

The Design of a Miniaturized Interdigital LTCC Bandpass Filter

Dongchun Qiao, Yongsheng Dai

School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
Email: qiaodongchun@163.com, daiyongsheng1005@126.com

Received: Mar. 18th, 2016; accepted: Apr. 9th, 2016; published: Apr. 12th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A method of designing miniaturized interdigital bandpass filter based on LTCC technology was proposed, through loading ground capacitance at the end of interdigital transmission line, compressed the volume of resonator, to arrange the ground capacitance in discrete space, avoided the coupling interference between themselves, then cross-coupling was introduced between nonadjacent resonator, generated two transmission zeros on both sides of the passband and improved the sideband suppression. A interdigital bandpass filter with center frequency 2.3 GHz and bandwidth 200 M was designed, the insertion loss was less than 2.5 dB, passband fluctuation was better than 0.5 dB, HFSS was used to construct the 3D model and optimize the simulated results, then fabricated the filter with LTCC technology, the size was only 3 mm × 2 mm × 1.5 mm, the measured curves confirmed well with the simulated curves, verified the validity of the design.

Keywords

Bandpass Filter, Interdigital, Capacitance-Loading, Low Temperature Co-Fired Ceramic, Miniaturization, Cross-Coupling

小型化交指型LTCC带通滤波器设计

乔冬春, 戴永胜

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京
Email: qiaodongchun@163.com, daiyongsheng1005@126.com

收稿日期: 2016年3月18日; 录用日期: 2016年4月9日; 发布日期: 2016年4月12日

文章引用: 乔冬春, 戴永胜. 小型化交指型 LTCC 带通滤波器设计[J]. 无线通信, 2016, 6(2): 33-38.
<http://dx.doi.org/10.12677/hjwc.2016.62005>

摘要

本文提出了一种基于LTCC技术的小型化交指型带通滤波器的设计方法,通过在交指线末端加载对地电容,压缩了谐振器尺寸,将对地电容布置在分立的空间中,避免了电容间的耦合干扰,引入非相邻谐振器间交叉耦合,在通带两端各产生一个零点,提高了边带抑制。设计了一款中心频率2.3 GHz,带宽200 M交指型带通滤波器,插损小于2.5 dB,通带波动优于0.5 dB,利用三维仿真软件HFSS建模及优化,并利用LTCC工艺加工制造,尺寸仅为3 mm × 2 mm × 1.5 mm,经测试,实际测试曲线与仿真曲线符合较好,验证了设计的有效性。

关键词

带通滤波器, 交指型, 加载电容, 低温共烧陶瓷, 小型化, 交叉耦合

1. 引言

随着现代无线通信技术的发展及频谱资源的紧张,对微波滤波器小型化、低插损和高选择性的要求也越来越高。传统的同轴线、带状线及波导等构成的滤波器由于体积过大,不符合集成化的趋势,已不能满足市场需求,而体积小、低插损和高性能的多层微波滤波器的市场需求大大增加,该种类滤波器的设计与实现已成为当代微波技术的关键问题之一[1]。

低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic)是1982年开始发展起来的令人瞩目的整合组件技术,已经成为无源器件集成的主流技术。利用LTCC制备片式无源集成器件和模块具有诸多优点:布线密度高,布线层数没有限制;材料高频特性优异,气密性理想,热稳定性良好;可以采用高导电率的金、银或铜导体;内部可以埋置无源元件;可以制作空腔;形成非常规形状集成封装等[2]。

本文设计了一款中心频率为2.3 GHz,带宽200 M的交指型带通滤波器,通过加载对地电容及引入非相邻谐振级交叉耦合,与常规微带线结构滤波器相比,减小了滤波器体积,并且在通带两端产生两个传输零点,提高了滤波器的选择特性,最后利用三维仿真软件HFSS [3] (High Frequency Structure Simulator)对模型进行优化并利用LTCC技术加工制造。

2. 设计原理

2.1. 交指型滤波器结构

交指型滤波器有三种结构形式:终端开路式、终端短路式和电容加载式[4]。电容加载式交指型滤波器的结构如图1所示。其结构是在两个平行接地板间放入两组交叉的平行耦合线阵,每个杆一端短路,一端加载对地电容,杆1到杆n都为谐振器,在杆1及杆n末端接传输线作为输入输出端,其结构较短路型及开路型更加紧凑,同时他的第二通带会离通带更远些,如当线长为 $1/8\lambda_0$ 时,第二通带大约在四倍中心频率处[5] [6]。

2.2. 谐振器小型化

如图2所示,本文采用的交指线特征阻抗为 Z_0 ,其加载的电容的电纳值为 B ,则其输入阻抗为:

$$Z_{in} = \frac{1}{jB} // jZ_0 \tan \theta = \frac{jZ_0 \tan \theta}{1 - BZ_0 \tan \theta} \quad (1)$$

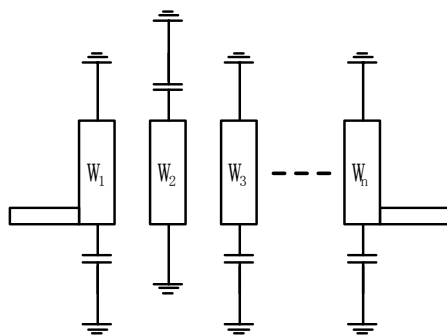


Figure 1. The structure of capacitance-loaded interdigital filter

图 1. 电容加载交指型滤波器结构图

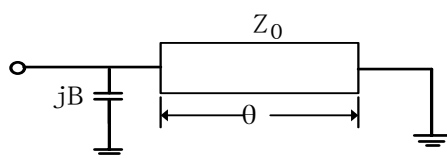


Figure 2. The structure of capacitance-loaded resonator

图 2. 电容加载型谐振器结构

电路谐振时有 $Z_{in} = \infty$ ，可得

$$\theta = \arctan \frac{1}{Z_0 B} \quad (2)$$

可得加载的电容值越大，短路枝节线的长度越短，可以利用这一点有效的减小谐振器体积[7] [8]。

2.3. 级间耦合分析

滤波器的插损由 Q_0 (未加载 Q 值) 决定， Q_0 值由谐振器的几何参数决定。外部 Q 值 (Q_e) 是滤波器设计的另外一个重要参数，它提供了滤波器与外部电路(输入输出电路)之间的关系，以保证它们之间的匹配。当输入输出阻抗相等时， $Q_{ei} = Q_{eo}$ 。谐振器间的耦合系数也是一个很重要的参数，耦合矩阵中具体的 M 值可以通过谐振器对应的频响来获得，其中耦合系数和外部品质因数与滤波器指标间的关系为：

$$Q_{ei} = Q_{eo} = \frac{C_1}{FBW} \quad (3)$$

$$M_{,n,n-1} = M_{N-n,N-n+1} = \frac{FBW}{\sqrt{C_n C_{n+1}}}, \quad n = 1 \sim \frac{N}{2} \quad (4)$$

式中， FBW 是滤波器的相对带宽， C 和 J 是原型电路中的元件参数， N 为滤波器的阶数。通过滤波器综合提取出滤波器谐振器间的耦合系数 M 以及输入输出谐振器的外部品质因数 Q_e 。对于两个互相耦合的谐振器，为了得到需求的耦合系数，需要调节其耦合结构参数来实现。耦合结构参数不同，将对应不同的耦合系数。HFSS 是 Ansoft 公司推出的三维电磁仿真软件，是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件，业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。因此谐振器间的耦合系数可以利用 HFSS 全波仿真的方法进行提取[9] [10]，其公式如下：

$$k = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (5)$$

其中, f_1 和 f_2 分别表示耦合谐振器的上谐振频率和下谐振频率, 且满足 $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$, f_0 为滤波器中心频率。

本文设计的带通滤波器的具体指标如表 1。

选用广义切比雪夫设计带通滤波器, 由设计指标确定阶数 $N = 4$, 为简便, 采用四个完全相同的谐振单元。四阶交叉耦合带通滤波器拓扑结构如图 3 所示。

利用 Matlab 可以求出滤波器的外部品质因数 Q_e 及耦合矩阵 M :

$$Q_e = 66.5 \tag{6}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.0925 & 0 & -0.0335 \\ 0.0925 & 0 & 0.0728 & 0 \\ 0 & 0.0728 & 0 & 0.0930 \\ -0.0335 & 0 & 0.0930 & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

由耦合矩阵可见主耦合路径为磁耦合, 辅耦合路径为电耦合, 即相邻谐振器为磁耦合, 谐振器 1、4 间存在交叉电耦合。确定了级间耦合系数之后, 在软件中利用参数扫描功能扫描谐振器对的间距, 间距的改变不仅会使得谐振器间耦合系数变化, 同时也会使谐振频率发生变化。通过软件扫描, 根据耦合系数, 最终确定了电耦合和磁耦合谐振器对的间距[11] [12]。

3. 滤波器仿真与测试

如图 4 所示, 该滤波器为多层分布结构, 其中上三层与下三层皆为接地金属板, 分别构成了两个封闭的屏蔽空间, 各谐振器的对地电容上下交错且分布在不同屏蔽空间内并别通过金属柱与短路枝节线相连, 这样可以有效的避免了电容板之间的耦合干扰, 谐振级间耦合将只由短路枝节线控制, 大大简化了调试工作。Z 型交叉耦合线跨接在 1、4 级谐振器之间, 通过调节与谐振器的距离, 来控制交叉耦合强度, 靠的越近, 耦合越强, 传输零点离通带越近, 反之越远。

Table 1. Performance parameter of the filter

表 1. 滤波器性能参数

参数	数值
中心频率	2.3 GHz
带宽	200 M
插入损耗	<2.5 dB
通带内波动	±0.5 dB
通带驻波	-15 dB
阻带衰减	<-35 dB 1 GHz < f < 2.0 GHz & 2.7 GHz < f < 6 GHz
尺寸	3 mm × 2 mm × 1.5 mm

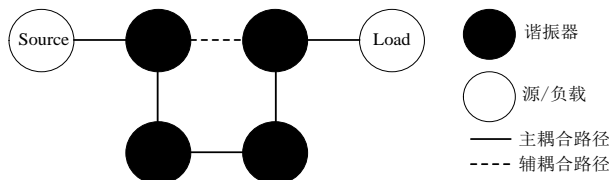


Figure 3. The topology graph of the filter

图 3. 滤波器拓扑结构图

根据前面的理论与调试, 最终在 HFSS 中得到仿真波形如图 5 所示, 各项指标均符合要求, 且留有冗余量。

总体设计完成后, 采用相对介电常数 13.3、损耗角 0.002 的陶瓷作为介质, 厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的银作为导体, 利用 LTCC 技术加工制造, 其样品如图 6 所示, 利用 Agilent 8719ET 网络分析仪测量的散射参数特性如图 7, 与仿真曲线相比, 其通带性能及驻波一致性较好, 低端阻带抑制较好, 高端阻带有上扬趋势, 不过均达到或接近指标要求, 通带为 $2.2\ \text{GHz}\sim 2.4\ \text{GHz}$, 插损小于 $2.2\ \text{dB}$, 驻波优于 $16\ \text{dB}$, 在 $1\ \text{GHz}\sim 2\ \text{GHz}$ 和 $2.7\sim 6\ \text{GHz}$ 内, 阻带衰减达到 $33\ \text{dB}$, 尺寸仅为 $3\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 。

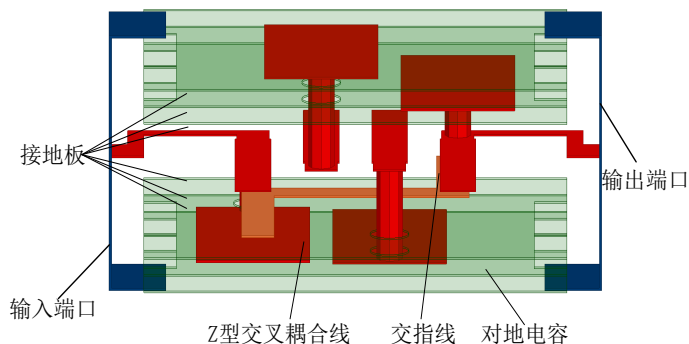


Figure 4. The 3D structure of the filter

图 4. 滤波器三维结构

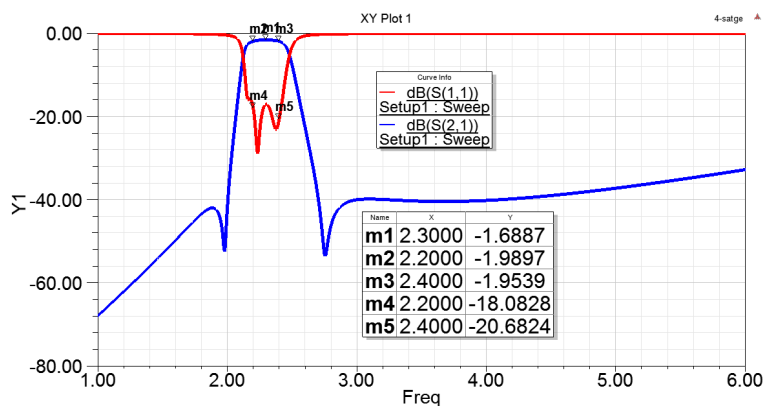


Figure 5. The simulated curves of the interdigital filter

图 5. 交指型滤波器仿真曲线

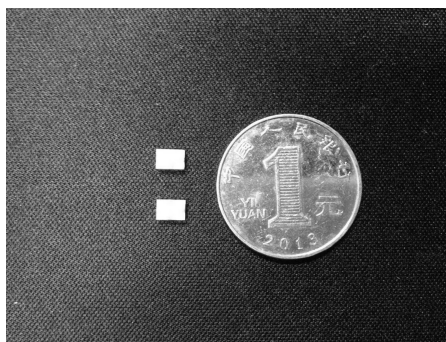


Figure 6. Photograph of the fabricated sample

图 6. 样品照片

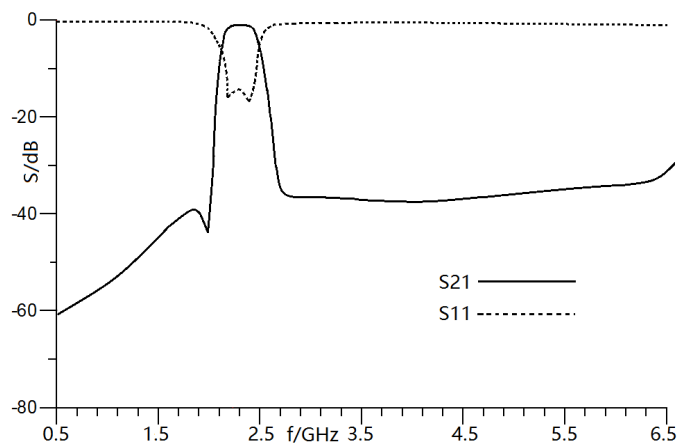


Figure 7. The curves of the fabricated sample

图 7. 实物测试曲线

4. 结论

本文提出了一种小型化交指型带通滤波器的设计方法, 并利用 LTCC 工艺加工实现, 通过加载接地电容, 减小了滤波器的体积, 将加载电容隔离在不同空间, 减少了耦合源, 降低了调试难度, 并引入级间交叉耦合, 在通带两端产生两个传输零点, 提高了滤波器带外性能, 经验证, 该设计科学规范, 具有广泛的应用前景。

基金项目

国家重点基础研究发展 973 计划项目资助(No. 2009CB320201); 国家国防重点实验室基金项目资助(No. 9140C1402021102)。

参考文献 (References)

- [1] 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, 1972.
- [2] 李雁, 戴永胜. 一种基于 LTCC 技术的 UHF 波段高性能带通滤波器[J]. 固体电子学研究进展, 2014, 34(4): 367-380.
- [3] 陈凯, 宋长宝, 杨景曙. 基于交指结构的可调带通滤波器的设计[J]. 微电子学, 2012, 42(3): 327-330.
- [4] 岳义威, 延波. X 波段 LTCC 交指型滤波器[J]. 微波学报, 2014, 30(3): 135-137.
- [5] 陈军, 朱晓维, 居万晨. X 波段微带交叉耦合带通滤波器的设计[J]. 微波学报, 2014, 30(2): 54-57.
- [6] Yasushi, H. (2008) Super-Compact Planar Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filter Composed of Capacitor-Loaded E-Shaped Electrodes. *European Microwave Conference*, 361-364.
- [7] 乔冬春, 戴永胜. 高性能电容加载 LTCC 带通滤波器的研究[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(12): 68-71.
- [8] 田增山, 王福江, 曾康健, 等. LTE 频段平行耦合微带线带通滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(3): 33-37.
- [9] 杨虹, 陈静, 刘云龙, 杨浩澜. 一种基于多模谐振器的超宽带带通滤波器设计[J]. 电子元件与材料, 2015(34): 61-65.
- [10] 魏峰, 黄丘林, 史小卫, 等. 一种新型超宽带带通滤波器的设计与实现[J]. 微波学报, 2010(26): 48-51.
- [11] 程兴, 苏涛, 梁昌洪. 交叉耦合滤波器设计与传输零点的独立性分析[J]. 微波学报, 2006, 22(1): 34-38.
- [12] 陈世勇, 雷剑梅, 胡旭, 等. 一种具有传输零点的 Hairpin 带通滤波器设计[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(4): 145-147.