

L 波段带双零点的窄带 LTCC 滤波器设计

李夏琴 王志刚 延波 徐锐敏

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

摘 要: 本文应用 LTCC 技术设计了一个 L 波段二阶 Chebyshev 窄带带通滤波器。该滤波器集成在 9 层 LTCC 介质中, 采用等效集总元件 (电容电感) 结构, 充分利用 LTCC 的三维封装结构减小滤波器体积, 通过谐振单元中集总元件的串并联产生两个带外传输零点, 同时调整谐振单元耦合间距控制带宽。滤波器输入输出利用金属通孔将带状线过渡到微带上。滤波器 (带过渡结构) 的仿真结果为: 中心频率 1.42 GHz, 1 dB 相对带宽 2.1%, 插入损耗通带内最低 0.5 dB, 回波损耗优于 20 dB, 整个滤波器体积为: $4.5 \times 4 \times 0.87 \text{ mm}^3$ 。

关键词 L 波段; LTCC 技术; 窄带; 集总元件

An L-Band Narrow Band Filter with Double Zeros in LTCC Technology

LI Xia-qin, WANG Zhi-gang, YAN Bo, XU Rui-min

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731)

Abstract: In this paper, an L band narrowband band-pass filter of Chebyshev-type with Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) technology is proposed. The filter in nine substrate layers of Dupont 951 adopts the lumped-element inductors and capacitors in order to miniature the size of the filter. In order to realize the narrowband filter and produce two finite transmission zeros of the stop-band, lumped-elements in series and parallel are used. Coupling coefficient between the neighboring resonators is controlled by the coupling space. A broadband microstrip line to stripline transition is proposed in this paper too. The filter (with the transition) exhibits a simulation performance of a minimum insertion loss of 0.5 dB and return loss better than 20 dB in the passband, and the relative bandwidth of 2.1% at a center frequency of 1.42 GHz.

Key words: L band; LTCC technology; Narrow band filter; lumped-element.

引 言

微波滤波器是现代无线通信系统中的重要组成单元, 在发射和接收中要大量利用微波滤波器将杂波、谐波滤除。近年来随着系统小型化的要求尤其对无源器件小型化要求, LTCC 技术作为一种新的电路实现形式得到很快发展, 其高集成度、高性能和三维立体封装结构将无源器件埋置在多层陶瓷基片中^[1], 从而在很大程度上减小了无源器件的尺寸, 实现系统小型化设计。

现在已有大量关于微波滤波器小型化的文献, 像折叠带状线谐振单元^[2]、夹夹谐振单元^[3]、螺旋谐振单元^[4], 它们能将谐振单元尺寸减小到 $1/4$ 波长, 两层梳状线谐振单元^[5]可以将尺寸减小到 $1/8$ 波长, 但是, 在 L 波段这些谐振单元的尺寸依然很大。利用 LTCC 三维结构, 在 Z 方向上采用堆栈形式实现集总电容电感^[6], 在不同层间实现电容电感耦合, 这样不仅能够减少微波滤波器的体积, 还能

利用耦合原理产生零点, 从而实现更好衰减性能的滤波器。

本文利用 LTCC 技术, 在 L 波段设计了一个两阶 Chebyshev 窄带带通滤波器, 该滤波器在低边阻带上有两个零点。输入输出利用电容与谐振单元连接, 调节单元间的电感耦合强度从而调节通带带宽, 实现窄带滤波器的设计。该小型化的窄带滤波器体积仅为: $4.5 \times 4 \times 0.87 \text{ mm}^3$ 。

1 滤波器结构设计原理

1.1 设计原理

窄带滤波器拓扑模型结构如图 1, 整个滤波器包括 9 层 LTCC DuPont 951 介质基片, 其相对介电常数 $\epsilon_r=7.8$, 损耗角 $\sigma=0.006$, 每层介质基片厚度为 $97 \mu\text{m}$ (共烧后)。滤波器模型等效电路如图 2, 其模型中元件值由低通原型滤波器等效电路推导, 具体公式和参考文献[7]相同:

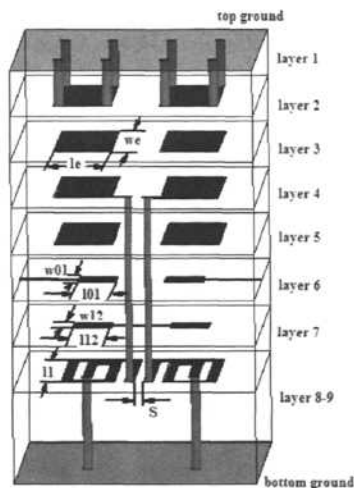


图 1 滤波器结构

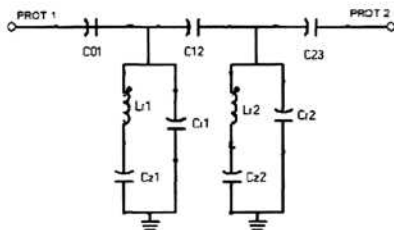


图 2 滤波器等效电路

$$B_M(w = w_z) = \infty \quad (1a)$$

$$B_M(w = w_o) = B_S(w = w_o) \quad (1b)$$

$$\left. \frac{dB_M(w)}{dw} \right|_{w=w_o} = \left. \frac{dB_S(w)}{dw} \right|_{w=w_o} \quad (1c)$$

其中, w_o 和 w_z 分别为通带的中心频率和传输零点, B_M 和 B_S 分别为等效电路中谐振单元导纳阻抗和原型滤波器中导纳阻抗。由低通滤波器原型变换可以得到滤波器初值^[7]:

$$C_{12} = \frac{C_z}{\sqrt{2}} g \frac{BW}{w_o} \quad (2a)$$

$$C_{01} = C_{23} = \frac{1}{w_o Z_o} \sqrt{\frac{w_o C_{12} Z_o}{1 - w_o C_{12} Z_o}} \quad (2b)$$

$$L_r = \frac{1}{C_{eff}} g \frac{w_{z1}^2 - w_p^2}{w_p^4} g \frac{w_o^2 - w_p^2}{w_o^2 - w_{z1}^2} \quad (2c)$$

$$C_r = \frac{1}{w_p^2 L_r} \quad (2d)$$

$$C_z = \frac{1}{L_r} \left(\frac{1}{w_{z1}^2} - \frac{1}{w_p^2} \right) \quad (2e)$$

$$C_r' = \frac{1}{w_{z2}^2 L_r'} \quad (2f)$$

$$L_r' = \left[\frac{1}{L_z' \left(\frac{w_{z2}}{w_o} \right)^2 - 1} - w_o C_{eff} \right]^{-1} \quad (2g)$$

$$L_z' = \frac{w_{z2}^2}{C_s (w_o^2 - w_{z2}^2)} \quad (2h)$$

其中, w_p , K 和 C_{eff} 分别由如下公式获得:

$$w_p = \frac{(1-k)w_o^2 + (k-3)w_o^2 w_{z1}^2}{(k-1)w_{z1}^2 - (k+1)w_o^2} \quad (3a)$$

$$k = \frac{-2C_s}{C_{eff}} \quad (3b)$$

$$C_{eff} = C_{01} + C_{12} - W_o C_{01} C_{12} Z_o \quad (3c)$$

其中, BW 为 3 dB 带宽, C_s 为并联电容由滤波器原型确定, w_{z1} 和 w_{z2} 为低边带上的两个衰减零点。

1.2 滤波器仿真设计

滤波器工作中心频率为 1.42 GHz, 相对带宽 30 MHz, 要求在 1.35 GHz 和 1.28 GHz 处分别有 30 dB 和 40 dB 的抑制, 因此将衰减零点选在 1.3 GHz 和 1.1 GHz。根据公式(1)-(3), 得到等效电路中各元件初值为:

$$C_{01} = 1 \text{ pF}, C_{12} = 0.4 \text{ pF}, C_{23} = 0.6 \text{ pF},$$

$$L_{r1} = 7.5 \text{ nH}, L_{r2} = 7.5 \text{ nH}, C_{r1} = 4.5 \text{ pF},$$

$$C_{r2} = 3 \text{ pF}, C_{z1} = 2.05 \text{ pF}, C_{z2} = 2.6 \text{ pF}$$

利用公式变换得到初值与 2D 仿真软件等效电路存在稍微误差, 但实际模型为 3D 结构仍可以以公式提取的初值进行最初物理模型仿真。下面将详细介绍如何根据初值进行模型拓展。

由于 C_r 值较大, 采用 2 层平板结构电容实现, 由 layer 3 和 layer 4 的两层金属实现, 在 layer 4 上利用金属通孔与 layer 7 上的电感 L_r 串联, 构成通带谐振单元。由于 L_r 值较大, 为了减小体积采用平面螺旋结构, 线宽为 0.2 mm, 接地则由两个直径为 0.2 mm 的金属通孔与底层金属相连。由于平面螺旋电感与地产生寄生电容, 故需要接地孔穿透两层介质基片, 减小寄生电容的影响。由于初值中 C_{z1} 近似为 C_{r1} 的一半, 故利用两个等值串联电容实现, 如 Layer 1-3 的左边, 这样可以减少模型中变量的数量, 便于使用三维场仿真软件进行优化仿真。而 C_{z2} 与 C_{r2} 差不多, 仍然采用两电容并联实现但需要加大金属平板的尺寸, 但是实际仿真优化后发现 C_{z2}

与 C_{21} 一样时仿真结果最佳, 模型如 Layer 1-3 的右边部分。

由于两个 L_r 在同层上, 电感间会产生耦合, 在一定程度上减小 C_{12} 的值, 这样可以调整电感间的耦合强度来调整带通滤波器的带宽。输入输出结构在 layer 5 上, 与 layer 4 的金属平板构成输入输出电容 C_{01} 和 C_{23} , 耦合电容 C_{12} 则由 layer 5 和 layer 6 实现, 两个电容串联后值为原来一半, 故模型中的 C_{12} 为等效电路初值的 2 倍, 但由于两个 L_r 之间的耦合影响, 使得 C_{12} 的值有所改变, 需要利用仿真软件进行优化仿真。

两个 L_r 之间的耦合强度随间距 S 的变化曲线如图 3 所示。要求 30 MHz 的通带设计, 在原型中留有 10 MHz 余量取为 40 MHz, 根据公式 $K = BW / \sqrt{g_1 g_2}$ 得到耦合系数 $K=0.04$, 由图 2 可得 $S=0.23$ mm。

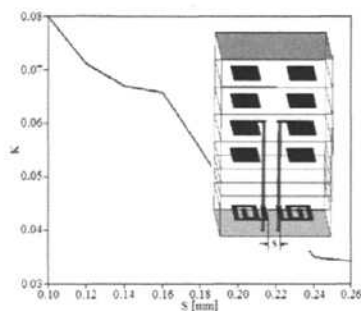


图 3 耦合强度随间距 S 的变化曲线

2 仿真

为了方便测试, 本文还设计了微带到带状线过渡, 采用金属通孔将带状线过渡到微带, 过渡模型及仿真结果如图 4。仿真结果显示在 DC~35 GHz 的范围内驻波在 15 dB 以下。

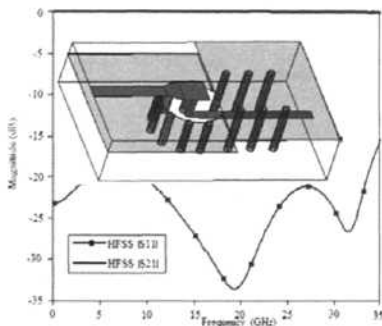


图 4 微带到带状线过渡仿真结果

根据以上公式和曲线, 得到滤波器的初值, 利用三维场仿真软件进行参数优化仿真。图 5 为此集总 LC 窄带滤波器在 HFSS 中的仿真结果: $w_e=2.7$ mm, $l_e=1.2$ mm, $s=0.18$ mm, $l_l=2.45$ mm, $w_{01}=w_{23}=0.2$ mm, $l_{01}=l_{23}=0.2$ mm, $w_{12}=0.65$ mm, $l_{12}=0.85$ mm, 由图 5 可知滤波器中心频率为 1.42 GHz, 相对带宽 2.1%, 带外在 1.35 GHz 时有 39 dB 的抑制, 在 1.28 GHz 时有 52 dB 的抑制, 带内插入损耗最低 0.5 dB, 回波损耗优于 20 dB。滤波器体积为 $4.5 \times 4 \times 0.87$ mm³。

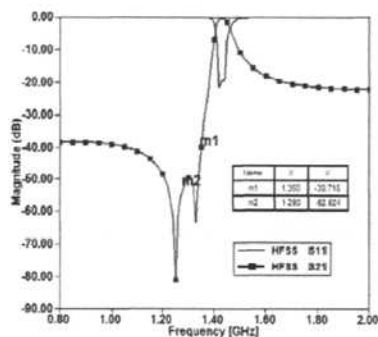


图 5 滤波器仿真 S 参数

3 结论

本文应用 LTCC 技术在 L 波段利用分布 LC 实现了一个二阶 Chebyshev 窄带带通滤波器, 相对带宽 2.1%, 体积仅为 $4.5 \times 4 \times 0.87$ mm³, 达到了预期的小型化高抑制特性, 并对滤波器的等效电路初值提取及设计进行了详细的阐述。为方便滤波器测试本文还设计了一种微带到带状线的过渡。滤波器及过渡均表现了良好的仿真结果。

参考文献

- [1] R. L. Brownand, P. W. polinski. The integration of Passive components into MCM's using advacned low-temperature co-fired ceramics[J]. Int. J. Microcirc. Eleetron. Packag., 1993, 328-338.
- [2] C.-Y. Chang, C.-C. Chen, H.-J. Huang. Folded quarter-wave resonator filters with Chebyshev, flat group delay, or quasi-elliptical function response[C]. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2002, vol. 3. 1609 - 1612.
- [3] E. Cristal, S. Frankel. Hairpin-line and hybrid hairpin-line half wave parallel coupled line

- filters[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1972, 20(11): 719 - 728
- [4] F. Huang. Ultra-compact superconducting narrowband filters using single- and twin-spiral resonators[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2003, 51(2): 487 - 491
- [5] Y. Zhang, Kawthar A. Zaki. Andrew J. Piloto, Joseph Tallo. Miniature Broadband Bandpass Filters Using Double-Layer Coupled Stripline Resonators[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2006, 54(8)
- [6] Lap K.Y. Ke-Li Wu. A Compact Second-Order LTCC Bandpass Filter with Two Finite Transmission Zero[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2003, 51(2)
- [7] Wing-Yan Leung, Kwok-keung M C, Ke-Li Wu. Multilayer LTCC Bandpass Filter Design With Enhanced Stopband Characteristics[J]. IEEE Microw. And Wireless Components Letters, 2002, 12(7)
- 李夏琴 女, 1985 年出生, 现就读于电子科技大学电磁场与微波技术专业, 硕士生, 主要研究方向: LTCC 技术实现的无源结构和组件等.
E-mail: lixiaqinjenny@163.com
- 徐锐敏 男, 1958 年生, 博士生导师, 教授。就职于电子科技大学电磁场与微波技术专业, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。
E-mail: rmxu@uestc.edu.cn

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/>