

# LTCC多级结构实现高性能微型带通滤波器的研究

戴永胜, 陈相治

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 提出了一种基于LTCC多级结构实现高性能微型带通滤波器的实现方法。该滤波器电路由6个由电感耦合的谐振腔组成。在一般抽头式梳状线滤波器设计的基础上,引入了交叉耦合,形成传输零点,并结合电路仿真以及三维电磁场仿真,辅之以DOE的设计方法,设计出了一种尺寸小、频率选择性好、边带陡峭、阻带抑制高的滤波器。实际测试结果与仿真结果吻合较好,中心频率为2.925 GHz,其1 dB带宽为170 MHz,在1~2.703 GHz频率上的衰减均优于35 dB,在3.147~6 GHz频率上的衰减均优于35 dB,体积仅为4.5 mm×3.4 mm×1.5 mm。

**关键词:** 高性能带通滤波器; LTCC; 谐振腔; 传输零点

中图分类号: TN911-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2014)08-0079-03

## Achievement of high-performance miniature bandpass filter based on LTCC multilevel structure

DAI Yong-sheng, CHEN Xiang-zhi

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** An implementation method of high-performance miniature bandpass filter based on LTCC multistage structure is proposed. The filter circuit is composed of six resonant cavities composed of inductive coupling. The transmission zeros were realized by cross-coupling. Based on the design of the tapped combline filter, a small size filter with high frequency selectivity, steep sideband and high stopband rejection was designed with the help of DOE, circuit simulation and 3-D EM simulation. The measured results of the filter agree well with the electromagnetic simulation. Simulation and measured results show that the bandpass filter has a central frequency of 2.925 GHz, the 1 dB bandwidth is 170 MHz, the stop-band attenuation is better than 35 dB at 1~2.703 GHz and 35 dB at 3.147~6 GHz. The final size of the fabricated filter is only 4.5 mm×3.4 mm×1.5 mm.

**Keywords:** high-performance bandpass filter; LTCC; resonant cavity; transmission zero

## 0 引言

随着无线通信和国防精密电子设备的发展,微波/射频领域的发展趋势愈来愈向高性能、低成本和小型化发展。在微波频段,运用LTCC(低温共烧陶瓷即低温共烧陶瓷)技术实现无源器件,如滤波器,采用三维集成的方式,具有结构紧凑,易于集成,设计方便等突出优势,因而成为这个领域的研究热点。带通滤波器是无线通信系统中的重要无源元件<sup>[1]</sup>。RF滤波器作为射频收发模块和无线通信系统中的重要无源元件,一直是微波射频领域研究的热点。LTCC技术具有三维集成的优势,从而在微波频带被广泛用于加工各种微波无源器件,实现了高度集成的无源元件。同时LTCC技术也是实现SIP和SOP技术的重要平台。基于LTCC技术设计的滤波器相比其他技术具有体积小,成本低,性能好,可靠性

高等优势,所以LTCC技术是未来无线通信系统的发展趋势<sup>[2-3]</sup>。随着无线通信系统的快速发展,频率资源越来越紧张,当滤波器被用在多个相邻的中心频率的系统中,为了减少相邻信道之间的相互干扰,需要用到边带陡峭和阻带抑制高的滤波器。尤其在一些复杂的尖端防御设备中,为了确保系统性能,系统对滤波器的电性能和尺寸有着特别苛刻的要求<sup>[4-5]</sup>。

本文设计了一种LTCC梳状线结构的六级带通滤波器的中心频率 $f_0=2.925$  GHz,通带宽度170 MHz,通带内起伏<1 dB,带内驻波<1.5,通过引入交叉耦合产生传输零点的方法在LTCC滤波器的设计中可以很好的实现<sup>[6-8]</sup>,从而达到具有边带陡峭和高抑制的高性能。而滤波器尺寸仅为4.5 mm×3.4 mm×1.5 mm。

## 1 理论分析

### 1.1 原理分析

图1是六阶谐振单元带通滤波器的电路图,该滤波

器的实现是基于六阶耦合谐振单元带通滤波器的原型<sup>[9]</sup>。

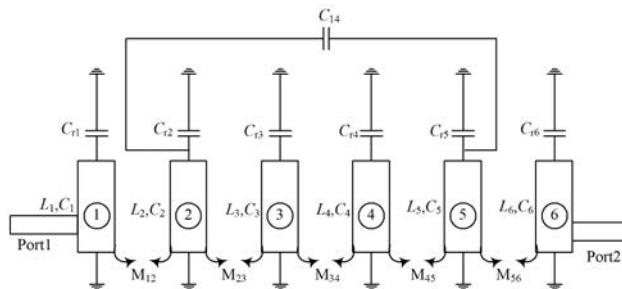


图1 六阶耦合谐振单元带通滤波器的电路图

$$L_i = \frac{l\pi u}{8 \operatorname{arch}(e^{\pi u/2b})} \text{ H} \quad (1)$$

$$C_i = \frac{8l\varepsilon \operatorname{arch}(e^{\pi u/2b})}{\pi} \text{ F} \quad (2)$$

$$C_{r_i} = \frac{l\varepsilon w}{d} \text{ F} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i(C_i + C_{r_i})}} \quad (4)$$

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

式中: $f_0$ 为滤波器的中心频率(单位:Hz); $w$ 为带状线的宽度; $b$ 为带状线上下两块接地板的距离; $l$ 为带状线的长度; $d$ 为相邻两根带状线间距; $\mu$ 为磁导率; $\varepsilon$ 介电常数; $f_1$ 和 $f_2$ 是利用HFSS的本征模求解器,设置的两个本征频率。

## 1.2 零点产生原理分析

微波电路中传输零点的形成方式有很多,例如信号通过不同的电路耦合形成反相抵消、通过一个串联谐振信号流入地、在主路加入并联谐振器进行全反射等,在这里只分析第一种情形,即利用交叉耦合原理形成传输零点<sup>[10-12]</sup>。图2是交叉耦合相位示意图。微波信号通过第一谐振级之后,其中一部分通过主路的第二谐振级、第三谐振级、第四谐振级、第五谐振级的磁耦合到第六谐振级,另一部分信号通过交叉路的电耦合从第二谐振级传输到第五谐振级。根据相位分析,信号通过磁耦合相移-90°,通过电耦合相移+90°,谐振频点的信号通过谐振器相移为0°,比谐振频率低的信号相移+90°,比谐振频率高的信号相移-90°。根据图2计算相位:对于比谐振频率低的信号,主路相位=-90°+90°-90°+90°-90°+90°-90°+90°=-90°,交叉路相位=-90°+90°+90°+90°-90°=+90°,两路信号反相抵消形成零点;然而对于比谐振频率高的信号,主路相位=-90°-90°-90°-90°-90°-90°-90°-90°=-90°,交叉路相位=-90°-90°+90°-90°-90°=+90°,两路信号也反相抵消形成零点,所以此结构在通带两边各有一个零点。

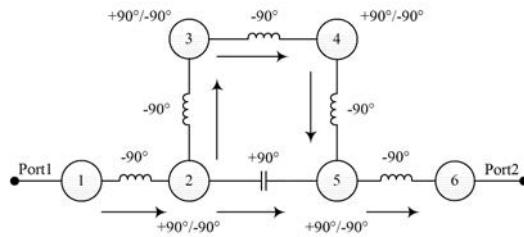


图2 交叉耦合相位示意图

## 2 三维实现方式

### 2.1 设计方法与流程

(1) 根据给定的技术指标,确定滤波器的级数,选择合适的电路拓扑结构<sup>[13-14]</sup>;

(2) 运用带状线计算公式以及HFSS的本征模求解器计算出单个谐振单元的大小;

(3) 利用HFSS和双模耦合系数提取的方法确定各谐振级间的耦合系数,从而确定各个相邻谐振级之间的耦合距离;

(4) 通过调整耦合电容精确控制零点位置,实现技术指标的衰减要求。使用HFSS软件优化仿真,得到六阶滤波器的三维模型;

(5) 运用DOE(Design of Experiment)的设计方法对模型的整体结构进行微调,得到性能优异的六阶滤波器的最终三维模型;

(6) 提取仿真数据,采用LTCC技术来制造该滤波器,并将测试的频率响应特性曲线与设计仿真结果进行比较,验证该滤波器设计方法的正确性。

### 2.2 六级滤波器的三维结构

图3是六级LTCC滤波器设计的内部三维结构示意图。设计该滤波器使用的陶瓷介电常数为9.2,损耗角正切为0.002。如图3所示,三维模型包括6层金属图形,其中第一层和第六层为接地层。第二层和第四层为加载电容层 $C$ 层,第三层是电感电容 $L, C$ 层,从图3中可以看出,第二、第三和第四层的金属可以等效为6个并联谐振单元。第五层为一个交叉耦合层,第五层的Z型交叉耦合结构与第二和第五谐振级之间形成交叉耦合,产生耦合电容 $C_{14}$ 。

## 3 仿真与测试结果

在完成整体设计之后,对模型进行的微调以满足指标要求,在相应的LTCC生产线完成加工,完成的滤波器样品和测试夹具如图4所示。图4是采用LTCC技术来实现滤波器设计的样品,该滤波器的加工c采用了相对介电常数为9.2,损耗角为0.002的陶瓷介质,共烧的金属为银,其共烧厚度控制在为10 μm左右。

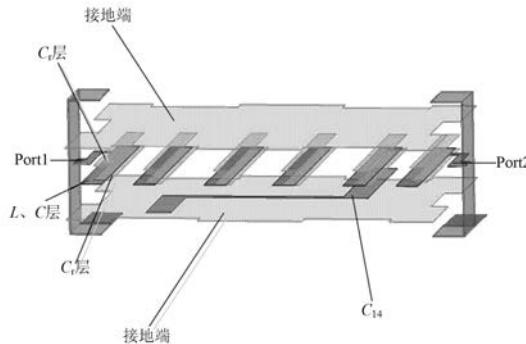


图3 六级基本型LTCC滤波器的内部三维立体结构示意图

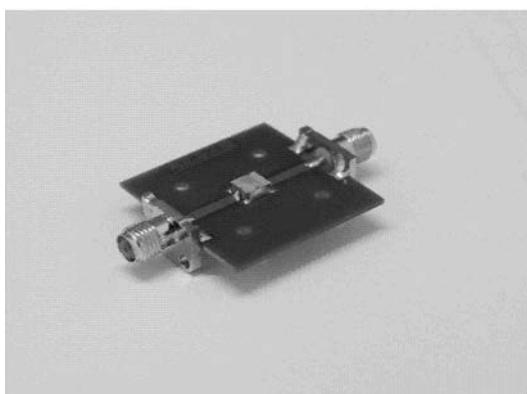


图4 滤波器实物及测试夹具

图5、图6分别是该滤波器的三维仿真曲线与实物测试曲线。利用安捷伦的矢网分析仪对该滤波器的S参数曲线进行相应的测试,从图5、图6可以看出,测试出的幅频特性曲线与三维仿真曲线的一致性比较好。从仿真结果来看,在通带2.84~3.01 GHz内插损均小于3.5 dB,带内驻波均小于1.5。低阻带从1~2.703 GHz频率上的衰减均优于35 dB。高阻带从3.147~6 GHz频率上的衰减均优于35 dB。测试曲线与仿真曲线基本一致。这种具有边带陡峭和高阻带抑制特性的高性能LTCC微型带通滤波器的尺寸仅为:4.5 mm×3.4 mm×1.5 mm。

#### 4 结语

本文基于六阶抽头式耦合谐振带通滤波器原型,在结构上对传统的抽头式带通滤波器进行改进,设计了一款具有边带陡峭高阻带抑制特性的高性能LTCC微型带通滤波器。在六阶带通原型基础上,引入交叉耦合结构,使得高低端阻带各产生了相应的传输零点,满足了系统对特殊频点高抑制的指标要求。生产出的滤波器测试曲线与三维仿真曲线吻合很好。此外该滤波器还具有尺寸小、结构简单和易于设计等优点,可以广泛应用于国防精密电子设备以及RF无线通信系统中,在微波通信系统中有着广阔的应用前景。

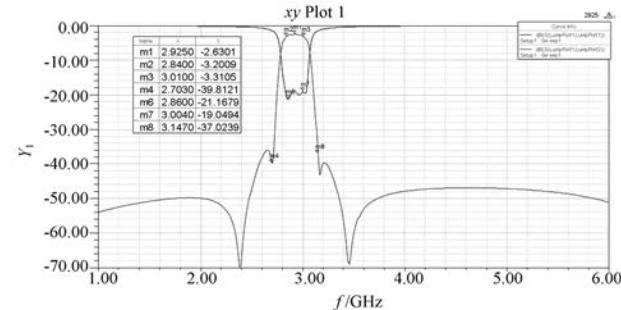


图5 滤波器的三维仿真曲线

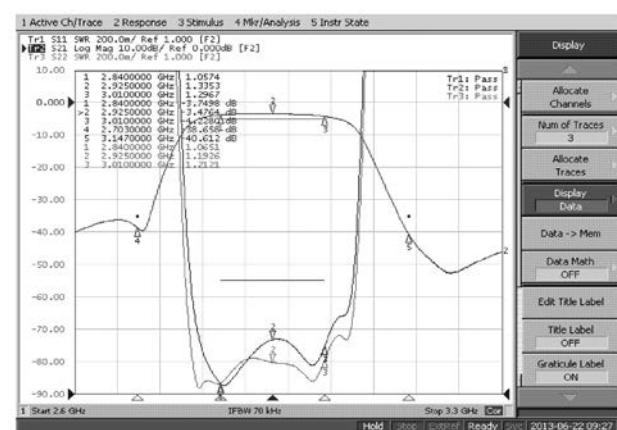


图6 滤波器的测试曲线

#### 参 考 文 献

- [1] LUCERO R, QUTTENEH W, PAVIO A, et al. Design of an LTCC switch diplexer front-end module for GSM DCS PCS applications [C]// Proceedings of 2001 Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2001: 213-216.
- [2] DAI Yong-sheng, TANG Xiong-xin, ZHOU Wen-kan, et al. A miniaturized LTCC low-pass filter based on the lumped circuit model [C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. [S.l.]: ICMMT, 2010: 1578-1580.
- [3] 李殷乔, 纪建华, 费元春, 等. 基于LTCC的Ka波段带通滤波器的设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2010, 30(3): 392-395.
- [4] DAI Yong-sheng, YAO Y F, LI Bao-shan, et al. Design and implementation of an LTCC filter with high stopband rejection [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. Singapore: IEEE, 2009: 51-54.
- [5] DAI Yong-sheng, LI Bao-shan, YE Zong-hua, et al. A miniaturized LTCC bandpass filter with low insertion loss and high image rejection within 6.5 to 7.1GHz frequency range [C]// Proceedings of Asia Pacific Microwave Conference. Singapore: IEEE, 2009: 1307-1309.
- [6] YEUNG L K, WU K L. A compact second-order LTCC bandpass filter with two finite transmission zeros [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(10): 2530-2535.

(下转第85页)

采用证书授权可以在很大程度上保证软件的安全性,但证书的生成通常需要网络和用户身份等基础设施或基本信息才能满足。根据设备的实际使用环境,我们可以如下特殊方式解决:

身份信息(Identity):通过设计一个独立的软件,提取设备的基本信息,包括设备网络地址、系统号和基址序列号(SSN)作为指纹信息,然后将采集到的指纹信息汇聚至工作机,即证书中心(CA),通过组合算法,将收到的三种信息生成惟一的一种信息,即三码合一。然后将生成的三码合一文件作为授权证书,发送给用户。

#### 4 结语

本文分析了中石油基层钻井工的作业环境,对其中繁琐的流程进行了深入研究,设计并开发了井控信息处理系统。该系统使用基于安卓操作系统的定制手持设备,将众多的纸质记录表格和复杂的公式、系数移植到了智能设备上,极大地简化了操作过程,节省了大量的人力和时间。数据库系统的使用则解决了传统记录中数据检索难、易丢失和保存难的缺陷。

受限于野外作业环境的恶劣对网络的影响,本系统尚未解决利用网络远程传输的问题,利用网络实现远程

传输和监控是本系统有待提高的方向。

#### 参 考 文 献

- [1] 索盖林.Android 开发入门指南[M].2 版.北京:人民邮电出版社,2009.
- [2] 余志龙.Android SDK 开发范例大全[M].北京:人民邮电出版社,2010.
- [3] 韩超,梁泉.Android 系统原理及开发要点详解[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [4] 李观华,范辉.J2ME 在移动通信程序中的应用[J].计算机应用,2003(3):124-126.
- [5] 廖永刚,余冬梅,张秋余.J2ME 架构与安全机制的研究[J].计算机工程与设计,2006(4): 575-577.
- [6] 王勤.计算机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [7] MEIER Reto.Android 高级编程[M].王超,译.2 版.北京:清华大学出版社,2010.
- [8] 刘扶松.Android 开发从入门到精通[M].北京:希望电子出版社,2012.
- [9] 杨丰盛.Android 技术内幕(系统卷) [M].北京:机械工业出版社,2011.
- [10] E2ECloud.深入浅出 Google Android[M].北京:人民邮电出版社,2009.

作者简介:高 翔(1974—),男,副教授。研究方向为计算机网络。

郭新东(1990—),男,硕士研究生。研究方向为计算机网络。

张凤兰(1988—),女,硕士研究生。研究方向为计算机体系结构。

管 伟(1992—),女,硕士研究生。研究方向为计算机网络。

(上接第 81 页)

- tions on MTT, 2003, 51(2): 337-341.
- [7] ANGC W, LIN Y C, CHANGC Y. Realization of transmission zeros in combline filters using an inductively coupled ground plane [J]. IEEE Transactions on MTT, 2003, 51(10): 2112-2118.
- [8] LEUNG W Y, CHENG K K M, WU K L. Multilayer LTCC bandpass filter design with enhanced stopbandcharacteristics [J]. IEEE Microwave and WirelessComponents Litters, 2002, 12 (7): 240-242.
- [9] POZAR D M. 微波工程[M].3 版.北京:电子工业出版社,2006.
- [10] TANG C W, LIN Y C, CHANG C Y. Realization of transmission zeros in combline filter using an auxiliary inductively coupled ground plane [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Tech, 2003, 51(10): 2112-2118.
- [11] JOSHI H, CHAPPELL W J. Dual-band lumped-element bandpass filter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Tech, 2005, 53(5): 1787-1791.
- 2006, 54(12): 4169-4177.
- [12] DAI Yong-sheng S, YE Zong-hua, LI Bao-shan. A miniaturized and low insertion loss LTCC Filter with two finite transmission zeros for bluetooth application [C]// IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Art of Miniaturizing RF and Microwave Passive Components. Chengdu: IEEE, 2008: 132-134.
- [13] SONG H S, LEE Y S. A miniaturized 2.4GHz band multi-layer band-pass filter using capacitively loaded  $\lambda/4$  slow-wave resonator [C]// IEEE MTT-S Int Microwave Symposium Digest. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2003, 1: 515-518.
- [14] RAMBABU K, BORNEMANN J. Simplified analysis technique for the initial design of LTCC filters with all-capacitive coupling [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Tech, 2005, 53(5): 1787-1791.

作者简介:戴永胜(1956—),男,IEEE 高级会员,IEEE MTT Transactions 和 IEEE MWCL 审稿人,国家“973”项目“系统级封装的基础研究”项目专家组成员,硕士生导师,副教授。主要研究方向为微波毫米波集成电路、微波子系统、天线阵列等。

陈相治(1990—),男,在读硕士研究生。主要研究方向为微波毫米波集成电路、电磁场与微波技术等。

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>