

工程与应用

多层多缝隙微带通滤波器的研究

吕文俊¹, 邓哲², 程勇¹

(1. 南京邮电大学 无线通信与电磁兼容实验室, 南京 210003;

2. 安德鲁 - 弗雷通信技术(深圳)公司, 广东深圳 518020)

摘要: 研制了一种新型结构的多层多缝隙微带滤波器, 该滤波器采用在微带线屏蔽导体上制作多个缝隙的方式实现; 首先利用微波网络理论进行分析计算, 并借助电磁仿真软件对影响滤波器性能的某些参数进行了研究; 在计算的基础上, 进行了实验研究。实验结果与计算结果吻合良好, 表明文中所用分析方法是正确有效的。此外, 这类滤波器的带宽能在 0.8% ~ 15.5% 范围内灵活调整, 不仅具有较低的插入损耗和良好的匹配特性, 还具有较好的边带抑制特性与谐波抑制特性, 因此它可望在多层微波集成电路或多层印刷电路设计中得到应用。

关键词: 微带通滤波器; 多层滤波器; 多缝隙

中图分类号: TN919.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-5692(2007)03-283-05

Study on Multilayer Multislots Microstrip Bandpass Filter

LV Wen-jun¹, DENG Zhe², CHENG Yong¹

(1. Lab of Wireless Communications & EMC, Nanjing University of Posts & Telecom.,
Nanjing, 210003, China

2. Andrew INC., Guangdong Shenzhen 518020, China)

Abstract: A novel multilayer multislots microstrip bandpass filter is presented and studied in detail in this paper. The filter has a simple construction with multislots etched on a common ground plane. It is modeled and analyzed by employing microwave network theorem first. With the aid of EM simulation software, some parameters of the filter are studied numerically. Based on numerical results, different prototypes are fabricated and studied experimentally. The good accordance between calculated and measured results implies that the model used in this paper is correct and effective. It is also observed that an adjustable bandwidth from 0.8% to 15.5% can be achieved, in which low insertion loss and good matching characteristic can be achieved. Furthermore, good out of band rejection and high harmonic suppression performances are also achieved. Thus the proposed filters may be useful for multilayer microwave integrated circuits (MICs) or multilayer printed circuit board (PCB) applications.

Key words: microstrip bandpass filter; multilayer filter; multislots

0 引言

随着现代无线通信的发展, 多层微波平面电路和多层微波集成电路得到广泛的应用。由于采用多层次结构可以充分利用垂直方向上的空间, 有利于电

路尺寸的缩减、提高集成度, 同时大大增加电路设计的自由灵活程度, 因此多层电路得到广泛的关注和研究。

多层微波电路设计中, 缝隙(槽线)-微带混合结构是最常见的结构之一。现有文献讨论较多的是

单缝隙耦合结构^[1~4]、周期性缺损地面结构(DGS, defected ground structure)^[5]等。近年来,非周期性多缝隙—微带结构的研究和应用也得到了重视。目前对这类结构的研究,主要采用数值算法结合微波网络理论,提取合理的等效电路参数进行快速CAD设计,然后在计算的基础上,通过电磁场数值分析和实验研制各种不同性能的电路和部件。利用非周期性缝隙—微带结构,已经可以成功设计出性能良好的低通滤波器^[6]、定向耦合器^[1,7]和宽带天线^[8]。但是,利用这种结构实现带通滤波器的工作尚未见有报道。

在上述文献的基础上,本文作者首次在文献[9]简单报道了如何在两块具有公共屏蔽导体的微带基片上,通过在屏蔽导体上刻蚀多个不同尺寸缝隙的方法实现带通滤波特性。本文在文献[9]的基础上,通过进一步建立微波网络模型,对其性能进行建模计算,再借助全波仿真软件IE3D对影响其谐振特性的某些尺寸参数进行分析比较;在计算的基础上,进行多个样品制作和测试,对滤波器的实际性能进行实验研究。

1 滤波器结构及其网络模型

滤波器的结构如图1所示。可见滤波器的结构相当简单,两个端口位于基片的两侧,屏蔽导体位于基片中间。通过在公共屏蔽导体上制作不同尺寸、位置的缝隙,可实现带通滤波特性。为了简单起见,不妨以图1中的三缝隙滤波器为例进行建模分析。由于“直缝隙—微带”结构的等效电路可直接采用文献[6,7]中的微波网络进行分析,因此设计中只需对耦合中缝(slot2)的模型进行修改,即对“微带—直缝隙—微带”结构进行建模,其等效电路如图2所示。

图2中, Z_s 为缝隙(槽线)的特性阻抗, β_s 为该缝隙中的相位因子, L_s 为该缝隙的物理长度, ΔL_s 为缝隙短路端电感折算的等效伸长, Z_m 为微带线的特性阻抗, β_m 为微带线的传输常数, L_m 为微带终端开路支节的物理长度。低介电常数基片上的槽线特性阻抗及理想变压器的匝比 n_1, n_2 可由文献[10,11]中提出的实验闭式进行近似估算。

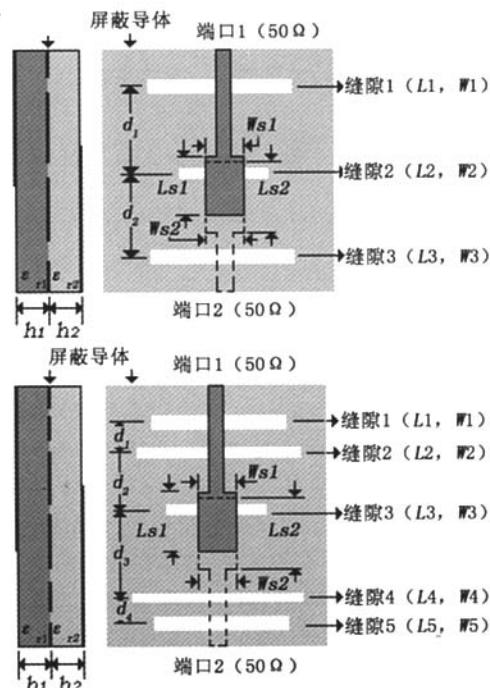


图1 滤波器的结构

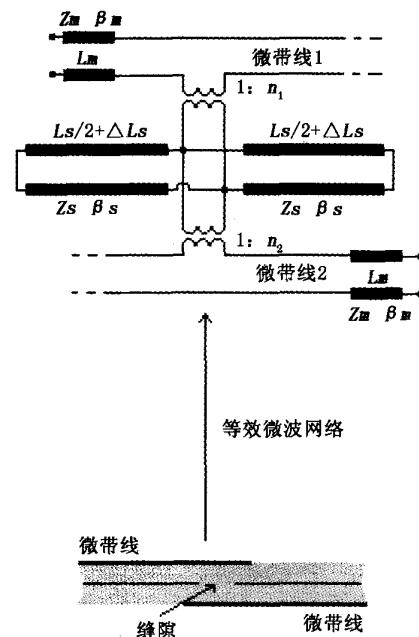


图2 耦合中缝的等效传输线模型

$$Z_{si} = 60 + 3.69 \sin\left[\frac{(\epsilon_r - 2.22)\pi}{2.36}\right] + 133.5 \ln(10\epsilon_r) \sqrt{W/\lambda_0} + 2.81[1 - 0.011\epsilon_r(4.48 + \ln\epsilon_r)](W/h)$$

$$\ln(100h/\lambda_0) + 131.1(1.028 - \ln\epsilon_r)\sqrt{h/\lambda_0} + 12.48(1 + 0.18\ln\epsilon_r)\frac{W/h}{\sqrt{\epsilon_r - 2.06 + 0.85(W/h)^2}} \quad (1)$$

$$n_i = J_0(\beta_{si}W_i/2)J_0(\beta_mW_s/2)/(\beta_{si}^2 + \beta_m^2) \cdot \left(\frac{\beta_m^2 k_2 \epsilon_{rm}}{k_2 \epsilon_{rm} \cos k_1 h - k_1 \sin k_1 h} + \frac{\beta_{si}^2 k_1}{k_1 \cos k_1 h + k_2 \sin k_1 h} \right) \quad (2)$$

式中, J_0 表示零阶 Bessel 函数; ϵ_{rm} 表示微带线所在介质基片的相对介电常数(对于单层介质的情况, 就是介质基板的介电常数 ϵ_r); β_m 为微带线的传输常数, k_1, k_2 分别由式(3), (4)计算。

$$k_1 = k_0 \sqrt{|\epsilon_{rm} - \epsilon_{res} - \epsilon_{rem}|} \quad (3)$$

$$k_2 = k_0 \sqrt{|\epsilon_{res} + \epsilon_{rem} - 1|} \quad (4)$$

式(3), (4)中的 $\epsilon_{res}, \epsilon_{rem}$ 分别表示缝隙(槽线)和微带线的等效介电常数; k_0 表示电磁波在自由空间中的波数。根据微波网络理论, 整个滤波器可以等效为一系列微波子网络的级联, 故其转移矩阵 $[A]$ 可以表示为各级子网络转移矩阵的乘积

$$[A] = \prod_{i=1}^N [A_i] \quad (5)$$

进而根据转移矩阵与散射矩阵的换算关系, 计算出滤波器的反射和传输特性。

为了检验模型的正确性, 还需借助全波分析软件进行计算比较验证。表 1 给出了两种不同三缝隙滤波器的参数(尺寸单位为 mm, 下同), 以滤波器 1 为例, 采用传输线模型与全波分析软件 IE3D 计算的结果如图 3 所示; 可见不同方法计算的结果吻合较好, 频响曲线形状是一致的, 仅仅中心频率出现轻微的偏差。这一误差来自于传输线(微带、槽线)不连续性, 可以通过采用更精确的网络 CAD 模型进行修正消除之。类似地进行推广, 只需改变子网络的数量和参数, 即可利用该传输线模型分析不同尺寸、含有任意数量直缝隙的多缝隙滤波器。与传统的数值计算方法相比, 网络模型更为直接, 参数物理意义更为明显, 采用这个模型将有助于这类滤波器的快速 CAD。

表 1 两种不同三缝隙滤波器的参数

尺寸参数	滤波器 1	滤波器 2
$(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$	(2.65, 2.65)	(10, 10)
(h_1, h_2)	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)
(d_1, d_2)	(12.2, 12.2)	(9.15, 9.15)
(L_1, W_1)	(35.0, 4.0)	(20.6, 1.9)
(L_2, W_2)	(28.0, 2.0)	(16.0, 0.6)
(L_3, W_3)	(35.0, 4.0)	(20.6, 1.9)
(L_{s1}, W_{s1})	(10.5, 4.2)	(8.5, 2.4)
(L_{s2}, W_{s2})	(10.5, 4.2)	(8.5, 2.4)

2 实验研究与参数分析

在数值模拟的基础上, 根据表 1 参数, 在 S 波段设计制作了两种不同的三缝隙滤波器进行实验研究, 部分样品实物如图 4 所示, 所有样品的测试采用 HP8720ET 矢量网络分析仪完成。实验结果与计算结果如图 5 所示。可见实测结果与计算结果吻合良好, 由于实验中微带屏蔽导体的面积有限, 因此测量结果向频率高端轻微偏移约 10~20 MHz, 不超过中心频率的 1%。从图 5 还可见, 两种三缝隙滤波器工作中心频率分别为 2.4 GHz 与 2.53 GHz, 相对带宽分别为 1.1% 和 0.8%, 带内插损均低于 2 dB(分别为 -1.54 dB, -1.84 dB)。因此, 三缝隙滤波器是一种窄带滤波器。

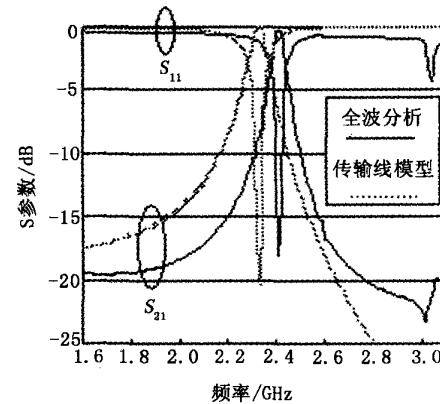


图 3 不同方法的计算结果比较

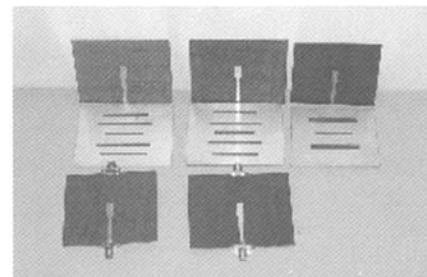


图 4 部分滤波器实物图

为了获得任意可控制的带宽,有必要增加缝隙的数量以引入更多的谐振点(resonance),然后通过调整滤波器的尺寸参数,控制这些谐振点之间的耦合即可获得不同的带宽。下文将以五缝隙滤波器为例进行说明。

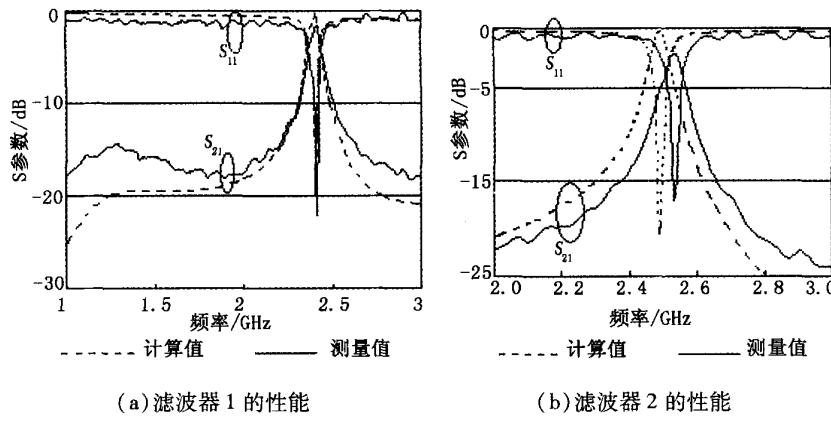


图 5 三缝隙滤波器的计算与实测性能

表 2 三种不同五缝隙滤波器的参数

尺寸参数	滤波器 3	滤波器 4	滤波器 5
$(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$	(2.65, 2.65)	(2.65, 2.65)	(2.65, 2.65)
(h_1, h_2)	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)	(1.0, 1.0)
(d_1, d_2)	(5.95, 9.5)	(7.95, 9.5)	(10.15, 8.5)
(d_3, d_4)	(5.95, 9.5)	(7.95, 9.5)	(10.15, 8.5)
(L_1, W_1)	(34.0, 2.1)	(34.0, 2.1)	(34.0, 2.1)
(L_2, W_2)	(39.0, 2.0)	(39.0, 2.0)	(39.0, 2.0)
(L_3, W_3)	(29.0, 1.0)	(29.0, 2.0)	(29.0, 4.0)
(L_4, W_4)	(39.0, 2.0)	(39.0, 2.0)	(39.0, 2.0)
(L_5, W_5)	(34.0, 2.1)	(34.0, 2.1)	(34.0, 2.1)
(L_{s1}, W_{s1})	(10.5, 4.8)	(10.5, 4.8)	(10.5, 4.8)
(L_{s2}, W_{s2})	(10.5, 4.8)	(10.5, 4.8)	(10.5, 4.8)

借助全波分析软件可以发现,五缝隙滤波器存在两个明显的谐振点。以滤波器 4 的参数为例,随着中间缝隙宽度 W_3 的变化,两个谐振点谐振频率的变化规律如图 6 所示。随着 W_3 的增加,两个谐

表 2 给出的是三种不同五缝隙滤波器的参数。由于两个端口之间的耦合主要依靠微带开路支节和耦合中缝(slot3)控制,因此必须研究耦合中缝尺寸对滤波器谐振特性的影响。

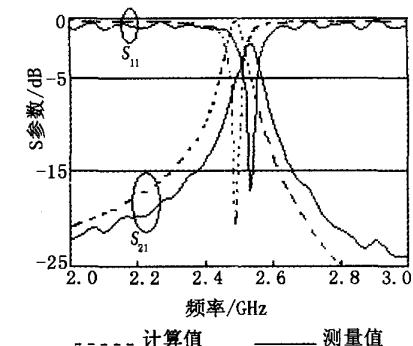


图 6 谐振点频率随 W_3 的变化规律

振点的频率逐渐分离,根据耦合系数的定义,两者耦合变强,故滤波器带宽增加; W_3 减小,则谐振点之间的耦合变弱,滤波器带宽减少。

仍以滤波器 4 为例,图 7 所示的是五缝隙滤波器两个不同谐振点的谐振频率随缝隙宽度 L_3 的尺寸变化规律。由模拟结果可见,耦合缝隙的长度也将显著影响谐振点之间的耦合程度,其影响规律类似于图 6 中的结论。为了灵活调整滤波器的带宽,应根据实际指标需要,同时调整耦合中缝的长度 L_3 和宽度 W_3 的数值,以获取合理的耦合程度、实现所需的工作带宽。

在数值模拟的基础上,按照表 2 中的参数加工制作了三种不同的滤波器,仍选择在 S 波段进行实验研究,所有样品采用 HP8720E 型矢量网络分析仪进行测量。三种滤波器的性能如图 8 所示。

由图可见,三种滤波器均具有两个明显的谐振

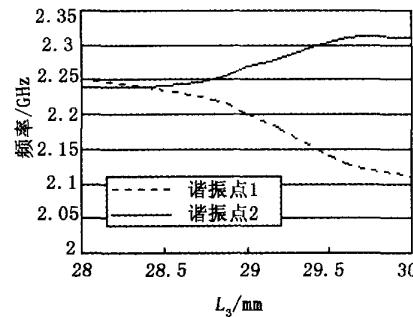


图 7 谐振点频率随 L_3 的变化规律

点,其实测性能与计算的数值吻合得很好。三种滤波器的中心频率在2.2~2.3 GHz左右,相对带宽分别为6.8%,10.9%和15.5%,这表明采用不同的耦合中缝尺寸、控制谐振点之间的耦合,可以灵活调整这种滤波器的带宽。在通带内,三种滤波器具有较好的阻抗匹配特性,而带内插损分别为1.67 dB,1.21 dB和1.11 dB,表明滤波器的插损不大。同时,

工作频段的高端出现一个明显的传输零点,表明滤波器的边带抑制特性较三缝隙的情况得到改善。因此,增加缝隙的数量,同时合理调整缝隙的尺寸参数,可能使多缝隙滤波器的边带抑制特性得到改善。但是随着工作带宽的增加,滤波器幅频特性也出现了不对称现象,这可能是导波结构的相速不是常数,而是频率的函数所造成的。

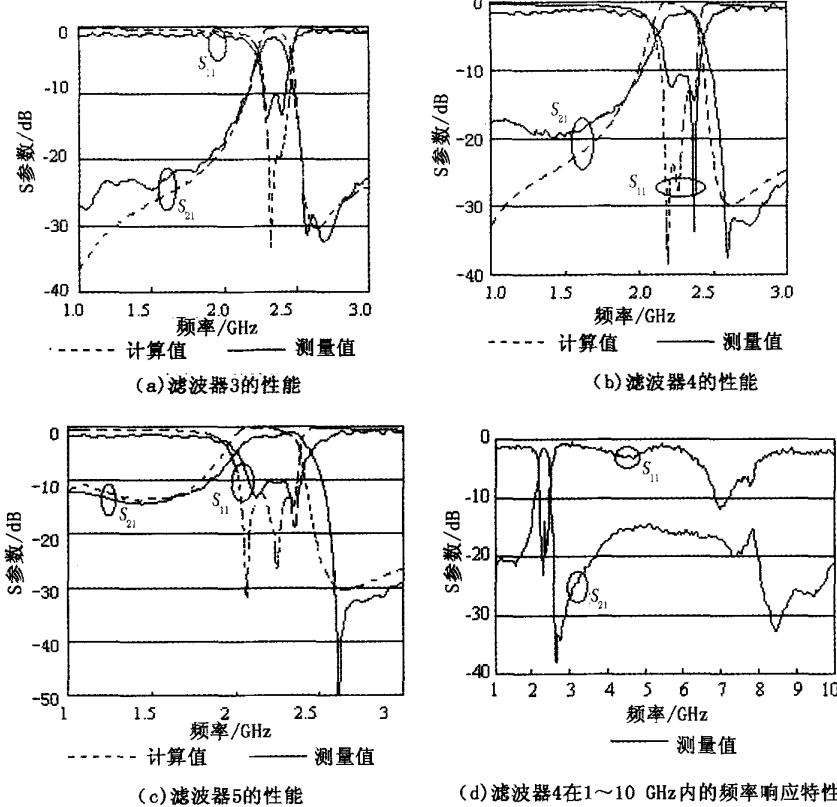


图8 五缝隙滤波器的计算与实测性能

实验中进一步发现,这类滤波器还具有很好的带外谐波抑制特性。以滤波器4为例,图8(d)中的测量结果显示,在1~10 GHz的宽频带范围内,多缝隙滤波器在主通带以外基本截止,不存在高次模式(谐波)引起的寄生通带。

3 结语

首先提出了一种新颖结构的多层多缝隙滤波器,通过建立其等效微波网络进行分析,与全波分析的计算结果进行了比较,并研究了某些参数对滤波器带宽性能的影响;在数值计算的基础上,制作加工了多只滤波器样品进行实验研究。不同方法计算结

果与实验结果之间的良好吻合,表明本文采用的等效模型和设计方法是正确且有效的;实验结果还表明多层多缝隙滤波器不仅具有匹配良好、插损低、带宽灵活可控的特性,还具有较好的边带抑制能力与很好的带外谐波抑制特性,因此是一种性能较好的平面结构滤波器。

由于这种滤波器结构非常简单,不存在金属化过孔和其他层间短路结构,故其制作工艺较以往不少多层滤波器方案大为简化,适用于多层微波集成电路和多层印刷电路板(特别是信号层位于基板两侧、电源层或屏蔽层位于基板中间的情况)的设计。因此,这种滤波器具有良好的应用前景。

(下转第292页)

- [4] JAMES TSUI, Digital Techniques for Wideband Receivers [M]. 2002. 10.
- [5] Uwe Meyer-Baese. Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays [M]. 2003. 6.
- [6] 周博, 邱卫东, 陈燕, 等. 挑战 SOC——基于 NIOSII 的 SOPC 设计与实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 任爱峰, 初秀琴, 常存, 等. 基于 FPGA 的嵌入式系统设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

作者简介



迟东明(1981-),男,吉林四平人,毕业于西安电子科技大学,工程师,主要研究方向为数字信号处理、计算机系统结构;

毕敏丽(1967-),女,湖北赤壁人,高级工程师,主要研究方向为雷达信号处理;

钱陈聪(1979-),男,江苏张家港人,毕业于南京理工大学,工程师,主要研究方向为数字信号处理。

(上接第 287 页)

参考文献:

- [1] WOLFGANG S, WOLFGANG M. On the Design of Planar Microwave Components Using Multilayer Structures [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1992, 40(1): 67-71.
- [2] YAO S J, BONETTI R R, et al. Generalized Dual-plane Multicoupled Line Filters [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1993, 41(12): 2 182-2 189.
- [3] KIM J P, Park W S. An Improved Network Modeling of Slot-coupled Microstrip Lines [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1998, 46(10): 1 484-1 491.
- [4] HONG J S, LANCASTER M J. Aperture-coupled Microstrip Open-loop Resonators and Their Applications to the Design of Novel Microstrip Bandpass Filters [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1999, 47(9): 1 848-1 855.
- [5] KIM C, PARK J, et al. A Novel 1-D Periodic Defected Ground Structure for Planar Circuits [J]. IEEE Microwave Guided Wave Letters, 2000, 10(4): 131-133.
- [6] KIM J P, Park W S. Network Analysis and Synthesis of Multislots Back-To-Back Microstrip Directional Couplers [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2000, 48(11): 1 935-1 942.
- [7] KIM J P, PARK W S. Microstrip Lowpass Filter with Multislots on Ground Plane [J]. Electronics Letters, 2001, 37(25): 1 525-1 526.
- [8] LUI W J, CHENG C H, CHENG Y, et al. A Novel Broadband Multi-slot Antenna Fed by Microstrip Line [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 45(1): 55-57.
- [9] LUI W J, DENG Z, CHENG C H, et al. Novel Multilayer Microstrip Bandpass Filter with Multislots on Ground Plane [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 47(4): 392-394.
- [10] GARG RAMESH, PRAKASH BHARTIA, INDER BAHL, et al. Microstrip Antenna Design Handbook [M]. Boston: Artech House, 2001.
- [11] GUPTA K C, et al. Microstrip Lines and Slotlines [M]. Boston: Artech House, 1996.

作者简介



吕文俊(1978-),男,广东江门人,南京邮电大学讲师,已在包括 IEEE/IEE 学报在内的国内外刊物上发表(录用)论文 17 篇,SCI 收录 7 篇次,申请国家发明专利 1 项,研究方向为微波与天馈技术;

邓哲(1980-),男,安徽宿州人,安徽鲁弗雷通信技术(深圳)有限公司射频工程师,研究方向为微波滤波器与双工器;

程勇(1970-),男,江苏南京人,南京邮电大学副教授,主要研究方向为微波电路、天线理论与设计。

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/>