>

蒲 洋, 刘长军, 闫丽萍, 范如东

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

**摘 要:**提出一种微带低通滤波器改进设计方法。滤波器本身采用经典方法设计, 通过在输入输出端口上添加交指型谐振器构成带阻滤波器, 可将滤波器的适用带宽拓展 50% 以上。采用的交指型谐振器由 8 根容性交指和 1 根感性的高阻抗线并联而成, 通过调整交指长度, 可以方便地调节谐振器的谐振频率。设计并制作了两种改进结构, 数值模拟和测量结果表明: 通过引入交指结构, 可以有效抑制微带低通滤波器的寄生通带, 并且可以通过级联多个交指谐振器进一步扩展滤波器的适用频带。该设计方法还可用于带通等其他类型微带滤波器的寄生通带抑制。

**关键词:**微带滤波器; 交指结构; 寄生通带抑制

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A

## Improved Design of Microstrip Low-pass Filter Based on Interdigital Resonator

PU Yang, LIU Chang-jun, YAN Li-ping, FAN Ru-dong

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract** An improved microstrip low-pass filter is proposed in this paper. The filter is designed by classical method with compact interdigital resonators at both input and output ports, which can extend the operating frequency bandwidth more than 50%. Each resonator consists of 8 interdigital capacitive fingers in parallel with a high-impedance straight line inductor, and it can be conveniently tuned at the desired resonance frequency by adjusting the finger length. The improved filter has been simulated, fabricated and measured. The results show that the proposed method can efficiently suppress the parasitic pass-band as well as extend the operating frequency bandwidth. The method can be also applied to band-pass filter design to suppress the parasite pass-band.

**Key words** microstrip filter; interdigital structure; parasitic band suppression

### 1 引 言

微带滤波器由于具有成本低、体积小、重量轻、易于共形等优点, 广泛应用于各种微波电路中。目前, 关于微带滤波器设计已经形成了一套较为完善的设计理论<sup>[1, 2, 3]</sup>。随着计算机辅助设计软件的发

展, 设计者可快速进行数值模拟, 检验设计的正确与否, 及时修改设计方案, 缩短设计周期。微带滤波器设计通常按照中心频率或截止频率进行, 当信号频率远离设计频率时, 滤波器性能将发生变化, 不再满足期望的滤波性能。例如本文讨论的微带支节型低通滤波器, 各个支节长度通常选取为截止频率下波长的  $1/8$ , 如果工作频率改变, 相应的波长也将发生

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2006-06-17; 修回日期: 2006-10-26

变化,各个支节的长度将不满足  $1/8$  波长的要求,这将导致阻带内出现周期性的寄生通带。

这种寄生通带现象在大多数微带滤波器中均会出现。一般的解决方案是级联多个滤波器在不同频段上滤波,从而抑制寄生效应,该方法的缺点在于将占据更多的电路板空间,不利于小型化设计。另一种目前较为流行的设计方法是通过在地板上腐蚀周期性的穿孔,构造 EBG (Electromagnetic Band Gap) 结构<sup>[4,5,6]</sup>。该方法可以设计高性能且结构紧凑的滤波器,但是通常需要悬置安装,由于电磁波会通过地板的穿孔辐射,不利于系统的电磁兼容设计。

本文提出一种采用交指结构抑制微带滤波器寄生通带的方法,并以微带支节型低通滤波器为例,通过分别在端口上级联 2 个、4 个交指结构抑制寄生效应。数值模拟和测试结果均验证了该方法的可行性和可靠性。该方法简单易行,只需增加交指结构谐振电路,不需要对原有滤波电路进行设计上的改动。在不显著增加滤波器面积的情况下,可以拓展微带低通滤波器的工作带宽达到 50% 以上,并且可以用于带通滤波器等其他微带结构的滤波器,具有良好的应用前景。

## 2 微带线交指结构讨论

交指型谐振器<sup>[7,8,9]</sup>是一种结构紧凑的微带器件,它可以视为交指电容和高阻抗线电感的组合。图 1 所示的高阻抗线是一种最简单的微带电感,它可以提供较小电感,一般而言,高阻抗线的电感量不超过 3 nH<sup>[1]</sup>。图 2 为交指电容<sup>[10]</sup>的结构图,它可以视为多组微带电容的并联结构,可以大幅度提高电容。

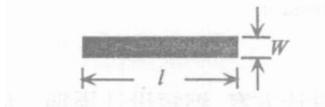


图 1 高阻抗线

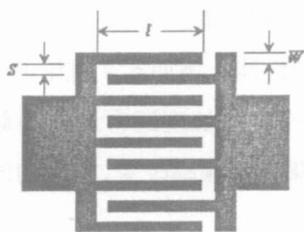


图 2 交指电容

对于图 1,设高阻抗线的宽度、厚度、长度分别为  $W, t, l$ ,在微带线厚度  $t$  大于 3 倍趋肤深度的情况下,有近似公式<sup>[1]</sup>:

$$L(nH) = 0.2 \cdot \left[ \ln\left(\frac{l}{W+t}\right) + 1.193 + 0.2235 \frac{W+t}{l} \right] \cdot K_g \quad (1)$$

其中  $l$  的单位为 mm,  $K_g$  是考虑到基板影响的修正因子,基板厚度  $h$  减小,高阻抗线的电感也随之减小,在一阶近似的情况下,  $K_g$  可用式(2)<sup>[1]</sup>估计:

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln \frac{W}{h}, \left(\frac{W}{h} > 0.05\right) \quad (2)$$

对于图 2,设交指长度为  $l$ ,交指宽度为  $W$ ,缝隙宽度为  $s$ ,为了获得最大的电容,取交指宽度等于缝隙宽度  $W = s$ ,并假定基板厚度  $h$  远大于交指宽度  $W$ ,可用式(3)估计交指电容为<sup>[1]</sup>

$$C(pF) = 3.937 \times 10^{-2} K(\epsilon_r + 1) [0.11(n-3) + 0.252] \quad (3)$$

其中  $l$  的单位为 mm,  $n$  为交指数,  $\epsilon_r$  为基板的相对介电常数。

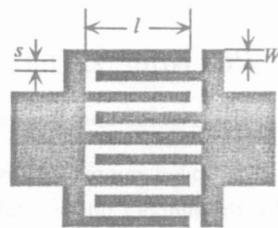


图 3 交指型谐振器

结合图 1 和图 2 的结构,得到如图 3 所示的交指型谐振器<sup>[7]</sup>,可以看出它是由 8 根容性交指和 1 根感性的高阻抗线并联而成的 LC 并联谐振电路,其谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4)$$

通过调节交指长度  $l$ ,由式(1)、(3)可知交指型谐振器的电容  $C$  和电感  $L$  也随之改变,从而调整谐振频率。对于图 3 的结构,如果  $W = s = 0.2$  mm,基板高  $h = 0.8$  mm,相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ ,改变交指长度  $l$  从 1.4 mm 变化到 2.8 mm (步长为 0.2 mm),数值模拟结果如图 4 所示。从图中可以看出,随着交指长度  $l$  的增加,谐振频率逐渐降低, -10 dB 阻带带宽变窄。交指型谐振器具有带阻滤波器的特性。

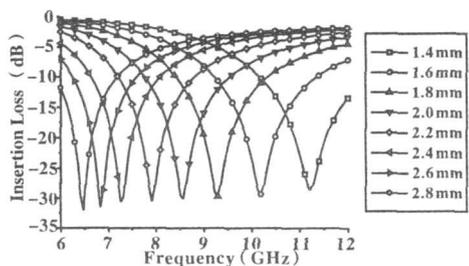


图 4 不同长度交指谐振器的插入损耗

### 3 经典微带低通滤波器设计

支节型微带低通滤波器作为经典结构,已经形成了一套成熟的设计理论<sup>[1,2,3]</sup>。首先设计由电容、电感组成的集中参数元件滤波电路,然后通过 Richard 变换和 Kuroda 法则转换为相应的微带结构。

本文设计的微带滤波器为 Chebyshev 型 3 阶低通滤波器,截止频率为 3 GHz,通带内波纹为 0.5 dB,其结构参数如图 5(a)所示,各并联、串联支节的长度均为相应波长的 1/8。图 5(b)为实际加工的滤波器,其基板厚度  $h = 0.8 \text{ mm}$ ,相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ 。采用 Agilent 8362B 矢量网络分析仪测量微带低通滤波器特性。图 5(c)为数值模拟和测量结果的比较,从图中可以看出两条曲线基本吻合。该滤波器在 0~8 GHz 的范围内可以正常工作。随着信号频率继续增加,滤波器的性能明显恶化,在阻带内出现寄生通带。

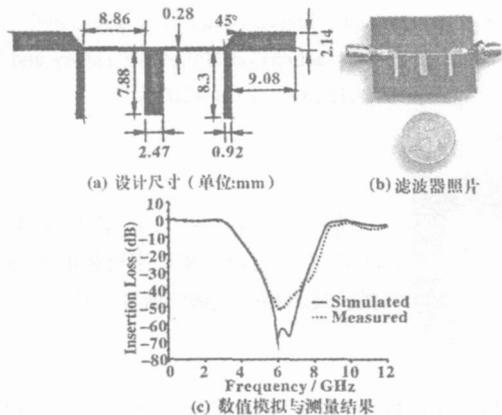


图 5 经典微带低通滤波器

### 4 改进型微带低通滤波器设计

由微带低通滤波器设计理论可知,寄生通带将出现在  $3f_c \sim 5f_c$ ,从图 5(c)可以看出,滤波器在 8 GHz 以上的频率范围已不能正常工作,则采用的交指结构(图 3)需谐振在 8 GHz 以上的频率。分析图 4 的数值模拟结果,在交指宽度等于缝隙宽度  $W = s$

$= 0.2 \text{ mm}$  的条件下,交指长度  $l = 1.4 \text{ mm}, 1.6 \text{ mm}, 1.8 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm}$  时,谐振频率均高于 8 GHz。由于交指结构的阻带带宽有限,需通过级联的方式连接几个不同谐振点的交指谐振器共同抑制寄生通带,达到宽带滤波的要求。

本文设计并制作了两组改进型微带滤波器,其中一组级联 2 个交指结构  $l = 1.8 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm}$ ,称为改进型 I 如图 6(a)所示;另一组级联 4 个交指结构  $l = 1.4 \text{ mm}, 1.6 \text{ mm}, 1.8 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm}$ ,称为改进型 II 如图 7(a)所示。交指结构分别连接在滤波器的输入输出端口上。图 6(b)和图 7(b)分别为制作的两种改进结构的滤波器照片,其基板厚度  $h = 0.8 \text{ mm}$ ,相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ ,从图中可以看出,添加的交指结构只占据很小的电路板面积,有利于紧凑结构的设计。图 6(c)表示改进型 I 的数值模拟与测量结果的比较,通过添加 2 个交指结构,有效拓展了滤波器的工作带宽。图 7(c)为改进型 II 的数值模拟与测量结果的比较,可以看出,在添加 4 个交指结构的情况下,将滤波器的工作频段由原始的 0~8 GHz 扩展到 0~12 GHz。通过级联多个交指结构,可以进一步提高微带滤波器的工作带宽,并且仅增加 3 mm 左右的长度。

数值模拟在 0~6 GHz 频段内与测量结果吻合较好,随着频率继续升高,两者出现一定差异。这主要是因为交指结构较为复杂,尺寸精度要求高,而微带加工精度有限,导致在高端频率时出现相对于低端频率更大的误差。比较图 4、图 6(c)和图 7(c)可以看出,交指结构仅在各自的谐振点附近影响滤波器的工作性能,对其它频段几乎没有影响,这一特性有利于简化设计过程,可以对滤波器和交指结构的结构参数进行独立设计。

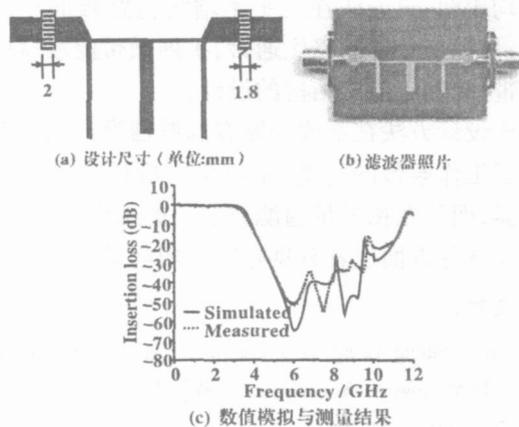


图 6 改进型 I 微带低通滤波器

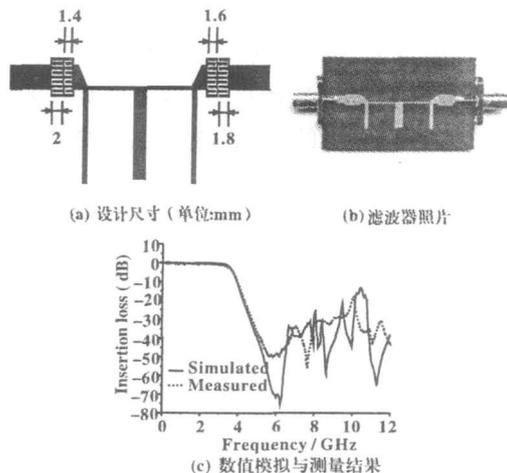


图 7 改进型 II 微带低通滤波器

图 8 为经典滤波器和两种改进结构的测量结果比较,从图中可以看出,交指谐振结构较好抑制了 8~12 GHz 内的寄生通带,有效拓展了滤波器的工作频带。

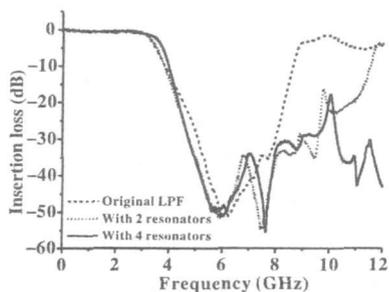


图 8 滤波器测量结果比较

### 5 结 论

本文提出一种采用交指结构抑制微带滤波器寄生通带的方法,讨论了交指型谐振器的设计原理,并在经典支节型微带低通滤波器的基础上,设计并制作了两种改进结构的低通滤波器。数值模拟与测量结果均表明:该方法在几乎不增大电路板面积的情况下,可以有效抑制寄生通带,扩展微带滤波器的工作频带,有利于紧凑结构的设计。

该设计方法在不改变原有滤波器设计的情况下拓展了工作频带的宽度,不仅可以应用在微带低通滤波器,而且在拓展带通滤波电路的工作带宽、提高带外衰减等方面也具有有良好的应用前景。

### 参考文献:

[1] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications* [M]. John Wiley & Sons, Inc. 2001: 77-108

[2] David M. Pozar. *Microwave Engineering* [M]. 2nd Edition. China Knowledge Net. <https://www.cnki.net>

John Wiley & Sons, Inc. 1998: 422-470

[3] Reinhold Ludwig, Pavel Bretchko. *RF Circuit Design Theory and Applications* [M]. Pearson Education, Inc. 2000: 201-263

[4] Dal Ahn, Jun-Seok Park. A Design of the Low-Pass Filter Using the Novel Microstrip Defected Ground Structure [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001, 49(1): 86-93

[5] Taesun Kim, Chulhun Seo. A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 2000, 10(1): 13-15

[6] Ian Rumsey, Melinda Piket-May. Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1998, 8(10): 336-338

[7] Zaid Aboosh, Adrian Porch. Compact Narrow Bandwidth Lumped Element Bandstop Resonators [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2005, 15(8): 524-526

[8] Ru-Yuan Yang, Min-Hung Weng. Novel Compact Microstrip Interdigital Bandstop Filters [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2004, 51(8): 1022-1025

[9] Michael J. Lancaster, Frederick Huang. Miniature Superconducting Filters [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996, 44(7): 1339-1346

[10] Gary D. Alley. Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1970, 18(12): 1028-1033

### 作者简介:



蒲 洋 (1981-), 男, 四川都江堰人, 硕士研究生, 目前主要从事射频电路、电磁场与微波技术相关领域的研究工作;

刘长军 (1973-), 男, 河北邢台人, 教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员。2000年毕业于四川大学, 获工学博士学位。已在 *IEEE Transactions*、《科学通报》等学术期刊发表论文多篇, 承担国家自然科学基金等多项科研项目, 主要研究领域为电磁场与微波技术、微波化学和计算电磁学, (电话) 028-85463882 (电子信箱) cjlh@scu.edu.cn;

闫丽萍 (1972-), 女, 河北张家口人, 副教授, 中国电子学会高级会员。2003年毕业于四川大学, 获工学博士学位。已在《电子学报》等学术期刊发表论文多篇, 主要从事电磁场数值计算、GA优化等方面的研究工作。