

低温陶瓷共烧毫米波带状线带通滤波器优化设计

李成国, 牟善祥, 张忠传

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用低温陶瓷共烧(LTCC)技术设计了具有强阻带特性的低损耗全嵌入式带通滤波器(BPF), 提出了折叠边缘耦合带状线滤波器的小型化设计。为解决折叠耦合带状线的直角拐角引起的难以分析和设计难题, 提出了神经网络结合遗传算法的优化设计方法。利用 HFSS 软件对滤波器接地通孔的位置和数目进行优化, 改善了滤波器的传输特性。滤波器中心频率的插入损耗小于 0.7 dB, 反射损耗小于 26 dB, 滤波器尺寸 $2.3\text{ mm} \times 2.3\text{ mm} \times 0.41\text{ mm}$, 实现了小型化设计。

关键词: 电子技术; 低温陶瓷共烧; 耦合带状线; 嵌入; 折叠; 接地通孔; 神经网络; 遗传算法
中图分类号: TN603.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2009)02-0140-04

Optimal Design of Strip Line BPF in Millimeter Wave on Low-temperature Co-fired Ceramic

LI Cheng-guo, MU Shan-xiang, ZHANG Zhong-chuan

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

Abstract: A low-loss fully embedded bandpass filter (BPF) with enhanced stopband characteristics was designed by low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology. The folded parallel-coupled filters in edge-coupled strip line with miniaturization form were proposed. To resolve right corner analysis and design of folded coupled strip line, an optimal design method was put forward by combining neural network with genetic algorithm. The location and number of grounded via were optimized by HFSS, to improve transmission characteristics of the filter. The measured insertion loss is less than 0.7 dB at a center frequency, and the reflection loss is less than 26 dB. Dimension of the filter is $2.3\text{ mm} \times 2.3\text{ mm} \times 0.41\text{ mm}$, which realizes design of the filter with miniaturization.

Key words: electronics; low-temperature co-fired ceramic; coupled strip line; embedded; folded; grounded via; neural network; genetic algorithm

目前射频或毫米波雷达和通信系统小型化已成为国内外研究的热点, 借助低温陶瓷共烧(LTCC)三维空间的设计优势, 将各种具有特殊要求的无源器件(如滤波器、电感和电容等)嵌入基板的中间层^[1], 而有源芯片贴装在表面层或埋入 LTCC 腔体中, 实现系统的集成化和小型化设计。

基于 LTCC 技术设计的滤波器, 由于具有尺寸小、性能好、可靠性高、成本低等优点而受到广泛的关注。目前文献中介绍的基于 LTCC 技术的滤

波器基本上都是频率较低的二阶滤波器, 而在毫米波频段基于带状线的多阶带通滤波器的设计几乎没有。本文将数值计算与软件优化仿真相结合, 提出了一种新型的基于 LTCC 带状线耦合的三阶带通滤波器结构。在设计中应用带通滤波器原理, 以耦合带状线为基本单元^[2], 根据理论计算的结果, 在利用电磁场仿真软件对滤波器中的耦合带状线详细分析的基础上, 得到三阶切比雪夫响应的带通滤波器。为了减小滤波器所占有的空间, 对边缘耦合带

收稿日期: 2007-08-21

作者简介: 李成国(1971—), 男, 博士研究生。E-mail: nhlichengguo@163.com;

牟善祥(1953—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: abcmxsx@163.com

状线采用折叠结构,利用 HFSS 电磁仿真软件、神经网络和遗传算法对滤波器结构进行优化设计,获得了基于 LTCC 的小尺寸、频率选择特性好的多层三阶带通滤波器。

1 毫米波带通滤波器设计原理

根据带通滤波器设计指标,采用网络综合法以等衰减为条件,经过频率变换综合成低通原型滤波器,然后采用倒置和频率变换得到带通滤波器,最后将原型电路中各元件用微波结构来实现^[2]。

为了实现在 LTCC 中毫米波带通滤波器的全嵌入式设计,滤波器采用边耦合带状线作为滤波器的基本单元,其结构和等效电路如图 1 所示。

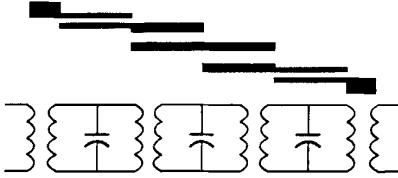


图1 平行耦合带状线滤波器结构和等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of parallel coupled strip line filter

1.1 带状线的分析

带状线宽 w , 上下地面板之间的距离为 H , 生瓷带的介电常数 ϵ_r , 结构如图 2 所示。

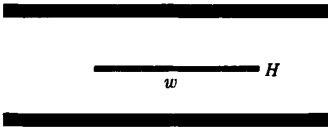


图2 带状线横截面结构

Fig.2 Configuration of strip line cross section

设带状线的特性阻抗^[3]为 $Z_0, k = \tanh(\pi w/2H)$ 是第一类全部椭圆积分,

$$Z_0 = \frac{30\pi K'(k')}{\sqrt{\epsilon_r} K(k)}, \quad (1)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \left[\frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right) \right]^{-1}, & 0 < k \leq 0.707; \\ \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right), & k > 0.707. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 耦合带状线分析

耦合带状线宽 w , 耦合线间距 s , 生瓷带介电常数 ϵ_r . 地面板间距为 H , 设耦合带状线的奇模阻抗为 Z_∞ , 偶模阻抗为 Z_∞ , k 是第一类全部椭圆积分^[4-5], 结构如图 3 所示。

万方数据

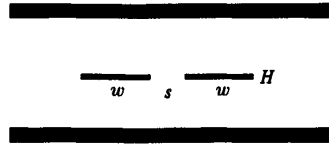


图3 耦合带状线横截面结构

Fig.3 Configuration of coupled strip line cross section

由耦合带状线方程^[2]可以得到^[4-5],

$$\begin{cases} Z_{oe} = \frac{30\pi K'(k'_e)}{\sqrt{\epsilon_r} K(k_e)}, \\ Z_{oo} = \frac{30\pi K'(k'_o)}{\sqrt{\epsilon_r} K(k_o)}. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} k_e = \tanh \left(\frac{\pi w}{2H} \right) \tanh \left(\frac{\pi w + s}{2H} \right), \\ k_o = \tanh \left(\frac{\pi w}{2H} \right) \coth \left(\frac{\pi w + s}{2H} \right). \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} =$$

$$\begin{cases} \left[\frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right) \right]^{-1}, & 0 < k \leq 0.707; \\ \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right), & k > 0.707. \end{cases} \quad (5)$$

由(3)式~(5)式方程可以得到

$$\begin{cases} \frac{w}{H} = \frac{2}{\pi} \operatorname{artanh} \sqrt{k_e k_o}, \\ \frac{s}{H} = \frac{2}{\pi} \operatorname{artanh} \left[\frac{1-k_o}{1-k_e} \right] \sqrt{\frac{k_e}{k_o}}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_e = \sqrt{1 - \left(\frac{e^A - 2}{e^A + 2} \right)^4}, \\ k_o = \frac{e^{(\pi^2/A) - 2}}{e^{(\pi^2/A) + 2}}. \end{cases} \quad (7)$$

$$A = \begin{cases} \frac{Z_{oe}\sqrt{\epsilon_r}}{30}, & \text{偶模;} \\ \frac{Z_{oo}\sqrt{\epsilon_r}}{30}, & \text{奇模.} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z_{oe} 和 Z_{oo} 分别为 w/H 和 s/H 的函数, 可以采用微波软件根据奇偶模阻抗 Z_{oe} 和 Z_{oo} 快速直接来计算带状线和耦合带状线的参数, 从而得到边缘耦合带通滤波器结构参数。

2 边缘耦合带状线滤波器的设计与仿真

根据设计步骤和公式, 对中心频率为 34.3 GHz 的毫米频段带通滤波器进行设计^[6-7]。滤波器采取带内波纹 0.01 dB 的切比雪夫响应, 带宽 8%,

$n=3$, 查表^[2]得 $g_0=g_4=1$, $g_1=g_3=0.6291$, $g_2=0.9702$. 选取馈线特性导纳为 $Y_0=1/50$, 计算各耦合节奇偶模特性阻抗为

$$(Z_{oe})_{01}=71.5, (Z_{oo})_{01}=30,$$

$$(Z_{oe})_{12}=53.8, (Z_{oo})_{12}=40.7,$$

$$(Z_{oe})_{23}=(Z_{oe})_{12}, (Z_{oo})_{23}=(Z_{oo})_{12},$$

$$(Z_{oo})_{34}=(Z_{oo})_{01}, (Z_{oe})_{34}=(Z_{oe})_{01}.$$

选用 LTCC 生瓷带材料 (Ferro-A6)^[8-9], 其介电常数 $\epsilon_r=5.9$, 厚度 $h=386 \mu\text{m}$. 根据各耦合节奇偶模特性阻抗 Z_{oe} 、 Z_{oo} 可以得到各节耦合线的尺寸为

$$w_1=26.6 \mu\text{m}, w_2=36.4 \mu\text{m},$$

$$s_1=87.6 \mu\text{m}, s_2=196.1 \mu\text{m},$$

$$l_1=867.1 \mu\text{m}, l_2=864.4 \mu\text{m}.$$

LTCC 带状线滤波器的两个接地板之间, 容易激励平行板模, 为此采用多个接地通孔压缩平行板模, 改善带通滤波器的传输特性。

由于理论分析的精度有限, 本文采用电磁仿真软件 HFSS 进行模拟完成尺寸调整和优化仿真, 滤波器结构和仿真曲线分别如图 4 和 5 所示。

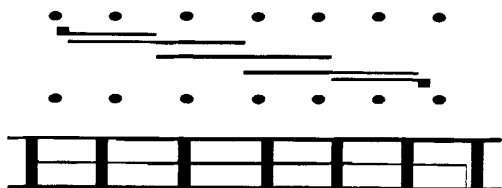


图 4 基于 LTCC 边缘耦合带状线带通滤波器结构

Fig.4 The edged coupled strip line BPF based on LTCC

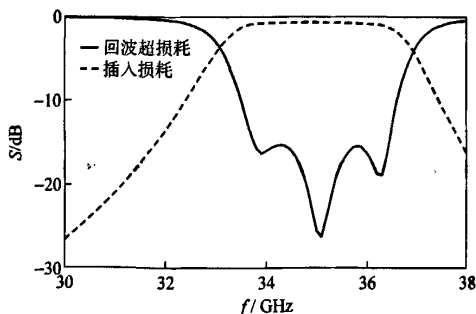


图 5 基于 LTCC 边缘耦合带状线带通滤波器特性

Fig.5 Performance of the edged coupled strip line BPF based on LTCC

3 基于 LTCC 的折叠的边缘耦合带状线滤波器的分析

上面设计的边缘耦合带状线滤波器在长度方向

占有的空间过大, 为了实现系统的小型化设计, 对耦合带状线采取折叠结构^[8], 结构如图 6 所示。



图 6 折叠的边缘耦合带状线带通滤波器结构

Fig.6 The folded edged coupled strip line BPF

滤波器采用折叠结构以后, 边缘耦合带状线形成的直角拐角将引起寄生的电感和电容, 其结构和等效电路为如图 7 所示。

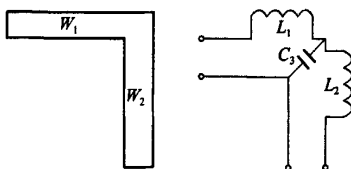


图 7 直角拐角结构以及等效电路

Fig.7 Equivalent circuit and configuration of right corner

拐角处存在电容和电感效应, 电容和电感分别为

$$\frac{C_b}{w} = \left\{ \frac{(14\epsilon_r + 12.5)w/H - (\pi 1.83\epsilon_r - 2.35)}{\sqrt{w/H}} + \frac{0.02\epsilon_r}{w/H}(9.5\epsilon_r + 12.5)w/H + 5.2\epsilon_r + 7 \right\}, \quad (9)$$

$$\frac{L_b}{H} = 100Z_0(4\sqrt{w/H} - 4.21)\sqrt{\epsilon_r}/C. \quad (10)$$

从耦合线的折叠结构可以看出, 相邻节还存在电磁耦合效应(主要是电容耦合), 等效电路如图 8 所示。由于这个耦合的分析过于复杂, 在本文中对这个问题的分析主要是通过软件进行分析。

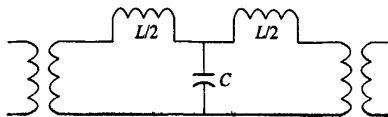


图 8 折叠耦合带状线等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of folded coupled strip line

4 基于遗传算法的 LTCC 的折叠的边缘耦合带状线滤波器的优化设计

折叠型耦合带状线滤波器由于拐角以及与拐角相连的带状线之间耦合的分析过于复杂, 本文在神经网络模型基础上采用遗传算法对滤波器的结构参数进行优化^[9], 得到具有较好传输特性的带通滤波器。

在保持接地通孔固定的的情况下, 对可调参数

$w_1, w_2, s_1, s_2, l_1, l_2$ 在取值范围内均匀采样, 得到 64 组带通滤波器的参数。利用 HFSS 软件仿真, 得到这 64 组参数对应的带通滤波器中心频率处的传输特性 s_{11} 和 s_{21} 。运用 64 组数据训练神经网络模型。将 w_1, w_2, s_1, s_2, l_1 和 l_2 作为神经网络的输入参数, 带通滤波器 s_{11} 和 s_{21} 作为输出参数。

为了完成优化任务, 利用遗传算法对获得的神经网络模型进行优化^[10]。设初值群体规模为 20 个染色体, 遗传进化的最大代数为 100, 每个参数用 16 位二进制编码, 所以每个染色体长度为 $16 \times 2 = 32$ 位, 实际执行时, 只需 56 代遗传进化就达到了期望的目标值 $s_{11} < 17$ dB, $s_{21} \leq 0.8$ dB。获得的最佳参数分别为 $w_1 = 26.4 \mu\text{m}$, $w_2 = 37.1 \mu\text{m}$, $s_1 = 87.3 \mu\text{m}$, $s_2 = 195.7 \mu\text{m}$, $l_1 = 859.1 \mu\text{m}$, $l_2 = 861.3 \mu\text{m}$ 。

利用三维电磁仿真软件 HFSS 对接地通孔的位置和数目进行优化设计, 然后结合带通滤波器的优化参数进行仿真, 得到滤波器的结构和响应特性曲线如图 9 和图 10 所示。

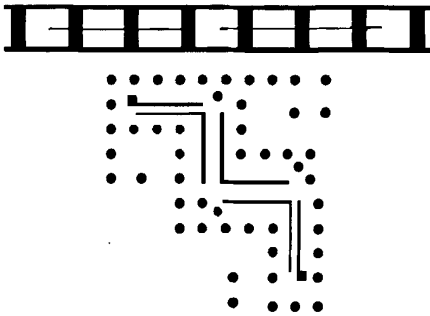


图 9 折叠边缘耦合带状线带通滤波器

Fig. 9 The folded edged coupled strip line BPF

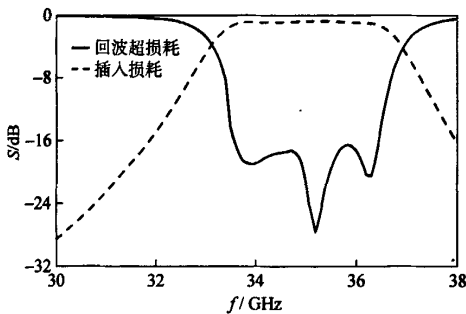


图 10 折叠边缘耦合带状线带通滤波器仿真

Fig. 10 Simulation of the folded edged coupled strip line BPF

从图 10 可以看出, 滤波器在中心频率处插入损耗小于 0.7 dB, 回归损耗小于 26 dB, 在频率

33.7 GHz 和 36.4 GHz 处衰减大于 16 dB, 在频率 33.5~36.5 GHz 具有较好的平坦度。

5 结论

本文基于 LTCC 技术实现了带状线带通滤波器的对全嵌入式设计, 通过滤波器在长度方向上的折叠实现了小型化。为了解决折叠引起的分析和设计难题, 采用神经网络和遗传算法对滤波器参数进行优化。滤波器尺寸为 $2.3 \text{ mm} \times 2.3 \text{ mm} \times 0.41 \text{ mm}$ 、在中心频率处滤波器插入损耗小于 0.7 dB、回归损耗小于 26 dB, 在频率 33.5~36.5 GHz 具有较好的平坦度, 满足了带通滤波器设计指标和小型化的目的, 并且为快速的工程设计提供了有益的探索。

参考文献 (References)

- [1] Bruce A. Kopp, A. Shaun Francomacaro. Miniaturized strip line circuitry utilizing low temperature cofired ceramic (LTCC) technology[J]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp, 1992, 3(6): 1513-1516.
- [2] Kitazawa T. Loss calculation of single and coupled strip lines by extended spectral domain approach[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1993, 3(7): 211-213.
- [3] 顾墨琳. 微波固态电路设计[M]. 南京: 南京电子技术研究所, 1991: 11-41.
GU Mo-lin. Microwave solid state circuit design[M]. Nanjing: Nanjing Research Institute of Electronic Technology, 1991: 11-14. (in Chinese)
- [4] Shelton J D. Impedances of offset parallel-coupled strip transmission lines[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1966, MTT-14: 7-15.
- [5] Cohn S B. Parallel coupled transmission-line resonator filters[J]. IRE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1958, MTT-6: 223-231.
- [6] Horton M C, Wenzel R J. General theory and design of optimum quarter wave TEM filters[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1965, MTT-13(3): 316-327.
- [7] Cho Y H, Lee Y C. A fully embedded LTCC stripline parallel coupled BPF for 40 GHz BMWS application[J]. IEEE Radio Wireless Conf, 2004: 75-78.
- [8] Chang-Ho Lee, Albert Sutono, Sangwoo Han, et al. A compact LTCC-based ku-band transmitter module[J]. IEEE Trans on Advanced Packaging, 2002, 25(3): 374-381.
- [9] Haupt R L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(2): 7-15.
- [10] Johnson J M, Rahmat-Samii V. Genetic algorithms in engineering electromagnetics[J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 1997, 39(4): 7-21.

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/>