

文章编号:1672-3392(2010)01-0059-04

一种基于单负 Metamaterials 成对结构的带通滤波器的设计

王政平¹ 张振辉^{1,2} 杨维¹

(1 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2 黑龙江大学集成电路重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 提出了一种基于单负 Metamaterials 对的带通滤波器的设计原理, 给出了这种带通滤波器的谐振频率的表达式, 对其谐振频率及带宽与其决定因素之间的关系进行了计算, 对计算结果进行了讨论, 为设计单负 Metamaterial 对带通滤波器的理论与方法提供了依据。研究结果表明: 利用单负 Metamaterials 对的确可以实现带通滤波器; ENG 板的磁导率 μ_1 、MNG 板的介电常数 ϵ_2 、电等离子体频率 ω_{ep} 、磁等离子体频率 ω_{mp} 、两个层的厚度比值 a 这五个因素决定了这种滤波器的中心频率; 两个层的厚度及二者之间的比值决定这种滤波器的带宽。

关键词 Metamaterials; 微波器件; 带通滤波器; 带宽

中图分类号 O411.3 **文献标识码** A

1 引言

早在 20 世纪 40 年代, 就有人提出了负折射的概念^[1]。1968 年, Veselago 报告了同时具有负介电常数和负磁导率的介质(称为双负材料, Double Negative Material, DNG)的电动力学性质, 指出这种介质具有奇异的物理特性如: 反多普勒效应、负折射、反切伦柯夫辐射等^[2]。因为在这种物质中, 波矢、电场强度与磁场强度三者之间遵循左手螺旋关系, 故亦称这种材料为左手材料(Left-Handed Materials, LHM)。30 年后人们分别在理论^[3-4]和实验^[5]上证明了用金属线(Wires)和裂环谐振器(Split Ring Resonators, SRRs)构成的周期性结构实现 LHM 的可能性与可行性。目前, 国际上学者将由人工设计的、具有特异电磁性质的结构安排制备形成的材料统称为 Metamaterial, 其中除了 LHM 外, 还包括那些仅有负的介电常数的材料(称为电单负材料, Epsilon-Negative, ENG)及仅有负的磁导率的材料(称为磁单负材料, Mu-Negative, MNG)。相应地将同时具有正介电常数和正磁导率的介质称为双正材料(Double Positive Materials, DPS)或右手材料(Right Handed Materials, RHM)。

近年来人们对由两种单负材料即 ENG 和

MNG 构成的双层结构特别感兴趣。2003 年, Alu 等人就对两种单负材料组成的双层结构进行了研究, 利用等效传输线方法分析了这种双层结构共振隧穿需要的条件, 给出了布儒斯特角的形式, 并分析了这种双层结构的共振隧穿现象^[6]。此后, 许多人把单负材料应用到光子晶体上。由单负材料构成的光子晶体具有零有效相位带隙^[7], 更易实现多通道滤波^[8], 透射峰几乎不随入射角变化^[9]。通过调节光子晶体的周期结构实现了可调的包含单负材料的光子晶体滤波器^[10]。

本文研究了基于具有色散的两种单负材料构成的双层结构的带通滤波器的基本原理, 给出了这种带通滤波器的谐振频率表达式, 对其谐振频率带宽与其决定因素之间的关系进行了仿真, 依此可通过合理选定它的影响因素值来设计工作于给定谐振频率与所需带宽的带通滤波器。

2 单负材料双层结构的理论模型

由 ENG 和 MNG 构成的双层结构如图 1 所示: 其中, ENG 层 $\epsilon_1 < 0, \mu_1 > 0$ 、厚度为 d_1 ; MNG 层 $\epsilon_2 > 0, \mu_2 < 0$ 、厚度为 d_2 , θ 是入射角。该双层介质结构置于空气中。电磁波从 ENG 层开始入射, 在空气与 ENG 层的界面上有一部分透射到 ENG 层中, 一部

收稿日期 2009-06-13; 收到修改稿日期 2009-08-06

作者简介 王政平(1949—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事 Metamaterials 方面的研究。
E-mail: zpwang@hrbeu.edu.cn

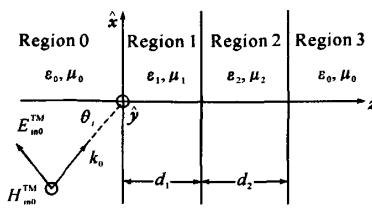


图1 负介电常数材料与负磁导率材料双层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-layer structure with ENG or MNG materials

分反射回空气中;透射到ENG层的电磁波在传播到ENG层与MNG层的界面时,一部分反射回ENG层,一部分透射到MNG层;透射到MNG层的电磁波在传播到MNG层与空气层的界面时,一部分又反射回MNG层,一部分透射到右边的空气中。考虑电磁波沿z轴方向传播的情形。对于TM波,波矢y分量 k_y ,则入射波矢 k_0 可以表示为

$$k_0 = \hat{x}k_x + \hat{z}\sqrt{k_0^2 - k_x^2} \quad (1)$$

其中, $k_x = k_0 \sin \theta$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, \hat{x}, \hat{z} 分别是x、z方向的单位矢量。磁场H与入射面垂直,只有 H_y ,

$$t = \frac{EBCe^{(b_1d_1+b_2d_2)} + EADE^{(b_1d_1-b_2d_2)}}{EBCe^{(b_1d_1+b_2d_2)} + EADE^{(b_1d_1-b_2d_2)} + FACE^{(-b_1d_1+b_2d_2)} + FBDE^{(-b_1d_1-b_2d_2)}} \quad (6)$$

式中, $A = (Z_1 - Z_2)/(2Z_1)$, $B = (Z_1 + Z_2)/(2Z_1)$, $C = (Z_0 + Z_2)/(2Z_2)$, $D = (Z_2 - Z_0)/(2Z_2)$, $E = (Z_0 + Z_1)/Z_0$, $F = (Z_0 - Z_1)/Z_0$, $b_1 = \sqrt{k_x^2 - k_1^2}$, $b_2 = (k_x^2 - k_2^2)$,且 Z_0, Z_1, Z_2 分别为空气中的等效阻抗、ENG层的等效阻抗,及MNG层的等效阻抗,其表达式分别为 $Z_0 = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}/\omega\epsilon_0$, $Z_1 = \sqrt{k_x^2 - k_1^2}/j\omega\epsilon_1$ 与 $Z_2 = \sqrt{k_x^2 - k_2^2}/j\omega\epsilon_2$ 。相应地,透射率为 $T = |t|^2$ 。

3 该双层结构谐振频率的理论分析

ENG和MNG组成的双层结构在满足波阻抗匹配和相位匹配时,电磁波能够透过^[6]。这里波阻抗匹配条件为 $X_1 = -X_2$,相位匹配条件为 $\beta_1 d_1 = \beta_2 d_2$ 。其中 $X_n = -\sqrt{k_x^2 - \omega^2 \mu_n \epsilon_n}/\omega \epsilon_n$, $\beta_n = -j\sqrt{k_x^2 - \omega^2 \mu_n \epsilon_n}$, $n=1,2$ 分别代表ENG层和MNG层。

考虑垂直入射 $\theta=0$ 的情况,阻抗和波数可以分别简写为 $X_1 = -\sqrt{-\omega^2 \mu_1 \epsilon_1}/\omega \epsilon_1$, $\beta_1 = -j\sqrt{-\omega^2 \mu_1 \epsilon_1}$ 、 $X_2 = -\sqrt{-\omega^2 \mu_2 \epsilon_2}/\omega \epsilon_2$, $\beta_2 = -j\sqrt{-\omega^2 \mu_2 \epsilon_2}$ 。将其代

分量,电场E与入射面平行,且与 k_0 垂直。

在四个区域的磁场表达式可以写为

$$\mathbf{H}_0^{\text{TM}} = \hat{y} H_0 e^{-jk_x z} (e^{-\sqrt{k_0^2 - k_x^2} z} - R^{\text{TM}} e^{i\sqrt{k_0^2 - k_x^2} z}) \quad z < 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_1^{\text{TM}} = \hat{y} H_0 e^{-jk_x z} (C_{1+}^{\text{TM}} e^{\sqrt{k_x^2 - k_1^2} z} + C_{1-}^{\text{TM}} e^{-\sqrt{k_x^2 - k_1^2} z}) \quad 0 < z < d_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_2^{\text{TM}} = \hat{y} H_0 e^{-jk_x z} (C_{2+}^{\text{TM}} e^{-\sqrt{k_x^2 - k_2^2} (z-d_1)} + C_{2-}^{\text{TM}} e^{\sqrt{k_x^2 - k_2^2} (z-d_1)}) \quad d_1 < z < d_1 + d_2 \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_3^{\text{TM}} = \hat{y} T^{\text{TM}} H_0 e^{-jk_x z} e^{-i\sqrt{k_0^2 - k_x^2} (z-d_1-d_2)} \quad d_1 + d_2 < z \quad (5)$$

其中, \hat{y} 是y方向的单位矢量, R^{TM} 是横磁波在空气与ENG层界面上的反射系数, C_{1+}^{TM} 是在空气与ENG层界面上的透射系数, C_{1-}^{TM} 是在ENG层与MNG层界面上的反射系数, C_{2+}^{TM} 是在ENG层与MNG层界面上的透射系数, C_{2-}^{TM} 是在MNG层与空气界面上的反射系数, T^{TM} 是在MNG层与空气界面上的透射系数。

利用麦克斯韦方程以及电场与磁场切向连续的边界条件求解出透射系数的表达式为

$$t = \frac{EBCe^{(b_1d_1+b_2d_2)} + EADE^{(b_1d_1-b_2d_2)}}{EBCe^{(b_1d_1+b_2d_2)} + EADE^{(b_1d_1-b_2d_2)} + FACE^{(-b_1d_1+b_2d_2)} + FBDE^{(-b_1d_1-b_2d_2)}} \quad (6)$$

入匹配条件并且设匹配层的厚度比为 a 即可得:

$$\mu_1/\mu_2 = \epsilon_1/\epsilon_2 = -d_2/d_1 = a \quad (7)$$

考虑具有色散的ENG材料和MNG材料,它们的介电常数和磁导率可以分别写为 $\epsilon_1 = 1 - \omega_{ep}^2/\omega^2$, $\mu_1, \epsilon_2, \mu_2 = 1 - \omega_{mp}^2/\omega^2$ 。其中, ω_{ep} 是电等离子体的频率, ω_{mp} 是磁等离子体频率。把它们代入式(7)可以得到 $1 - \omega_{mp}^2/\omega^2 = -\mu_1/a$,即 $\omega = \sqrt{\omega_{mp}^2/(1+\mu_1/a)}$; $1 - \omega_{ep}^2/\omega^2 = -a\epsilon_2$,即 $\omega = \sqrt{\omega_{ep}^2/(1+a\epsilon_2)}$,由此可以解得:

$$a = \frac{(\omega_{ep}^2 - \omega_{mp}^2) + \sqrt{(\omega_{ep}^2 - \omega_{mp}^2)^2 + 4\omega_{ep}^2\omega_{mp}^2\mu_1\epsilon_2}}{2\omega_{mp}^2\epsilon_2} \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2\omega_{mp}^2\omega_{ep}^2}{\omega_{ep}^2 + \omega_{mp}^2 + \sqrt{(\omega_{ep}^2 - \omega_{mp}^2)^2 + 4\omega_{ep}^2\omega_{mp}^2\mu_1\epsilon_2}}} \quad (9)$$

这里的 ω 是使匹配条件成立的频率称为谐振频率。该频率在设计带通滤波器时将被设定为滤波器的中心频率。

由上面分析可以看出,如果在一定条件下改变电等离子体频率、磁等离子体频率、ENG材料的磁导率、MNG材料的介电常数等四个因素,就可以

调节透射电磁波的谐振频率。因此,从这一原理出发就可以根据四个因素的选定值来设计工作于指定中心频率的带通滤波器。

4 计算结果

4.1 相关因素对谐振频率的影响

电等离子体频率、磁等离子体频率、ENG 材料的磁导率、MNG 材料的介电常数等四个因素对谐振频率的影响如图 2~5 所示。

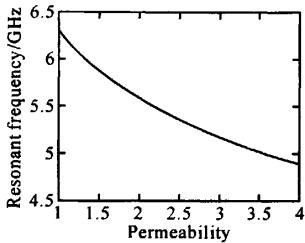


图 2 在给定 $\epsilon_2=4$ 、 $\omega_{\text{ep}}=10$ 、 $\omega_{\text{mp}}=12$ 时, 谐振频率随 ENG 材料磁导率的变化关系

Fig. 2 Relation of the resonant frequency vs. the permeability of ENG material when $\epsilon_2=4$, $\omega_{\text{ep}}=10$, and $\omega_{\text{mp}}=12$

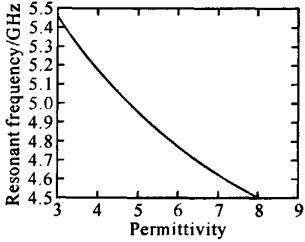


图 3 在给定 $\mu_1=3$ 、 $\omega_{\text{ep}}=10$ 、 $\omega_{\text{mp}}=12$ 时, 谐振频率随 MNG 材料介电常数的变化关系

Fig. 3 Relation of the resonant frequency vs. the permittivity of MNG material when $\mu_1=3$, $\omega_{\text{ep}}=10$, and $\omega_{\text{mp}}=12$

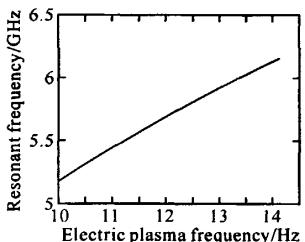


图 4 在 $\epsilon_2=4$ 、 $\mu_1=3$ 、 $\omega_{\text{mp}}=12$ 时, 谐振频率随电等离子体频率的变化关系

Fig. 4 Relation of the resonant frequency vs. the frequency of electric plasmon when $\epsilon_2=4$, $\mu_1=3$, and $\omega_{\text{mp}}=12$

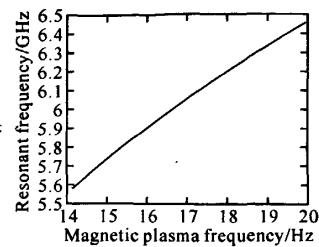


图 5 在给定 $\epsilon_2=4$ 、 $\mu_1=3$ 、 $\omega_{\text{ep}}=10$ 时, 谐振频率随磁等离子体频率的变化关系

Fig. 5 Relation of the resonant frequency vs. the frequency of magnetic plasmon when $\epsilon_2=4$, $\mu_1=3$, and $\omega_{\text{ep}}=10$

从以上 4 个图中可以看出只要给定 4 个影响因素中的 3 个影响因素的值,再依据设计要求指定的谐振频率就可找到满足设计要求的第四个影响因素的数值。则利用这 4 个参量值设计出的滤波器的中心频率即可满足设计中对其中心频率的要求。

4.2 结构参量值对该带通滤波器带宽的影响

根据选定的中心频率确定了它的 4 个影响因素值之后,可以通过调整结构参量值改变该带通滤波器的带宽。

这里采用的带宽的定义为 $\Delta f = |\lambda_L - \lambda_R| / 2\lambda_L$, 其中, λ_L 、 λ_R 为某个态透过率曲线上透射率为最大值的 50% 处对应的左右两个波长。

从两层匹配厚度比 a 的表达式(8)可以看出,改变 a 可以使谐振频率发生变化。其变化规律如图 6 所示。若保持 ENG 材料板的厚度 $d_1=3$ mm 不变,再调整 MNG 材料板的厚度 d_2 。当 $d_2=4$ mm 时, $a=4/3$ 。其带宽特性如图 6 中的曲线 1 所示。当 $d_2=2$ mm 时, $a=2/3$ 。其带宽特性如图 6 中的曲线 2 所示。当 $d_2=0.5$ mm 时, $a=1/6$ 。其带宽特性如图 6 中的曲线 3 所示。

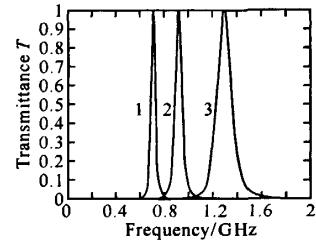


图 6 中心频率及带宽随匹配层厚度比的变化关系

Fig. 6 Relation of the central frequency and bandwidth vs. thickness of the matching layer

从图 6 中的变化趋势可以看出两个层的厚度比 $a=d_2/d_1$ 越小, 谐振频率越大, 同时共振隧穿模的带宽也越宽。因此在设计带通滤波器时可以根据需要改变两个层的厚度比来调节这种带通滤波器的带宽。

如果保持两个层的厚度比不变, 但是改变两层各自的厚度, 也会对这种滤波器的带宽产生影响, 如图 7 所示。图中两个层的厚度分别取 $d_1=0.5$ mm, $d_2=1$ mm; $d_1=1$ mm, $d_2=2$ mm; $d_1=2$ mm, $d_2=4$ mm。相应的曲线分别标注为 1、2、3。

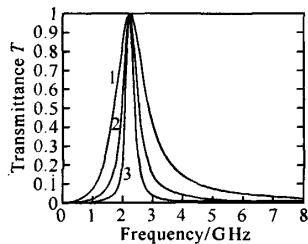


图 7 带宽对层厚度的依赖关系

Fig. 7 Dependence of the bandwidth
on the thickness of the layer

从图 7 可以看出, 如果保持两层之间的厚度比不变, 改变各层的厚度, 则滤波器的中心频率保持不变, 但带宽会发生变化: 两个层的厚度越小, 滤波器的带宽越宽。这样在设计带通滤波器时, 也可以调节两个层的厚度来实现设计所需带宽的带通滤波器。

由以上讨论可知, ENG 板的磁导率 μ_1 、MNG 板的介电常数 ϵ_2 、电等离子体频率 ω_{ep} 、磁等离子体频率 ω_{mp} 、两个层的厚度比值 a 这 5 个因素均对这种带通滤波器的中心频率有影响; 同时两个层的厚度及二者之间的比值对滤波器的带宽有影响。值得指出的是电等离子体频率 ω_{ep} 和磁等离子体频率 ω_{mp} 这两个因素与 ENG 与 MNG 的单元结构参数有关, 这在设计 ENG 与 MNG 时要予以考虑。总之, 在设计这种带通滤波器的过程中要对上述六个参数进行调整, 最终可实现设计要求。

5 结 论

本文介绍了一种基于单负 Metamaterial 对双

层结构的带通滤波器的设计原理, 对其中影响其中心频率及带宽的各相关因素的影响进行了计算, 对计算结果进行了讨论, 最后给出了这种滤波器的设计方法。本文报告的研究结果可为从事 Metamaterials 微波器件研究与设计的同行提供参考。

参 考 文 献

- [1] Mandel'shtam L I. Group Velocity in Crystal Lattice [M]. Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1945, 15: 475-478.
- [2] Veselago V G. The electrodynamics substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(14): 509-514.
- [3] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Phys. Rev. Lett., 1996, 76(25): 4773-4776.
- [4] Pendry J B, Holden A J, Robbins D R, et al. Magnetism from conductors, and enhanced non-linear phenomena [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292: 77-79.
- [6] Alu A, Engheta N. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance and transparency [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2003, 51(10): 2558-2571.
- [7] Jiang H T, Chen H, Li H Q, et al. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. Phys. Rev. E, 2004, 69(6): 066607.
- [8] Zhang H Y, Zhang Y P, Wang P, et al. Frequency response in photonic heterostructures consisting of single-negative materials [J]. J. Appl. Phys., 2007, 101(1): 013111.
- [9] 王政平, 马杰, 张振辉. 一种 Metamaterials 结构的新思路 [J]. 光学与光电技术, 2009, 7(1): 84-87.
- [10] Xiaoyong Hu, Zheng Liu, Qihuang Gong. A multi-channel filter in a photonic crystal heterostructure containing single-negative materials [J]. Journal Of Optics A: Pure and Applied Optics, 2007, 9(10): 877-883.
- [11] 邱关源. 电路(电工原理 1) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1978: 198-218.
- [12] 范寿康, 卢春兰, 李平辉. 微波技术与微波电路 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 9-44.

(下转第 71 页)

Design of Double Telecentric System Based on Machine Vision Measurement

LIN Feng

(School of Physics and Opto-Electronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract Using the specifications of TVM150/11/0.1 telecentric lens from Carl Zeiss as the reference, a large field double telecentric optical system is designed, which satisfies the requirements for the non-contact precision metrology in machine vision. A near-symmetric configuration is adopted to realize a double telecentric system featuring long working distance (>160 mm), large field (object side field is 150 mm), very low distortion (less than single pixel), high resolution (MTF >0.3 at 200 lp/mm for full field region of the 2/3" CCD sensor) with excellent control of distortion lateral color. Through the analysis of individual element's decentration on the distortion and decentering control of critical elements, the measurement errors introduced during lens fabrication process are effectively contained. The approach adopted provides a valuable theoretical guidance for the mass production.

Key words machine vision; telecentric system; optical design; non-contact measurement; large field



(上接第 62 页)

Design of a Band-Pass Filter Based on Single-Negative Metamaterials Pair Structure

WANG Zheng-ping¹ ZHANG Zhen-hui^{1, 2} YANG Wei¹

(1 Science School, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2 Major Laboratories of Integrated Circuits, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract The design principle of a band-pass filter based on single-negative metamaterials pair structure is proposed in this paper. The expression of the resonance frequency of this kind of band-pass filter is given. The relations among the resonance frequency, band width of the band-pass filter and their deciding factors are calculated and discussed. The results reported here may offer the basis for the design theory and method of single-negative metamaterial pair band-pass filter. The investigation results show that the band-pass filter made of single-negative metamaterials pair can indeed be achieved. Five factors such as the permeability μ_1 of the ENG layer, the permittivity ϵ_2 of the MNG layer, the electric plasma frequency ω_{ep} , the magnetic plasma frequency ω_{mp} , and the thickness ratio a of the two layers will determine the center frequency. The thicknesses of the two layers and the ratio between them will decide the band width of the band-pass filter. It is hoped that the results reported in this article may offer some references for the researchers and designers who are engaged in the area of metamaterials microwave devices.

Key words metamaterials; microwave devices; band-pass filter; band width

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/>