

源 - 负载耦合发夹梳双频带通滤波器的设计*

褚庆昕¹ 欧阳霄^{1,2} 黎志辉¹

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640; 2. 空间微波技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 为得到具有高选择性、小尺寸、低成本的双频带通滤波器, 提出了一种具有准椭圆函数响应的双频带通滤波器设计方法。该滤波器利用两组工作于不同工作频率的发夹梳型谐振器, 因此能够提供足够的自由度去设计两个独立可控的通带。谐振单元之间的混合电磁耦合可以产生可控的传输零点, 而源 - 负载耦合同样能够在通带外产生传输零点, 因此混合电磁耦合与源 - 负载耦合的结合使阻带内具有多个传输零点, 可以有效地提高滤波器的选择性和抑制阻带。最后设计加工了一个工作在 2.4 和 5.2 GHz 的双频带通滤波器, 测量结果与仿真结果吻合良好, 验证了该设计方法的有效性。

关键词: 带通滤波器; 双频; 发夹梳型谐振器; 混合电磁耦合; 源 - 负载耦合

中图分类号: TN713

doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.06.003

随着现代无线通信技术的飞速发展, 同时工作在双频段的通信系统成为无线通信研究的一个重要方向, 双频段通信系统的发展意味着对双频带通滤波器的性能要求也将会越来越高。为了满足多频系统的要求, 许多学者进行了广泛的研究^[1-7]。双频带通滤波器的设计方法主要有 2 种: (1) 通过控制阶梯阻抗谐振器的阻抗比来达到控制基频和谐波两个通带频率比的目的^[1-3], 但由于第 1 个通带和第 2 个通带的耦合系数均由同一条物理耦合路径控制, 当调整谐振器之间的物理参数时会同时影响两个通带的耦合系数, 所以通常很难同时满足两个通带指定的带宽设计要求; (2) 通过利用两组工作在不同频率的谐振器来设计双频带通滤波器^[4-7], 该方法使用了两组工作在不同频率的谐振器, 虽然能够设计出独立可控的双频带通滤波器, 但双频带通滤波器需要占用相对较大的面积。另外, 上述文献中所设计的双频带通滤波器普遍存在滤波器选择性较差、通带外抑制不足的缺点, 如何在不增加电路面积的前提下提高双频带通滤波器的选择特性是文中关注的重点。

为了提高滤波器的选择特性, 在通带外引入有限频率传输零点被认为是改善滤波器性能的重要手段。文献[8-10]中通过混合电磁耦合引入可控的传输零点, 并通过控制电耦合和磁耦合的叠加使传输零点置于通带的左侧或右侧。可控混合电磁耦合方法只需要一条物理路径即可实现传输零点, 与传统交叉耦合利用两条物理路径叠加后的相位差实现传输零点相比, 具有谐振器数量少、电路面积较小等优点。文献[11-13]中的滤波器通过输入和输出传输线之间的间隙耦合, 使得信号从源端到负载之间多出一条路径, 从而实现传输零点的引入。

为了实现一个尺寸小、选择性能好的双频带通滤波器, 文中提出了一种新型的源 - 负载耦合的发夹梳双频带通滤波器设计方法: 利用两组摆放方向相反的发夹梳型谐振器分别设计两个通带, 每个通带的带宽由谐振器间的耦合系数控制, 两组谐振器独立工作, 其中一个通带带宽变化对另一个通带不会产生影响, 所以能够在不增加滤波器尺寸的前提下做到两个通带性能的独立可控; 利用两边不等长

收稿日期: 2011-12-13

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171029); 重点实验室基金资助项目(9140C5306021008)

作者简介: 褚庆昕(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事射频电路及天线研究. E-mail: qxchu@scut.edu.cn

的发夹梳型谐振器之间的混合电磁耦合,通过改变耦合段的长度来实现传输零点位置的改变;采用源-负载耦合以引入更多的传输零点,提高滤波器的选择性和增加对阻带的抑制效果.文中结合3种方法(混合电磁耦合、源-负载耦合、抽头馈电法)设计并加工了工作在2.4和5.2GHz的发夹梳双频带通滤波器,通过仿真实验验证了所提出的设计方法的有效性.

1 双频带通滤波器的原理

文中所提出的源-负载耦合发夹梳双频带通滤波器结构如图1所示,该滤波器由两组工作在不同中心频率的半波长发夹梳型谐振器组成,谐振单元1和4工作在中心频率 f_1 处,谐振单元2和3工作在中心频率 f_2 处,源-负载耦合通过抽头馈线之间的交指耦合线实现.

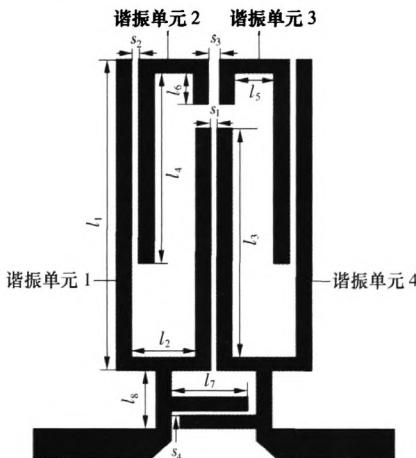


图1 源-负载耦合发夹梳双频带通滤波器的结构图

Fig. 1 Configuration of hairpin-comb dual-band bandpass filter with source-load coupling

1.1 滤波器的拓扑结构

图2给出了文中所提出的双频带通滤波器的拓扑结构,该二阶滤波器为对称结构.如图2(a)所示,当工作在第1个通带中心频率 f_1 时,只有单元1和4谐振,单元2和3相当于负载.如图2(b)所示,当工作在第2个通带中心频率 f_2 时,单元2和3谐振,单元1和4不谐振,成为馈线的一部分.由于两个通带分别利用两组谐振器工作,且输入输出端馈线的交指线产生的源-负载耦合并不会影响工作频率,因此,可以分别通过调节每组谐振单元的谐振器长度来实现两个通带的中心频率和带宽的独立控制.

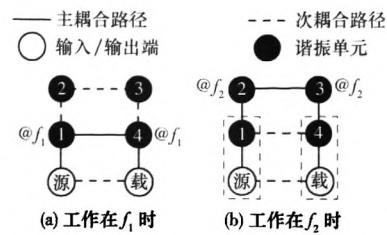


图2 源-负载耦合发夹梳双频带通滤波器的耦合结构
Fig. 2 Coupling structure of hairpin-comb dual-band bandpass filter with source-load coupling

1.2 发夹梳谐振器

发夹梳谐振器是构成双频带通滤波器的基本单元,谐振单元之间的混合电磁耦合可以通过改变耦合长度来控制.在保持谐振器总长为半波长的前提下,二阶发夹梳双频带通滤波器在不同耦合长度时的电磁仿真响应如图3所示.该滤波器的等效电路如图4所示,其中 C_1 和 C_2 为串联电容, C_m 和 L_m 分别为谐振器之间的耦合电容和耦合电感,每个谐振器的中心角频率 $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$,由串联的电容 C 和电感 L 决定.因此,可以得到 $C_1 = CC_m/(C_m - C)$, $C_2 = C_m/2$.

对于窄带滤波器,定义磁耦合系数 M_c 和电耦

合系数 E_c 分别为 $M_c = \frac{L_m}{L}$, $E_c = \frac{C}{C_m}$,在混合电磁耦合滤波器中,总耦合系数 k 通常由电耦合系数 E_c 及磁耦合系数 M_c 计算得到:

$$k = \frac{M_c - E_c}{1 - M_c E_c} \quad (1)$$

因此,当电耦合系数和磁耦合系数相互抵消时,会产生一个传输零点,并且传输零点的频率 f_z 为

$$f_z = f_0 \sqrt{\frac{E_c}{M_c}} \quad (2)$$

式中, f_0 为谐振频率.

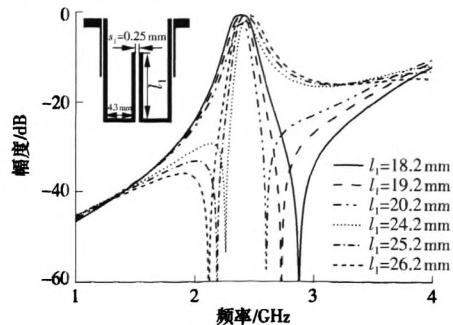


图3 二阶发夹梳双频带通滤波器的电磁仿真响应

Fig. 3 Electromagnetic simulated responses of two-order hairpin-comb dual-band bandpass filter

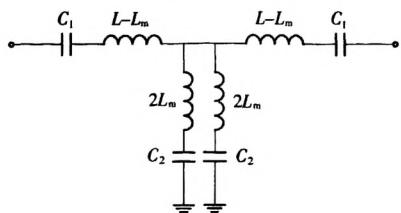


图4 二阶发夹梳带通滤波器的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of two-order hairpin-comb band-pass filter

图5给出了不同磁耦合系数时等效电路的响应结果,可以看出响应结果与电磁仿真结果(见图3)相一致,从而证明了该方法的有效性。因为谐振单元间的开路端实现了较强的电耦合,所以可以通过改变谐振单元之间的耦合间隙大小和耦合长度来实现所需要的混合电磁耦合。

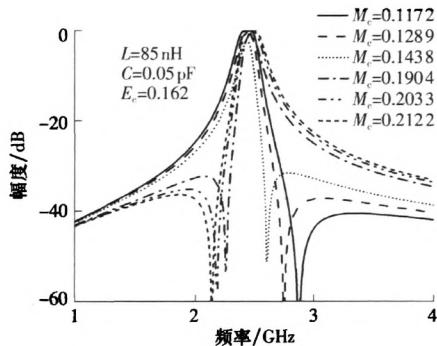
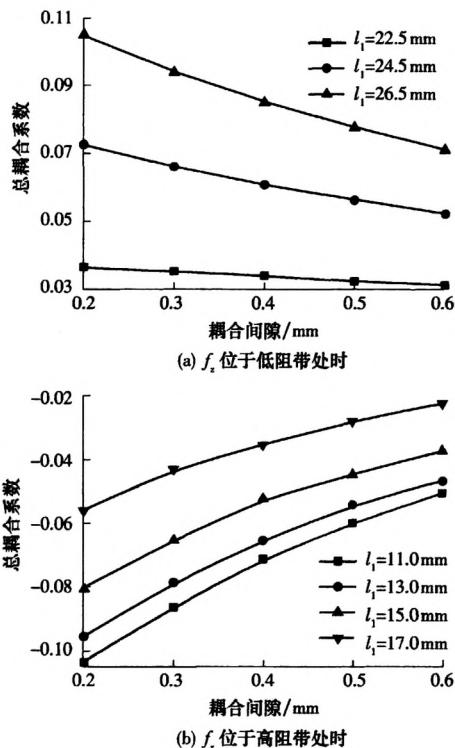
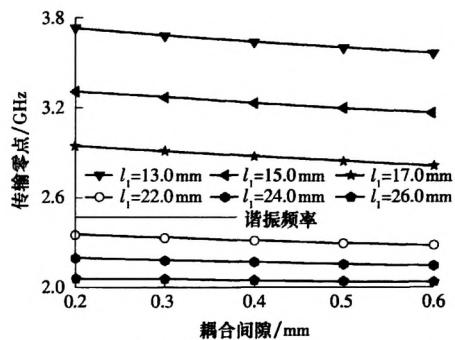


图5 不同磁耦合系数时等效电路的仿真响应曲线

Fig. 5 Simulated response curves of equivalent circuit at different magnetic coupling coefficients

图6给出了传输零点 f_0 分别位于低阻带和高阻带时耦合系数与耦合间隙的关系曲线,可以知道:当耦合长度大于四分之一波长时,磁耦合为主耦合,总耦合系数恒为正数,且随着耦合长度的增加而增大,随着耦合间隙的增加而减小;当耦合长度小于四分之一波长时,电耦合为主耦合,总耦合系数恒为负数,且随着耦合长度或耦合间隙的增加而减小。总耦合系数越接近0,则传输零点的位置越靠近中心频率 f_0 。图7给出了耦合长度参数调整时传输零点与谐振单元间耦合间隙的关系曲线。

构成第2个通带的另一组谐振器同样也是采用该混合电磁耦合发夹梳结构,因此具有类似的传输零点特性。

图6 不同长度 l_1 下耦合系数与耦合间隙的关系Fig. 6 Relationship between coupling coefficient and coupling spacing at different values of l_1 图7 不同长度 l_1 下传输零点与耦合间隙的关系Fig. 7 Relationship between transmission zero point and coupling spacing at different values of l_1

1.3 源-负载耦合

源-负载耦合产生的传输零点很难通过数值计算得到其位置,但可以通过改变源-负载耦合参数对其位置进行分析。图8给出了不同源-负载耦合时滤波器的响应曲线,当交指线之间的源-负载耦合不存在时,因为受到低频通带在4.8 GHz产生的

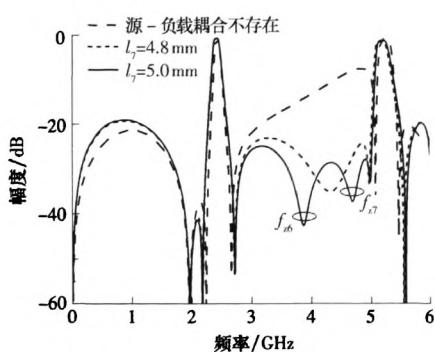


图 8 不同源-负载耦合时滤波器的响应

Fig. 8 Responses of filter with different source-load coupling

谐波的影响,所以高频通带的带外性能较差.在引入源-负载耦合后,两个通带之间的阻带内产生了传输零点,可以有效抑制第1个通带的谐波,通过增加交指线之间的耦合长度或减小耦合间隙可以达到增强源-负载耦合的目的,此时阻带内的传输零点将会由一个分裂成两个.

2 双频带通滤波器的设计

为了验证文中方法的有效性,在相对介电常数 $\epsilon_r = 2.55$ 、厚度 $h = 0.8$ mm、正切损耗角 $\tan \delta = 0.0029$ 的介质基板上制作双频带通滤波器.该双频带通滤波器的设计步骤可以概括如下:

- (1)根据给定的滤波器性能指标,推导出各个通带的耦合系数等参数;
- (2)通过平行耦合的馈电方式,利用半波长发夹梳型谐振器来设计高频通带;
- (3)采用抽头馈电的方式来设计低频通带,求出满足条件的参数;
- (4)引入源-负载耦合,调节源-负载耦合的大小得到所需传输零点.

根据上述步骤,设计一个工作在2.4和5.2 GHz的带宽分别为0.06和0.04的双频带通滤波器.根据指标可以分别求出滤波器的参数:输入端口 Q 值 $Q_{el} = 17$,输出端口 Q 值 $Q_{e2} = 28$,第1个通带的耦合系数 $k_1 = -0.0980$,第2个通带的耦合系数 $k_2 = -0.0698$;经过电磁仿真软件IE3D优化后可以得到滤波器的最终尺寸为:线宽1 mm, $l_1 = 22.8$ mm, $l_2 = 4.2$ mm, $l_3 = 16.8$ mm, $l_4 = 13.9$ mm, $l_5 = 2.5$ mm, $l_6 = 2.3$ mm, $l_7 = 5.04$ mm, $l_8 = 4.25$ mm, $s_1 = 0.36$ mm, $s_2 = 0.48$ mm, $s_3 = 0.75$ mm, $s_4 = 0.30$ mm.图9给出

了滤波器的插入损耗(S_{21})和回波损耗(S_{11})的测试和仿真结果,可以看出 S_{21} 和 S_{11} 的测试结果和仿真结果吻合良好.在2.4和5.2 GHz处测量的插入损耗分别为2.2和2.3 dB.混合电磁耦合产生的两个传输零点分别位于2.72和5.29 GHz处,源-负载耦合产生的两个传输零点分别位于3.88和4.68 GHz处,抽头馈电引入的传输零点则位于2.24 GHz处,位于两个通带低阻带处的传输零点是由于微带发夹梳谐振器对称结构的奇模和偶模相速不一致而产生的.图10给出了该滤波器的实物图,尺寸约为12.9 mm \times 29.0 mm.3种二阶滤波器的性能比较如表1所示,其中矩形度 $= \Delta f|_{20\text{dB}} / \Delta f|_{3\text{dB}}$.由表1可知,当3种双频带通滤波器所设计的中心频率均为2.4和5.2 GHz时,文中所设计的滤波器与文献[5]中的小型双频带通滤波器尺寸接近,均小于文献[2]中的滤波器尺寸,说明文中设计方法能够明显改善两个通带的矩形度.

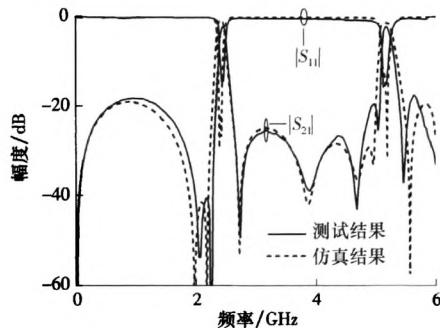


图 9 双频带通滤波器的仿真和测试结果

Fig. 9 Simulated and measured results of the designed dual-band bandpass filter

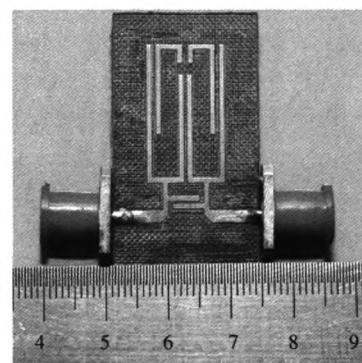


图 10 双频带通滤波器实物图

Fig. 10 Photograph of the designed dual-band bandpass filter

表1 3种二阶滤波器的性能比较

Table 1 Comparison of performance among three two-order filters

名称	通带/GHz		尺寸/mm		插入损耗/dB		矩形度
	f_1 处	f_2 处	f_1 处	f_2 处	f_1 处	f_2 处	
文献[2] 滤波器	2.4	5.2	25.0 × 25.0	1.4	1.6	4.10	6.10
文献[5] 滤波器	2.4	5.2	20.0 × 15.0	1.1	1.8	3.85	5.30
文中 滤波器	2.4	5.2	12.9 × 29.0	2.2	2.3	1.88	1.64

3 结语

文中提出了一种基于混合电磁耦合发夹梳型谐振器的双频带通滤波器设计方法,分别利用两组发夹梳型谐振器来设计两个独立可控的通带,发夹梳型谐振器之间的混合电磁耦合可以产生一个可控的传输零点,混合电磁耦合与源-负载耦合的结合,可以很好地改善双频带通滤波器的阻带特性,并抑制低频通带谐波对高频通带造成的影响。最后设计加工了一个在通带外具有7个传输零点的双频带通滤波器,并进行了试验,理论分析、仿真分析和加工测试结果吻合良好,验证了文中设计方法的有效性。今后拟将该方法应用于三频及以上带通滤波器的设计中,以满足多频无线通信系统对滤波器不断提高的要求。

参考文献:

- [1] Wu H W, Yang R Y. A new quad-band bandpass filter using asymmetric stepped impedance resonators [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2011, 21(4): 203-205.
- [2] Chu Q X, Chen F C. A compact dual-band bandpass filter using meandering stepped impedance resonators [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2008, 18(5): 320-322.
- [3] Tang C W, Wu P H. Design of a planar dual-band bandpass filter [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2011, 21(7): 362-364.
- [4] Dai G L, Guo Y X, Xia M Y. Dual-band bandpass filter using parallel short-ended feed scheme [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2010, 20(6): 325-327.
- [5] 褚庆昕,叶亮华,陈付昌.小型双频带通滤波器的设计[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(6):7-10.
Chu Qing-xin, Ye Liang-hua, Chen Fu-chang. Design of compact dual-band bandpass filter [J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2010,38(6):7-10.
- [6] Deng P H, Jheng J H. A switched reconfigurable high-isolation dual-band bandpass filter [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2011, 21(2): 71-73.
- [7] Zhang X Y, Xue Q, Hu B J. Planar tri-band bandpass filter with compact size [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2010, 20(5): 262-264.
- [8] Chu Q X, Wang H. A compact open-loop filter with mixed electric and magnetic coupling [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 431-439.
- [9] Ouyang X, Chu Q X. High-order quasi-elliptic bandpass filters using mixed EM coupling hairpin-comb resonators [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(14/15): 1975-1984.
- [10] Wang H, Chu Q X. A narrow-band hairpin-comb two-pole filter with source-load coupling [J]. IEEE Microwave Wireless Component Letters, 2010, 20(7): 372-374.
- [11] Wei C L, Zhu B F, Tang M C. Hexagonal dual-mode filter with four transmission zeros [J]. Electronics Letters, 2011, 47(3): 195-196.
- [12] Deng H W, Zhao Y J, Zhang X S, et al. High rejection quadruple-mode broadband BPF with source-load coupling [J]. Electronics Letters, 2011, 47(1): 37-38.
- [13] 褚庆昕,范莉.具有4个传输零点的源-负载耦合滤波器[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(10):14-18.
Chu Qing-xin, Fan Li. Source-load coupling filter with four transmission zero points [J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2010, 38(10):14-18.

(下转第21页)

- 395-406.
- [14] McMurchie L, Ebeling C. PathFinder: a negotiation-based performance-driven router for FPGAs [C] // Proceeding of the ACM/SIGDA Third International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. New York: ACM, 1995: 111-117.

Implementation of Placement and Routing Improvement for Island-Style FPGA Chips

Li Ming¹ Li Yan Chen Liang Yu Fang Liu Zhong-li

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to overcome the loose coupling between FPGA (Field Programmable Gate Array) placement and routing, an improved placement and routing tool named IVPR is exploited. In IVPR, the directions of logic block pins are considered during the placement to perform a more precise delay forecast, and the possible directions of logic block pins during the routing are predicted to choose an appropriate delay. Thus, the combination between the placement and the routing becomes more effective. Moreover, for the high fanout in the netlist, the net terminal alignment is employed during the placement and the longline-priority strategy is adopted during the routing. Tested results on an island-style FPGA chip VS1000 show that, as compared with the typical placement and routing tool VPR, IVPR reduces the circuit delay by 16.4% and increases the routing resource utilization by 1.9%.

Key words: field programmable gate array; placement; routing; delay forecast; net terminal alignment

责任编辑: 许花桃

(上接第 15 页)

Design of Hairpin-Comb Dual-Band Bandpass Filter with Source-Load Coupling

Chu Qing-xin¹ Ouyang Xiao^{1,2} Li Zhi-hui¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave Technology, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to develop dual-band bandpass filters with high selectivity, small size and low cost, a novel method to design the filter with quasi-elliptic response is presented. In this method, two sets of hairpin-comb resonators working at different frequencies are utilized, which provides enough freedom for the independent control of two passbands. The mixed electromagnetic coupling of hairpin-comb resonators can generate a controllable out-of-band transmission zero, and the source-load coupling can also introduce additional transmission zeros in the stopband. Therefore, the selectivity and the stopband-restricting ability of the filter are both improved by the transmission zeros caused as much as possible by the combination of these two couplings. A dual-band bandpass filter operating at 2.4 and 5.2 GHz is finally designed and fabricated, and the measured results accord well with the simulated ones, which means that the proposed design method is effective.

Key words: bandpass filter; dual band; hairpin-comb resonator; mixed electromagnetic coupling; source-load coupling

责任编辑: 许花桃

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>