

Design and Fabrication of Tunable Low-Pass Filter Based on Coplanar Waveguide*

LIU Lei, GUO Xing-long, OU-YANG Wei-xia, LAI Zong-sheng*

(Institute of Microelectronics Circuit and System, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: A new type of tunable microwave microelectromechanical systems low-pass filters with MEMS switches is introduced and the structure has been realized on quartz substrate using MEMS fabrication technology. The filter based on slow-wave coplanar waveguide periodic structure exhibits excellent performance on small size, low insertion loss and is compatible with monolithic microwave integrated circuit technologies. The 3-dB cutoff frequency depends on the different states of MEMS switches. The tested results show that the passband ripple is less than 0.5 dB and the out-of-band rejection is better than 40 dB when the 3-dB cutoff frequency is changed from 12.5 GHz to 6.1 GHz with the MEMS switches actuated. The driven voltages of the switches are around 25 V.

Key words: microelectromechanical systems(MEMS); tunable filter; periodic coplanar waveguide (CPW); MEMS switches

EEACC:2575;1270

基于共平面波导的可调低通滤波器的设计和制作*

刘 蕾, 郭兴龙, 欧阳炜霞, 赖宗声*

(华东师范大学微电子电路与系统研究所, 上海 200062)

摘 要: 介绍了一种使用多触点 MEMS 开关实现的新型可调微波 MEMS 低通滤波器, 应用 MEMS 制作工艺在石英衬底上实现滤波器结构。滤波器基于慢波共平面波导周期性结构, 具有尺寸小、插损低、可与单片微波集成电路工艺兼容等优点。滤波器截止频率的大小取决于 MEMS 开关的状态。实验结果表明, 当 MEMS 开关受到激励时, 低通滤波器的 3-dB 截止频率从 12.5 GHz 转换至 6.1 GHz, 带内纹波小于 0.5 dB, 带外抑制大于 40 dB, 开关的驱动电压在 25 V 左右。

关键词: 微机械系统(MEMS); 可调滤波器; 共平面波导(CPW)结构; 多触点 MEMS 开关

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)06-1020-05

由于射频 MEMS 器件有体积小、重量轻、对加速度不敏感、没有直流功耗、可在低成本硅和玻璃衬底上制造等优点, 同时, 其截止频率比 GaAs 工艺做出的器件高 30~50 倍, 因此在过去的十几年中射频 MEMS 器件得到了很大发展^[1-6]。

滤波器是微波无线通信系统中最重要元件之一, 射频/微波 MEMS 滤波器具有低的插入损耗、高的绝缘性、良好的线性度、小的尺寸、容易与 IC 和 MMIC 电路集成等优点, 因此从根本上改变了传统的射频、微波和毫米波器件的结构和特性^[7]。在许多商业和军事系统中要求能够比较容易的实现不同

频率之间的转换, 但是一个单独的滤波器不能满足其要求。在多标准的接收机中, 可调滤波器能够显著地减少多频带接收机的尺寸。近几年, 微波和毫米波频率范围内的 MEMS 可调滤波器已经取得很大发展^[8-10]。传统的可调滤波器一般使用集总元件如级联的 MEMS 开关、金属-绝缘层-金属电容器和平面电感来实现频率可调^[11]。尽管使用含有集总元件的滤波器可以达到可调目的, 但是由于存在电路比较复杂、传统集总元件 Q 值低、难于和 IC 电路集成等缺点使得这种类型的滤波器尺寸大、不能共面化、插入损耗相对较高^[12-13]。

基金项目: 国家自然科学基金资助(60676047); 上海-应用材料研究与发展基金项目资助(06SA11)

收稿日期: 2007-11-12 修改日期: 2007-12-19

本文介绍了一种应用多触点 MEMS 开关控制的基于 CPW 周期性结构滤波单元的可调低通滤波器,并且使用 ADS 软件提取出该周期性结构的等效集总电路模型。使用具有带阻和慢波特性的 CPW 周期结构实现了最优化的共平面低通滤波器,同时这种结构还可以增加电容和电感的有效值。研究表明 CPW 周期性结构可以实现滤波特性,并且表现出良好的性能^[16-17]。另外,与 PIN 开关和同轴开关相比,MEMS 开关在插入损耗、开关绝缘性、开关速度和功耗等方面表现出了优越的性能,因此本文用多触点 MEMS 开关代替 PIN 二极管开关来改变 CPW 传输线的结构,实现可调低通滤波器性能。本文同时采用 CPW 周期性结构和 MEMS 开关,因此不仅能改善滤波性能,而且能够减小芯片尺寸。

1 设计考虑

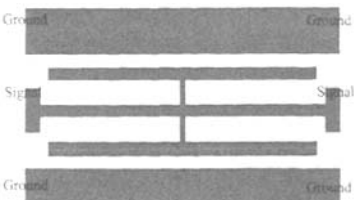
MEMS 可调滤波器由于其极大地减小了多频带应用中模拟式前端子系统的尺寸、可动态地抑制大干扰信号、插入损耗低、品质系数高,易于集成等优点,具有很大的商业和军事应用价值,主要应用在雷达和通信天线的前端。由文献[16-17]可知周期结构的 CPW 传输线具有一定的滤波性能,并且不同长度不同结构的传输线结构其滤波性能和频率范围也会发生变化,因此本设计中的可调低通滤波器主要着重于通过使用多触点 MEMS 开关来改变共平面波导的结构从而能够实现截止频率在 C 波段和 Ku 波段可调,使得滤波器具有较低的插入损耗,带外衰减和较大的调谐范围。

2 滤波器的设计和制作

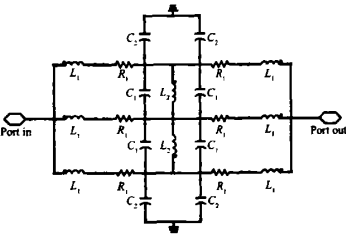
(1) 设计

图 1(a)为低通特性的 CPW 周期结构单元,其具体的理论计算见文献[18]。根据 CPW 传输线的性质可以得到图 1(b)所示的低通滤波单元的等效电路模型。对于滤波器来说,电感和电容是决定滤波器截止频率大小的主要参数,因此由图 1(b)可以看出分路电容值和级联电感值是决定等效电路性能的重要参数。表 1 给出了使用 ADS 软件对等效电路(图 1(b))优化后得到的各个参数值,图 1(c)表示的是使用 ADS 优化后得到的滤波特性曲线图。在图 1(b)中 C_1 表示中间信号线之间的电容值, C_2 是信号线与地线之间的电容值。 L_1, L_2, R_1 分别代表的是 CPW 传输线等效的集总电感值和电阻值。一旦固定了低通滤波单元 CPW 传输线的结构和大小, C_1, C_2, L_1, L_2 的值也就不会改变,因此该低通滤波

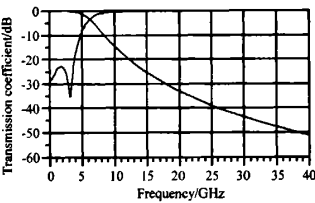
单元的截止频率也就固定了。



(a) CPW 周期结构的一个低通滤波单元



(b) 低通滤波单元简化的等效电路模型



(c) 优化后的 S 参数

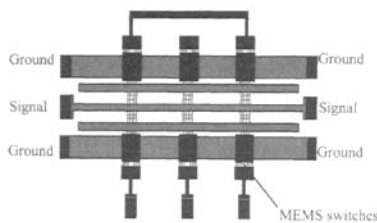
图 1

表 1 滤波单元的集总参数

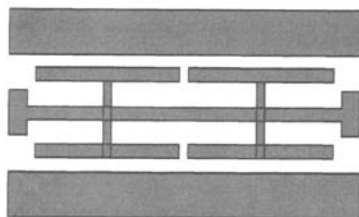
Parameters	Values
L_1/nH	4.746
L_2/nH	1.766
R_1/Ω	5.759
C_1/pF	9.375
C_2/pF	0.229

MEMS 可调低通滤波器的结构示意图见图 2 (a)。通过施加直流电压,激励 3 个 MEMS 开关使其处于不同的开关状态从而改变滤波器的滤波性能:在初始状态,中间的开关处于开态,两边的开关处于关态,CPW 传输线是两单元级联低通滤波结构见图 2(b)所示;在重构状态,中间的开关处于关态,把上下两根断开的信号线分支连接起来,两边的开关处于开态,CPW 传输线就变成如图 1(a)所示的一个低通滤波单元结构,其长度是初始状态时一个单元低通结构的两倍,其 L, R, C 等参数的数值也随之增加。如果 MEMS 开关的开关特性是理想状态,而且不考虑其他损耗的影响,重构后滤波器的频率响应为重构前的一半。从图 2(a)中可以看出,这种滤波单元周期结构是与 CPW 信号线

完全集成在一起的,不需要额外的偏置电路或者添加其他的集总元件,另外这种类型的可调滤波器没有采用传统的切比雪夫或者巴特沃斯滤波器结构,而是一种 CPW 慢波结构,因此该滤波器的尺寸明显减少,性能也更加优良。



(a) 低通滤波器开关电路



(b) 两单元级联滤波器

图 2

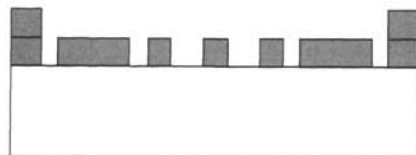
基于以上原理可以知道,对于这种 CPW 周期结构,通过增加滤波单元结构的尺寸可以增加电路中相应的电感和电容值,因此利用 MEMS 开关改变传输线的单元尺寸能够调整低通滤波单元结构的 3 dB 截止频率,可以得到不同截止频率的低通滤波器。

(2) 制作

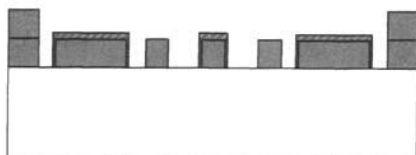
可调低通滤波器使用标准的射频 MEMS 工艺制作在 $520\text{ }\mu\text{m}$ 厚的石英衬底上。整个工艺流程见图 3。首先,蒸发一层 Ti/Au ($1\text{ }500\text{ }\text{\AA}$) 作为种子层,然后电镀 CPW 传输线和 MEMS 桥的桥墩部分,电镀厚度分别是 $2\text{ }\mu\text{m}$, $4\text{ }\mu\text{m}$ 。蒸发 $2\text{ }000/3\text{ }000\text{ }\text{\AA}$ 的 Ti/Au 层形成偏置网络。下一步为了避免 MEMS 桥与 CPW 传输线的欧姆接触采用 PECVD 的方法沉积厚度大约在 $3\text{ }000\text{ }\text{\AA}$ 的氮化硅。使用聚酰亚胺作为 MEMS 桥的牺牲层,图形化牺牲层后在大概 200°C 的高温下使其固化,然后电镀 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 MEMS 金桥。最后,使用等离子刻蚀工艺去除牺牲层并释放 MEMS 开关。

可调低通滤波器的实物照片如图 4 所示,其由 3 个 MEMS 开关和周期性 CPW 传输线组成,信号线之间的分支通过 MEMS 开关连接在一起。3 个 MEMS 开关分别由两组单独的直流偏压线控制,每个开关的长度和宽度分别是 $640\text{ }\mu\text{m}$ 和 $160\text{ }\mu\text{m}$ 。

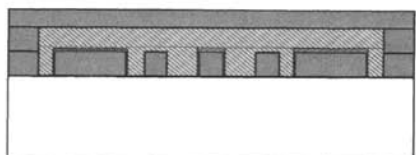
包括直流偏压线在内的整个滤波器芯片的尺寸是 $2.5\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ 。



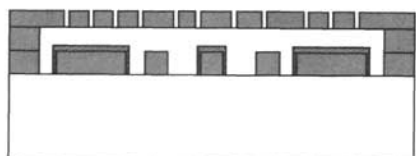
(a) 形成 MEMS 开关桥墩和 CPW 传输线



(b) 图形化介质层



(c) 旋涂牺牲层和电镀金桥



(d) 刻蚀牺牲层释放桥

图 3 制作工艺

■ 金 □ 石英衬底 ■ 氮化硅 ■ 牺牲层

图 3 制作工艺

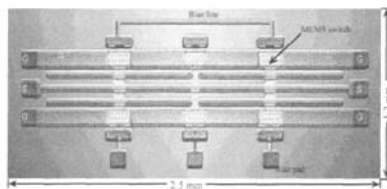


图 4 MEMS 可调低通滤波器实物照片

3 测试

使用 Agilent PNA E8363B 型号的矢量网络分析仪测量可调滤波器的性能。图 1(a)所示的低通滤波单元的频率响应测量结果见图 5,显示了这种 CPW 传输线的周期结构确实具有良好的低通特性。在初始状态,中间的开关处于开态,两边的开关处于关态,测量出的两单元级联低通滤波器的 3 dB

截止频率是 12.5 GHz(见图 6(a))。在重构状态,中间的开关处于关态,两边的开关处于开态,滤波结构变成一个大的低通单元,其 3 dB 截止频率转换到 6.1 GHz(见图 6(b))。这两种结构的带外抑制都大于 40 dB。从测量结果可以看出,重构前后测量出来的截止频率并不是精确的 2 倍关系,这是由于 MEMS 开关本身存在的寄生效应引起的。

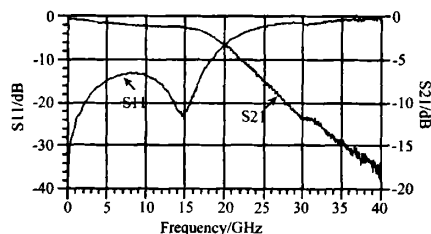
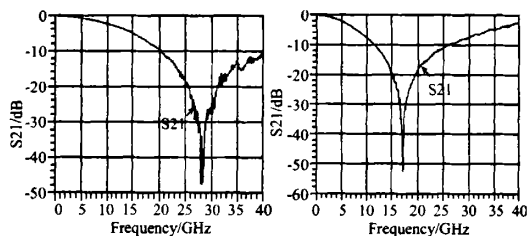


图5 低通滤波单元测量结果



(a) 初始状态

(b) 重构状态

图6 可调滤波器测量结果

4 结论

本文介绍了一种用 MEMS 开关来达到可调目的的低通滤波器。这种滤波器的可调性是基于具有内在低通特性的 CPW 周期结构。当 MEMS 开关受到激励,滤波结构就发生改变,相应的电感和电容值也会同时发生变化,因此转换了滤波器的频率响应。当施加在 MEMS 开关上的电压从 0 改变到 25 V 时,3 dB 截止频率也相应的从 12.5 GHz 转换到 6.1 GHz,其通带纹波低于 0.5 dB。由于其具有优良的性能可用于未来的雷达,无线和多频率通信系统中,会受到人们越来越多的关注。

参考文献:

- [1] Lin Shih-Cheng, Kuo Tsung-Nan, Lin Yo-Shen. Novel Coplanar-Waveguide Bandpass Filters Using Loaded Air-Bridge Enhanced Capacitors and Broadside-Coupled Transition Structures for Wideband Spurious Suppression[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Aug. 2006, 54(8): 3359-3369.
- [2] Qiao Dongjiang, Robert Molino, Steven M. Lardizabal. An Intelligently Controlled RF Power Amplifier With a Reconfigurable MEMS-Varactor Tuner[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Mar. 2005, 53(3): 1089-1095.

- [3] 贺训军, 吴群, 金博识. 基于分布式射频 MEMS 移相器电容开关的分析与设计[J]. 传感技术学报, Oct. 2006, 19(5): 1881-1884.
- [4] Wu Wengang, Huang Fengyi, Li Yi. RF Inductors with Suspended and Copper Coated Thick Crystalline Silicon Spirals for Monolithic MEMS LC Circuits[J], IEEE Microw. and Wireless Compon. Lett, Dec. 2005, 15(12): 853-855.
- [5] Balaji Lakshminarayanan and Thomas M. Weller. Design and Modeling of 4-bit Slow-Wave MEMS Phase Shifters[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Jan. 2006, 54(1): 120-127.
- [6] 董乔华, 廖小平. 新颖的可增强功率处理能力的 X-波段 RF MEMS 开关[J]. 传感技术学报, Oct. 2006, 19(5): 1900-1903.
- [7] Chong-Ping Chang. MEMS for Telecommunications: Devices and Reliability[C]//IEEE 2003 Custom Integrated Circuits Conference, 2003, 199-206.
- [8] Farshid Aryanfar, Kamal Sarabandi. 90GHz Compact Millimeter-Wave Filters Using Distributed Capacitively Loaded CPW Resonators[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Mar. 2006, 54(3): 1161-1165.
- [9] Kim Hong-Teuk, Park Jae-Hyoung, Kim Yong-Kweon. Low-Loss and Compact V-Band MEMS-Based Analog Tunable Bandpass Filters[J], IEEE Microw. and Wireless Compon. Lett, Nov. 2002, 12(11): 432-434.
- [10] Kamran Entesari, Gabriel M. Rebeiz. A Differential 4-bit 6.5 ~10-GHz RF MEMS Tunable Filter[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Mar. 2005, 53(3): 1103-1110.
- [11] Mansour R R, Bakri-Kassem M, Daneshmand M. RF MEMS DEVICES[C]// Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 2003.
- [12] Lubecke V M, Barber B, Chan E. Self-Assembling MEMS Variable and Fixed RF Inductors[J], IEEE Transactions on MTT-S, Nov. 2001, 49(11): 2093-2097.
- [13] Robert L. Borwick, III, Philip A. Stupar, Jeffrey F. DeNatale. Variable MEMS Capacitors Implemented Into RF Filter Systems[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Jan. 2003, 51(1): 315-319.
- [14] Lee Sanghyo, Kim Jong-man, Kim Jung-mu. Millimeter-Wave MEMS Tunable Low Pass Filter With Reconfigurable Series Inductors and Capacitive Shunt Switches[J], IEEE Microw. and Wireless Compon. Lett, Oct. 2005, 15(10): 691-693.
- [15] Park Jae-Hyoung, Lee Sanghyo, Kim Jung-mu. Reconfigurable Millimeter-Wave Filters Using CPW-Based Periodic Structures With Novel Multiple-Contact MEMS Switches[J], Journal Of Microelectromechanical Systems, Jun. 2005, 14(3): 456-462.
- [16] James Sor, Yuanxun-Wang and Tatsuo Itoh. Reconfigurable Quasi-Fractal Transmission Line Structures[C]// IEEE MTT-S Digest, 2002: 665-668.
- [17] James Sor, Qian Yongxi, and Itoh Tatsuo. Miniature Low-Loss CPW Periodic Structures for Filter Applications[J], IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, Dec. 2001, 49(12): 2336-2341.

- [18] James Sor, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh. A Novel Low-Loss Slow-Wave CPW Periodic Structure for Filter Applica-

tions, Microwave Symposium Digest[C]// 2001 IEEE MTT-S International, May. 2001,1: 307-310.



刘 菁(1982-),女,华东师范大学硕士研究生,微电子学与固体电子学,现主要研究方向为 RF MEMS 器件, 51051202032@ecnu. cn



赖宗声(1943-),男,汉族,上海市人,博士生导师,终身教授。上海科技协会会员,IEEE 高级会员,美国纽约科学院会员,全国及上海市技术学会理事。研究方向:MEMS,SOC 设计,射频电路设计等,zslai@ee. ecnu. edu. cn

作者: 刘蕾, 郭兴龙, 欧阳炜霞, 赖宗声, LIU Lei, GUO Xing-long, OU-YANG Wei-xia, LAI Zong-sheng
作者单位: 华东师范大学微电子电路与系统研究所, 上海, 200062
刊名: 传感技术学报 
英文刊名: CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS
年, 卷(期): 2008, 21(6)

参考文献(18条)

1. Lin Shih-Cheng; Kuo Tsung-Nan; Lin Yo-Shen Novel Coplanar-Waveguide Bandpass Filters Using Loaded Air-Bridge Enhanced Capacitors and Broadside-Coupled Transition Structures for Wideband Spurious Suppression[外文期刊] 2006(08)
2. Qiao Dongjiang; Robert Molfino; Steven M. Lardizabal An Intelligently Controlled RF Power Amplifier With a Reconfigurable MEMS-Varactor Tuner[外文期刊] 2005(03)
3. 贺训军; 吴群; 金博识 基于分布式射频MEMS移相器电容开关的分析与设计[期刊论文]-传感技术学报 2006(05)
4. Wu Wengang; Huang Fengyi; Li Yi RF Inductors with Suspended and Copper Coated Thick Crystalline Silicon Spirals for Monolithic MEMS LC Circuits[外文期刊] 2005(12)
5. Balaji Lakshminarayanan; Thomas M. Weller Design and Modeling of 4-bit Slow-Wave MEMS Phase Shifters[外文期刊] 2006(01)
6. 董乔华; 廖小平 新颖的可增强功率处理能力的X-波段RF MEMS开关[期刊论文]-传感技术学报 2006(05)
7. Chong-Ping Chang MEMS for Telecommunications: Devices and Reliability 2003
8. Farshid Aryanfar; Kamal Sarabandi 90GHZ Compact Millimeter-Wave Filters Using Distributed Capacitively Loaded CPW Resonators[外文期刊] 2006(03)
9. Kim Hong-Teuk; Park Jae-Hyoung; Kim Yung-Kweon Low Loss and Compact V-Band MEMS-Based Analog Tunable Bandpass Filters 2002(11)
10. Kamran Entesari; Gabriel M; Rebeiz A Differential 4-bit 6.5~10-GHz RF MEMS Tunable Filter[外文期刊] 2005(03)
11. Mansour R R; Bakri-Kassem M; Daneshmand M RF MEMS DEVICES 2003
12. Lubecke V M; Barber B; Chan E Self-Assembling MEMS Variable and Fixed RF Inductors 2001(11)
13. Robert L. Borwick, III; Philip A Stupar; Jeffrey F. DeNatale Variable MEMS Capacitors Implemented Into RF Filter Systems[外文期刊] 2003(01)
14. Lee Sanghyo; Kim Jong-man; Kim Jung-mu Millimeter Wave MEMS Tunable Low Pass Filter With Reconfigurable Series Inductors and Capacitive Shunt Switches[外文期刊] 2005(10)
15. Park Jae-Hyoung; Lee Sanghyo; Kim Jung-mu Reconfigurable Millimeter-Wave Filters Using CPW-Based Periodic Structures With Novel Multiple-Contact MEMS Switches[外文期刊] 2005(03)
16. James Sor; Yuanxun-Wang; Tatsuo Iroh Reconfigurable Quasi-Fractal Transmission Line Structures 2002
17. James Sor; Qian Yongxi; Itoh Tatsuo Miniature Low Loss CPW Periodic Structures for Filter Applications 2001(12)
18. James Sor; Yongxi Qian; Tatsuo Itoh A Novel Low Loss Slow-Wave CPW Periodic Structure for Filter Applications 2001

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/>