

一种基于 LTCC 技术多层带通滤波器的仿真设计

赵慧敏¹ 于洪喜²

(1. 西安空间无线电技术研究所, 西安 710000; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100081)

摘 要 文章从耦合矩阵出发, 用发夹型谐振器实现了一种多层 LTCC 三级带通滤波器的结构, 并通过将电磁场数值计算与电路结构仿真相结合, 引入了一个适合于多级 LTCC 带通滤波器的设计方法。在利用电磁场仿真软件对滤波器中的谐振器及其耦合结构做出详细分析的基础上, 得到三级切比雪夫响应带通滤波器; 进一步在谐振器之间引入源耦合, 在阻带位置中产生传输零点, 从而增大传输零点附近的衰减。

关键词 LTCC 多层带通滤波器

0 引言

微波滤波器是现代微波技术中许多设计问题的中心, 利用它们可以分离或者组合各种不同频率的信号。随着电子整机系统向小型化、轻型化方向发展, 平面耦合滤波器因其面积过大, 已经越来越不能适应现代无线移动通信系统和微波元器件的要求。多层 LTCC 带通滤波器以其体积小、质量轻、成本低等优点, 在微波系统中得到了越来越多的应用。但目前此技术还不是完全成熟, 只有美国、日本等少数厂家掌握, 国内处于起步阶段。根据所掌握的资料, 国内目前对 LTCC 滤波器以及其他产品的研制开发在未来几年将进入一个高峰期。

1 LTCC 概述

所谓 LTCC (Low Temperature Cofired Technique) 技术, 就是将低温烧结陶瓷粉制成厚度精确且致密的生瓷带, 在生瓷带上利用激光打孔、微孔注浆、精密导体浆料印刷等工艺制出所需要的电路图形, 并将多个无源元件埋入其中, 然后叠压在一起, 在 900℃ 下烧结, 制成三维电路网络的无源集成组件, 也可制成内置无源元件的三维电路基板, 在其表面可以贴装 IC 和有源器件, 制成无源/有源集成的功能模块。总之, 利用这种技术可以成功地制造出各种高技术 LTCC 产品。其制作过程可以表示为如图 1 所示的流程^[1,2]。

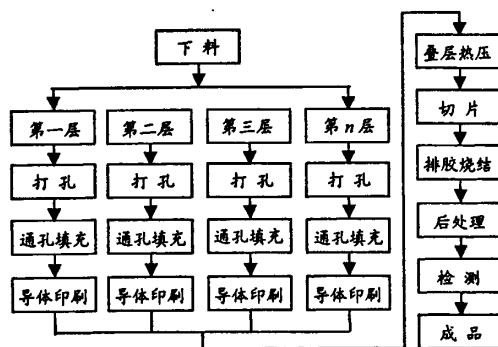


图 1 LTCC 工艺流程

2 滤波器的设计

首先结合提出的滤波器指标,即 $f_0 = 5\,000\text{MHz}$, $BW = 300\text{MHz}$,当 $Q = 300$ 时,得出耦合矩阵如图2所示^[1,3]。

$$R_1 = R_2 = 1.1$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.8578 & 0 \\ 0.8578 & 0 & 0.8578 \\ 0 & 0.8578 & 0 \end{bmatrix}$$

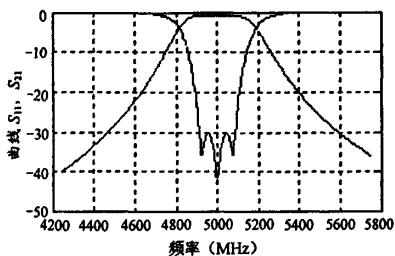


图2 300MHz 带宽理想滤波器

另一方面,考虑到仿真结果与实际加工出来的滤波器的偏差,还计算得出一个 $f_0 = 5\,000\text{MHz}$ 、 $BW = 500\text{MHz}$ 、纹波为 $=0.01$ 的滤波器耦合矩阵,如图3所示。

$$R_1 = R_2 = 1.5893$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1.2798 & 0 \\ 1.2798 & 0 & 1.2798 \\ 0 & 1.2798 & 0 \end{bmatrix}$$

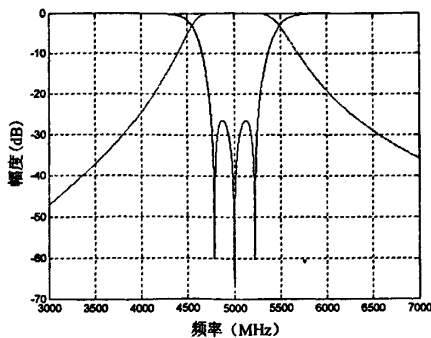


图3 500MHz 带宽理想滤波器

滤波器的分解结构如图4所示。

图中的斜线标记部分为金属膜,其厚度为 $10\mu\text{m}$ 。上、下接地屏蔽金属膜之间共有8层介质,其介电常数为5.9,每层介质厚度为 0.187mm 。上、下接地金属膜由前后侧面的金属屏蔽涂层相连接。三级谐振器采用发夹谐振器,分别分布在L4、L5、L6层,采用抽头式输入输出方式。

首先确定单个谐振器的尺寸。由于发夹谐振器是半波长谐振器的一种变形,所以,理论上如图5所示^[4]。

谐振器的总长度即 $2a + g$ 要等于在中心频率 5GHz 下在规定介质中半波长的长度,容易算出 $2a + g = 12.3423\text{mm}$ 。在其他条件不变的情况下,减小 g 将增加谐振器的自耦合,降低将来滤波器的带宽,增加滤波器的插入损耗。同时,在上下层的层间耦合中,由于 g 的不同,上下谐振器之间的耦合面积也

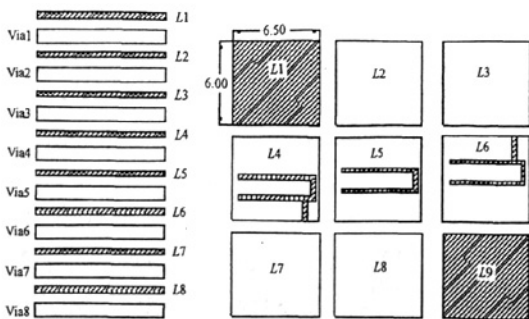


图4 滤波器分解结构

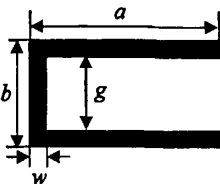


图5 谐振器示意图

就不同,在同样的间距下,具有小的 g 值的谐振器之间的耦合也要小。由于自耦合及杂散电容的存在,谐振器的总长度会与计算出来的理论值存在偏差。为了更精确地逼近实际数值,要通过在软件中建模的方法来确定谐振器的长度。图 6 给出了一个在 CST 中的扫频结果。

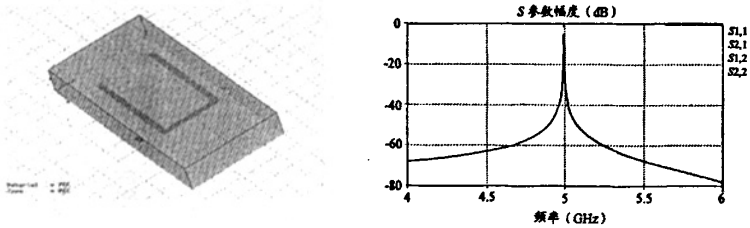


图 6 谐振器扫频结果

在谐振器的两端加两段微带线引到端口,之所以与谐振器之间有一段距离是为了保证所加的耦合为弱耦合,不会影响到谐振器本身的性能。源激励是否为弱耦合的标准是谐振频率是否还随间距的变化而变化。

接下来的工作要根据耦合矩阵中的耦合系数来确定谐振器间的间距。

将两个位于不同层面上的谐振器靠近放置,二者就会产生耦合,两谐振器间的距离 s (图 7) 决定着相互的耦合大小。输入输出端使用弱耦合,是为了减小激励源对谐振频率及耦合系数的影响。然后对上述模型在仿真软件中进行扫频仿真,可以得到对应的频响特性。调整间距 s ,直到满足既定的耦合系数。

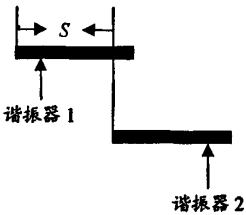


图 7 谐振器间距

耦合系数确定以后,对应的谐振器之间的间距 s 也就可以确定。采用同样的方法确定输入输出抽头的位置,就得到最后的滤波器。

对应于前面的第一个耦合矩阵,得到的滤波器和仿真结果如图 8 所示,定型尺寸为 $6.5\text{mm} \times 7.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 。

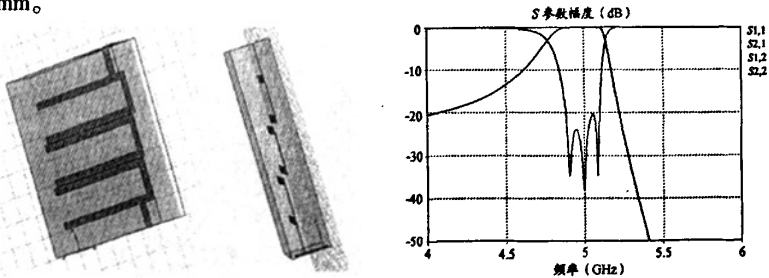


图 8 第一个滤波器结构的仿真结果

下面利用源耦合在阻带中产生传输零点。

不同层的谐振器可以有两种放置方法:一种是开口朝向相同方向;另一种是开口朝向相反方向。在这两种情况下,通过在软件中扫频可以发现,在相同的间距 s 下,反方向放置的谐振器间的耦合要远大于同方向放置的谐振器间的耦合。两臂间的间距设为 s ,那么,随着 s 的增大,两谐振器间的耦合也在发生变化。通过仿真可以得出,当 s 增大时,可以出现如图 9 所示的耦合现象。

图中, k 为两谐振器的耦合系数, s 为两臂间距。

在 $0 \sim a$ 阶段,耦合从零逐渐增大到某一个极值,然后又逐渐减小到零,同时,在两个谐振尖峰的左边,出现一个传输零点,且传输零点随着 s 的增加而逐渐逼近 f_0 。

在 a 点,从仿真曲线来看,两个谐振器间的耦合很小,近似于 0。

在 $a \sim +\infty$ 阶段,耦合又从零逐渐增加到某一个极值,然后随着 s 的增大而又逐渐变小,直至无穷

小。同时在两个谐振尖峰的右边,出现一个传输零点,传输零点的位置随着 s 的增大而逐渐远离中心频率 f_0 。

在平面滤波器中,由于所有的谐振器都处于一个平面内,在级联结构下,激励源与隔级谐振器之间的源耦合可以避免;但是在这里的三维结构中,由于层与层之间的距离很近(0.187mm)且上下两极谐振器为了满足耦合系数 k 而在水平方向上重合,因此,激励源与隔级谐振器间的距离也不大,源耦合不能忽略。由于源耦合的存在,才使得谐振器的中心频率附近产生了传输零点。

对于既定的耦合系数 k ,结合上面提到的引入源耦合后的发夹谐振器的特点,可以在滤波器的通带外引入传输零点,从而大大提高滤波器的性能。根据要求,可以在通带左边引入传输零点,也可以在通带右边引入传输零点,还可以同时在通带的左、右两边引入传输零点。

对应于第二个耦合矩阵,在通带两边各实现一个零点,最终定型尺寸为 $6\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$,如图 10 所示。

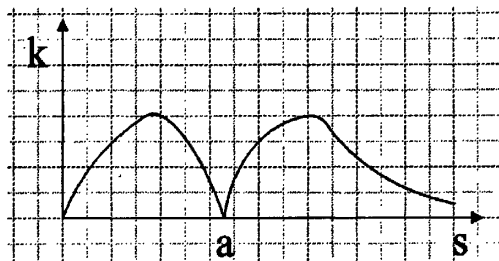


图9 耦合规律示意

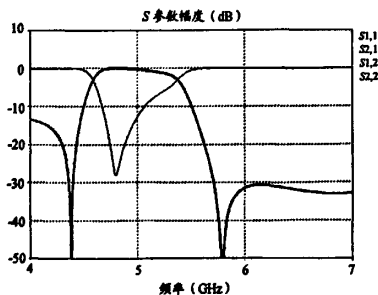
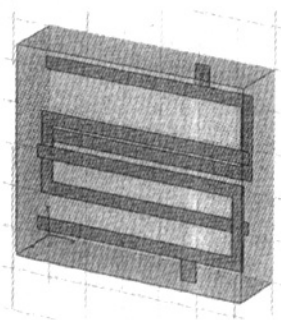


图10 引入源耦合后滤波器结构与仿真结果

3 结论

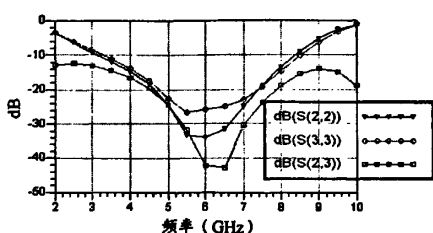
文章介绍了一种基于LTCC技术的C波段带通滤波器的设计过程。LTCC技术以其高品质因素的优点而适合于小型微波器件的研制。文章对此种滤波器设计进行了仿真模拟,得到了较好的结果,基本上满足了预定的指标。但是对于第二个滤波器,带内波动还不是很令人满意,需要进行进一步调试。

由于LTCC滤波器的尺寸非常小,滤波器内部的各种耦合就非常复杂,所以在设计的时候必须考虑到各元件之间的相互影响。要做到这一点,还需要在以后的设计工作中不断积累经验,掌握一种相对成熟的设计理论。

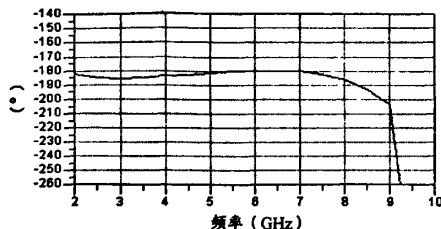
参考文献

- [1] Cameron R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions. IEEE trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 4, April 1999
- [2] 许佳,章亚丽,吴小燕. 基于LTCC技术的多层介质滤波器研制. 2003年全国微波毫米波会议论文集. 上海. 2003

(下转第91页)



b. 巴伦的输出回波损耗和隔离度



c. 巴伦两输出端口的相位差

图 10 输入输出端口均加入补偿电路后的 S 参数曲线

参考文献

- [1] Leong Y C, Ang K S and Lee C H. A derivation of a class of 3-port Baluns from symmetrical 4-port networks. IEEE MTT-s Digest. 2002
- [2] Ang K S and Robertson D R. Analysis and design of impedance-transforming Planar Marchand Baluns. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 49: 402 ~ 405, Feb. 2001
- [3] Mongia R, Bahl I and Bhartia P. RF and microwave coupled-line circuits. Artech House Microwave Library. 1999
- [4] Ang K S, Leong Y C and Lee C H. Analysis and design of miniaturized lumped-distributed impedance-transforming Baluns. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Mar. 2003
- [5] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路. 北京:人民邮电出版社. 1976

作者简介

汤利霞 1978 年生, 2002 年获成都电子信息工程学院学士学位, 现在西安空间无线电技术研究所攻读电磁场与微波技术专业硕士研究生。

于洪喜 1963 年生, 研究员、博士生导师。研究方向为空间微波技术。

(上接第 72 页)

- [3] 夏云峰. 星载自适应预失真技术的微波滤波器. 中国空间技术研究院 2003 级硕士研究生毕业论文. 2006
- [4] 墨晶岩, 马哲旺, 徐得名. 一种新型多层共烧陶瓷三级带通滤波器的设计. 2003 年全国微波毫米波会议论文集. 366 ~ 369

作者简介

赵慧敏 1981 年生, 2004 年获南京大学学士学位, 现在西安空间无线电技术研究所攻读电磁场与微波技术专业硕士研究生。

于洪喜 1963 年生, 研究员、博士生导师。研究方向为空间微波技术。

A Bandpass Filter Based on LTCC

Zhao Huimin¹ Yu Hongxi²

(1. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100081)

Abstract A multilayer 3 order Bandpass filter is obtained by adopting the Harpin resonators in Synthesis - method based on coupling matrix, and a method to design a LTCC filter is introduced by field calculating and circuit simulating. With the assist of simulating software, the resonators and multi-layer coupling structure are analyzed in detail and three order chebyshev bandpass filter is obtained. Furthermore, the source-coupling is made use of to yielding transmission zeros in the stop band, which increase the attenuation nearby.

Key words LTCC Bandpass filters Source coupling

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, 致力和专注于微波、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/>