

## 微型半集总 LTCC 蓝牙带通滤波器研究

戴永胜, 徐 利, 王立杰, 陈少波

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 该文研究了一种基于低温共烧陶瓷(LTCC)技术的微型半集总蓝牙带通滤波器。通过改进了二阶耦合谐振滤波器电路,在通带频率高、低端分别引入零点电路,改善了阻带衰减。滤波器采用半集总结构三维模型、集总电容和分布带状线电感。测试结果表明,该滤波器中心频率为2.45 GHz,在2.4~2.5 GHz内插入损耗小于1.2 dB,通带内驻波比均小于1.5。低阻带从0.1 GHz到2 GHz的衰减大于25 dB,在高阻带引入了传输零点,有效抑制了二次和三次谐波,从7.2 GHz到7.5 GHz的衰减大于25 dB。优化设计和测试结果吻合,尺寸仅为1.6 mm×0.8 mm×0.6 mm。

**关键词:** 低温共烧陶瓷; 蓝牙滤波器; 半集总结构; 高次谐波抑制

**中图分类号:** TN713 **文章编号:** 1005-9830(2013)02-0299-06

## Research on miniaturized LTCC bandpass filter with semi-lumped components for bluetooth application

Dai Yongsheng, Xu Li, Wang Lijie, Chen Shaobo

(School of Electronic Engineering and Optoelectric Technology, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A miniaturized low temperature co-fired ceramic (LTCC) bandpass filter with semi-lumped components for bluetooth application is researched here. The circuit topology of the bandpass filter is based on the second-ordered coupled resonance filter prototype. The prototype is modified to produce a pair of transmission zeros on both sides of the passband to improve stopband attenuation. The 3-D physical layout of the filter is realized by the semi-lumped structure. The capacitors are achieved by the lumped metal-insulator-metal capacitor and the inductors are achieved by distributional stripline. Test results show that, when the central frequency of the filter is 2.45 GHz, the insertion loss in the passband is less than 1.2 dB, the input/output of voltage standing wave ratios (VSWRs) are less than 1.5, and the low stopband attenuation is more than 25 dB from 0.1 to 2 GHz. The transmission zero

收稿日期: 2011-08-25 修回日期: 2012-04-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”计划(2009CB320201); 国防重点实验室基金(9140C1402021102)

作者简介: 戴永胜(1956-), 男, 副教授, 主要研究方向: MMIC、微型 LTCC 微波器件设计、SIP、MMCM、天线及阵列等, E-mail: daiys@njust.edu.cn.

引文格式: 戴永胜, 徐 利, 王立杰, 等. 微型半集总 LTCC 蓝牙带通滤波器研究[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(2): 299-304.

投稿网址: <http://njlgdxxb.paperonce.org>

generated at the high stopband makes the second and third harmonic suppressed well, and the stopband attenuation is more than 25 dB from 7.2 to 7.5 GHz. The test results are in good agreement with the simulation. The filter size is 1.6 mm×0.8 mm×0.6 mm only.

**Key words:** low temperature cofired ceramic; filters for bluetooth application; semi-lumped components; suppression of high harmonics

随着无线通信技术的发展,特别是移动通信及各种无线通信技术的快速发展,微型化、轻量化及多功能的微波元件越来越受重视。低温共烧陶瓷(Low temperature co-fired ceramic, LTCC)技术是实现三维陶瓷基多层电路无源元件和系统级电子封装的主流技术之一,它为无源电子元件微型化、轻量化、高密度集成及系统级电子封装提供了理想平台。近年来,LTCC 已成为电子元器件模块化及无源集成的关键技术之一<sup>[1-6]</sup>。采用 LTCC 技术实现的滤波器具有体积小,质量轻,性能好等诸多优点,非常适合蓝牙模块的设计<sup>[7-9]</sup>。

随着蓝牙技术的快速普及和应用需求,国内外的许多研究人员都致力于各种微型蓝牙滤波器的研制,在保证所需的电性能前提下,尺寸尽可能小已成为重要目标。所报道的微型蓝牙滤波器的尺寸有:二阶带通结构的典型尺寸为 2.5 mm×2.0 mm×0.8 mm<sup>[10]</sup>, 2.5 mm×2.0 mm×1.2 mm<sup>[11]</sup>, 三阶带通结构的典型尺寸为 3.2 mm×2.5 mm×1.5 mm<sup>[12]</sup>。为了减小现滤波器的尺寸且保证电性能需求,经综合考虑,本文选取二阶耦合谐振带通滤波器原型,并在通带频率的高、低端边缘分别引入两个传输零点,使得滤波器阻带抑制更高,三维模型采用半集总结构形式,有效减小了体积,最终所设计的滤波器尺寸仅为 1.6 mm×0.8 mm×0.6 mm。

## 1 设计

设计过程是先从基本理论出发,合理选取电路拓扑,并采用 ADS 软件仿真优化,以确定各元件值。其次是将每个理想元件转化为三维结构,并最终完成整个三维蓝牙带通滤波器的设计,进行批量制造和生产。对所制造的微型蓝牙滤波器进行了微波电性能测试,给出了在仿真与测试结果的比较与分析。

滤波器的设计步骤如下:

(1)利用不对称广义切比雪夫滤波器理论,

根据技术指标要求,确定滤波器级数和传输零点位置,选定达到技术指标要求的滤波器拓扑结构;

(2)利用 ADS 软件对所选定的滤波器电路拓扑进行路级优化仿真,以确保所达到的指标优于要求的性能指标,同时确定电路拓扑中各元件的值;

(3)按所优化的电路拓扑图及其连接关系和所确定的各元件值,根据 LTCC 的材料和工艺规则,分别对应转换为三维结构形式,根据本设计具体情况采用半集总结构实现其三维结构;

(4)在转化三维结构时,要充分考虑分布参数和互耦的影响,每个元件的数值和结构均要仔细拟合,同时要考虑尺寸要求和三维结构的布局;

(5)根据所拟合的初值,摸索各元件值变化与性能的关系,利用三维全波仿真软件 HFSS 进行优化和仿真,且要使最终优化仿真的结果优于所要求的指标,保证足够的性能冗余度,以补偿由于制造工艺容差带来的性能恶化;

(6)将所优化仿真的结果和结构文件转交对应的 LTCC 制造工艺线,按工艺规则和流程制造所需的 LTCC 滤波器;

(7)将所制造的 LTCC 滤波器进行电性能测试,并与设计结果比较。

下面将结合本设计对 LTCC 滤波器的设计过程及其分析和考虑分别描述,并分析对性能和结构尺寸有重要影响的参数,以便综合考虑性能和尺寸要求,折中后效果最佳。

所设计滤波器基于二阶耦合谐振带通滤波器的原型<sup>[13]</sup>。由于蓝牙频段和 PCS 以及 GSM 频段非常接近,低端很容易受这两个频段的影响,故蓝牙滤波器对低阻带的抑制要求很高。为改善通带低端阻带衰减,本文所选的电路拓扑在通带低端边缘可形成传输零点,如图 1 所示。从图 1 可以看出,该电路有 3 个串联电容和两个 LC 并联谐振单元,其中电感 L1 和 L2 之间存在互感 M。

滤波器的谐振频率由 LC 谐振级的 Lr 和 Cr 决定,可求得 Lr 和 Cr 的值<sup>[9]</sup>。输入输出电容

C01 和 C23 的主要作用是端口的阻抗匹配,其值可由公式(2)求出<sup>[14]</sup>。串联电容 C12 式用来确定镜像频率  $\omega_e$ ,其值可由公式(3)计算而得<sup>[15]</sup>。互感 M 可以在两个谐振级间引入磁性耦合,与两谐振级之间的容性耦合一起作用使低端产生一传输零点,使得低阻带的抑制满足要求。

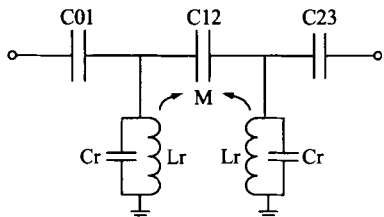


图 1 具有单传输零点的二阶耦合谐振带通滤波器原型

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

$$C_{01} = C_{23} = \frac{1}{\omega_0 Z_0 \sqrt{1 - \omega_0^2 C_{12} Z_0^2}} \quad (2)$$

$$\omega_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{L_1 L_2 C_{12}}{M}}} \quad (3)$$

互感 M 可等效为一串联在两个谐振级之间的电感 L12,两谐振级之间的磁耦合可通过调节电感的大小来控制,则原理图可以转化为图 2 所示电路。在计算出各个元件的值后,在 ADS 中对各个元件进行优化,仿真结果如图 3 所示。由图 3 可见,该滤波器的高端衰减并不理想,在转化为三维模型后由于高次模影响,仍很容易产生寄生通带。在高端引入一传输零点来抑制高次模产生的寄生通带,所以在图 2 所示电路上做了改进,即在原来的谐振级上添加了 Lz 和 Cz 串联谐振电路,如图 4 所示。零点的位置通过调节 Lz 和 Cz 的大小来控制,该电路的仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,经改进后的电路拓扑在通带高低端均出现一个传输零点。

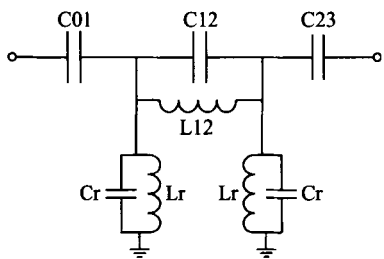


图 2 具有单传输零点的二阶耦合谐振带通电路的等效电路

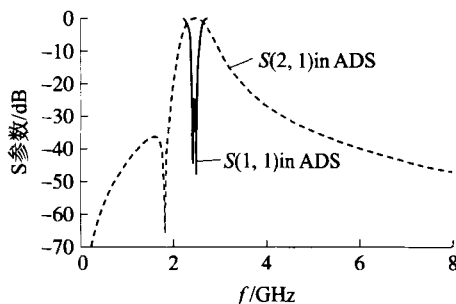


图 3 具有单传输零点二阶耦合带通滤波器仿真结果

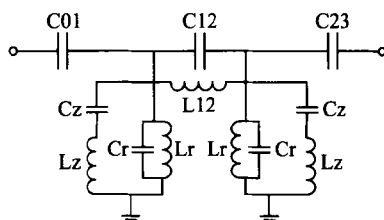


图 4 具有双传输零点的二阶耦合谐振带通滤波器等效电路

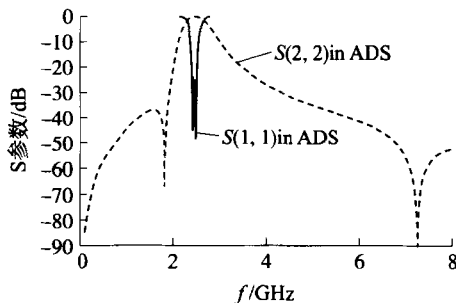


图 5 具有双传输零点二阶耦合谐振带通滤波器仿真结果

## 2 三维结构

从 LTCC 滤波器诞生至今,已有多种结构的多层 LTCC 滤波器模型,大致可以分为两类:LC 型和带状线型<sup>[16]</sup>。LC 型的 LTCC 滤波器主要是由集总的平板电容和电感元件构成,其中电容主要分 VIC (Vertically-integrated-capacitor) 电容和 MIM (Metal-insulator-metal) 电容,而电感主要是曲折线形电感和螺旋线形电感。带状线型 LTCC 滤波器的主体是传输线,一段传输线根据其电长度的不同其作用不同,可作为一个电感,或作为一个谐振单元<sup>[16]</sup>。带状线型 LTCC 滤波器的主要特点是充分利用传输线的分布电容和分布电感效应,以及传输线之间的耦合效应<sup>[17]</sup>。

本文所设计的蓝牙滤波器采用的是半集总结构,其中电容是由平板电容构成,而电感是用传输线

来替代,这样充分利用了三维空间,有效减小了整个滤波器的体积。其中在实现滤波器的三维结构中,有些结构参数对电性能有重要影响,下面针对有关结构参数对电性能有重要影响情况进行分析。

在 LTCC 的陶瓷介质中,电容与传统的平板电容相似,利用两块金属板间的耦合来实现,其电容值的大小可以利用经典的平行板电容计算公式  $C = (\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S) / d$  近似得到,其中  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数,  $S$  为平板的相对面积,  $d$  为平板间距离<sup>[11]</sup>。根据平板电容计算公式初步确定所需电容的三维尺寸。电容尺寸与滤波器谐振频率直接相关。

在 HFSS 软件中建好电容模型后一般都需要对初始模型进行微调,根据公式(4)在 HFSS 中提取精确的有效电容值。电感的初始尺寸根据  $L = 2l \left( \ln \frac{2l}{w+t} + 0.5 + \frac{w+t}{3l} \right)$  近似得到,其中  $l$  为线长,  $w$  为线宽,  $t$  为导体厚度<sup>[16]</sup>。电感的有效值由公式(5)在 HFSS 中提取出来

$$C_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}[Y(1,1)]}{\omega} \quad (4)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}[1/Y(1,1)]}{\omega} \quad (5)$$

图6和图7分别为 LTCC 蓝牙滤波器的三维立体结构分层示意图及其外部视图。该三维模型采用介电常数为27的陶瓷介质,其损耗角正切为0.001,包括6层金属图形,其中第一层为地。从图6可以看出,第2、3、4层金属图形形成了电容 C12,可等效为由4个分立电容相互串并联而成。故该蓝牙滤波器的三维结构的最终等效电路图应为图8所示。这种结构虽然复杂化了 C12,但是简化了整个滤波器的三维结构。从图6可以看出,两个对地电容 Cr 可以通过第2层和第一层直接构成,从而简化了整体电路。阻抗匹配电容 C01 和 C23 在经过原理图优化后已经很小,在三维电路中 C01 和 C23 模型也非常小。于是将 C01 和 C23 去掉后对整体三维电路进行仿真,其 S 参数并未发生大的改变。由于结构紧凑,分布电容效应明显,加之元件间的寄生效应和耦合效应所产生的寄生电容足以将 C01 和 C23 抵消,整体结构又因此而大大简化。第5层的 T 字型金属图案构成了对地电感 Lr 和耦合电感 L12。第6层的 T 字型金属图案是实现高端传输零点的关键,传输线本身的自电感构成了电感 Lz,而与第5层间的平板电容实现了电容 Cz,有效地抑制了高次

谐波。

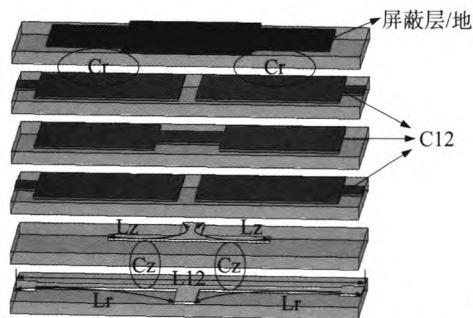


图6 蓝牙滤波器三维模型内部分层示意图

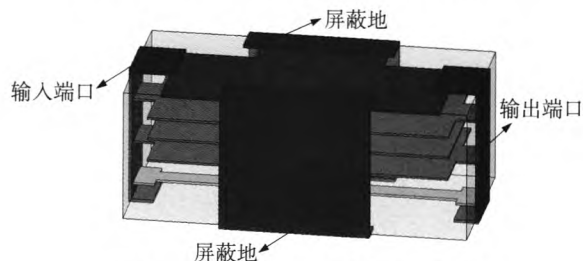


图7 蓝牙滤波器三维模型外部视图

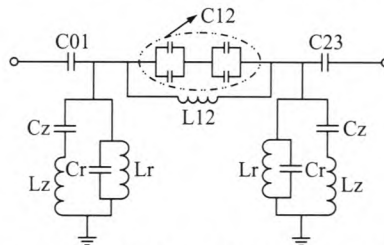


图8 蓝牙滤波器三维模型等效电路

### 3 实物制作

整体结构搭建完成后,经过多次优化仿真使其性能尽可能优于性能指标要求,保证性能有一定的冗余度,以补偿因工艺容差带来的性能偏差和恶化,将设计文件交给 LTCC 工艺线制作网版和工艺夹具,并在相应的 LTCC 生产线上完成滤波器的批量制作,制造中需采用相应的工艺监控技术,以确保滤波器的成品率。生产的滤波器成品照片如图9所示。这种 LTCC 微型蓝牙带通滤波器的尺寸仅为  $1.6 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$  (最大电尺寸为 0.013 06 波长)。

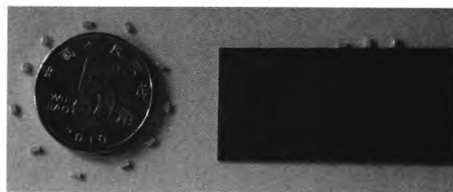


图9 蓝牙滤波器的实物照片

## 4 测试结果与讨论

采用安捷伦的矢量网络分析仪对所制造的蓝牙滤波器进行 S 参数测试,测试结果见图 10。由图 10 可以看出,测试曲线与三维仿真曲线的一致性很好。测试表明,在通带 2.4 ~ 2.5 GHz 内插损均小于 1.2 dB。通带反射损耗优于 16 dB。低阻带从 1.71 GHz 到 1.99 GHz 的衰减都大于 25 dB。尤其在 2.17 GHz 处,由于低端引入的传输零点的作用,衰减达到 10 dB。高阻带内通过引入传输零点很好地抑制了高次谐波,从 7.2 GHz 到 7.5 GHz 内的衰减均大于 25 dB,而且在 4.2 GHz 处大于 18.5 dB。成品率高达 93%。文献[10]的相同频段的研究结果为:尺寸 2.5 mm×2.0 mm×0.8 mm(最大电尺寸为 0.020 42 波长);通带 2.4 ~ 2.5 GHz 内插损均小于 1.93 dB;通带反射损耗优于 12 dB。通带低端抑制优于 23 dB;通带高端抑制优于 30 dB。显然,从尺寸和性能综合比较,本文的研究结果优于文献[10]。进一步的研究是如何在阻带高端增加多传输零点,使其阻带高端以及谐波抑制进一步改善。

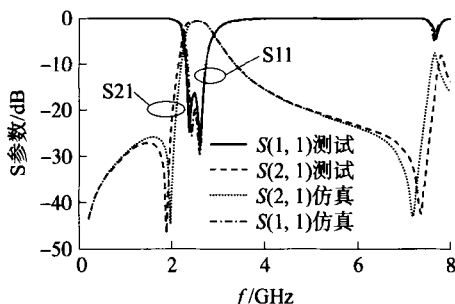


图 10 本文滤波器三维仿真与测试曲线比较

## 5 结论

本文基于二阶耦合谐振带通滤波器原型,采用半集总结构设计了一款微型 LTCC 蓝牙滤波器。在二阶带通原型基础上,通过在通带频率高、低端阻带各引入一个传输零点,以满足低阻带高抑制以及高阻带高次谐波抑制的要求。通过合理设计各个元件参数和三维结构布局,实现尺寸小和性能优异的目的,经 LTCC 工艺线加工完成微型 LTCC 滤波器的制造。对制作的滤波器进行性能测试,测试和设计结果一致性好。本文所讨论的方法和思路对其他三维集成滤波器的设计均有

参考意义。所研究的 LTCC 微型滤波器性能优异,结构新颖,布局紧凑,尺寸小,成品率高,更适合应用于蓝牙耳机。

### 参考文献:

- [1] Dai Yongsheng, Guo Yuhong, Tang Xiongxin, et al. A UHF-band miniaturized LTCC band-pass filter with high performance [A]. Proceedings of 2010 APEMC [C]. Beijing, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 12-16.
- [2] Scrantom C Q, Lawson J C. LTCC technology: where we are and where we're going- II [J]. IEEE International Microwave Symposium Digest, 1999, 21-24 (1): 193-200.
- [3] Dai Yongsheng, Zhang Haisheng, Qi Gaopin, et al. LTCC bandpass filter for bluetooth application with dual transmission zeros [A]. IEEE trans on ICMMT2008 [C]. Nanjing, China: Microwave Society of Chinese Institute of Electronics, 2008: 284-286.
- [4] 杨邦朝, 付贤民, 胡永达. 低温共烧陶瓷 (LTCC) 技术新进展 [J]. 电子元件与材料, 2008, 27(6): 1-5.  
Yang Bangchao, Fu Xianmin, Hu Yongda. Recent progress on low temperature CO-fired ceramics (LTCC) technology [J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(6): 1-5.
- [5] 王美兰, 李天明, 郑宏宇, 等. LTCC 五阶 LC 带通滤波器的设计与关键工艺分析 [J]. 半导体技术, 2010, 35(11): 1130-1133.  
Wang Meilan, Li Tianming, Zheng Hongyu, et al. Design of five-order LC bandpass filters realized by LTCC and analyzation of key technics [J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(11): 1130-1133.
- [6] 李章涛. 双传输零点 LTCC 带通滤波器的设计与仿真 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 4(5): 209-212.  
Li Zhangtao. Design and simulation of LTCC bandpass filter with two transmission zeros [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010, 4(5): 209-212.
- [7] 莫远楠, 雷振亚, 任沛阁, 等. Pi 型电感耦合 LTCC 滤波器的寄生感性耦合研究 [J]. 电子元件与材料, 2011, 30(1): 17-22.  
Mo Yuannan, Lei Zhenya, Ren Peige, et al. Study on the parasitic inductive coupling in Pi-shaped inductively coupled LTCC filter [J]. Electronic Components and Materials, 2011, 30(1): 17-22.

- [8] 赵祖军,张丽华,高岭. LTCC 片式 LC 带通滤波器的设计与实现[J]. 半导体技术,2010,35(8):834-837.  
Zhao Zujun, Zhang Lihua, Gao Ling. Design and realization of LC filter based on LTCC [J]. Semiconductor Technology,2010,35(8):834-837.
- [9] 丁世敏,田辉. 基于 LTCC 技术双零点带通滤波器的研究[J]. 电子科技,2010,23(8):65-67.  
Ding Shimin, Tian Hui. Bandpass filter with two transmission zeros using LTCC technology [J]. Electronic Sci and Tech,2010,23(8):65-67.
- [10] Chang C F, Chung S J. Bandpass filter of serial configuration with two finite transmission zeros using LTCC technology [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech,2005,53(7):2383-2388.
- [11] Song H S, Lee Y S. A miniaturized 2.4 GHz band multilayer bandpass filter using capacitive loaded quarter wavelength slow-wave resonator [J]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig,2003,1(8-13):515-518.
- [12] Matthaei G L, Yung L, Jones E M T. Microwave filter, impedance-matching networks, and coupling structures [M]. New York USA:McGraw-Hill,1964.
- [13] 森荣二. LC 滤波器设计与制作[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [14] 甘本拔,吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京:科学出版社,1973.
- [15] 刘浩斌. 基于低温共烧陶瓷的片式无源集成器件[J]. 现代材料,2005,24(7):75-77.  
Liu Haobin. Chip passive integrated device based on low-temperature co-fired ceramic [J]. Modern Material,2005,24(7):75-77.
- [16] 戴永胜,周聪,徐利,等. Ku 波段超窄带低损耗高抑制微型带通滤波器[P]. 中国专利:201010555946.6,2010-11-24.
- [17] 戴永胜,姚友芳,叶仲华,等. 低损耗高阻带抑制多零点微型带通滤波器[P]. 中国专利:200910184019.5,2009-11-24.

## 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/>