

文章编号 1005-0388(2006)06-0939-05

半空间理想导体目标 RCS 缩比关系的研究

陈晓洁 李 磊 史小卫 谢拥军

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 根据物理光学方法(PO)和半空间并矢格林函数, 推导出半空间中理想导体的散射场。根据该散射场, 首次推导出半空间中理想导体目标的缩比关系, 并具体给出了半空间中典型理想导体目标(薄平板和柱面)的 RCS 缩比因子表示式。为了验证该公式的正确性, 矩量法仿真同时给出了直接计算原型目标和通过该缩比因子和缩比模型所得原型目标的 RCS。数值结果表明, 该缩比关系是有效的。

关键词 理想导体目标, 半空间, 雷达散射截面, 缩比

中图分类号 TN011 文献标识码 A

Study on RCS scaling relationship of perfect conducting objects in half space

CHEN Xiao-jie LI-lei SHI Xiao-wei XIE Yong-jun

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology,
Xidian Univ., Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract The scattering fields of a perfect conducting object are evaluated by the physical optics (PO) and half space dyadic Green's function. Then the scaling relationship of a perfect conducting object in half-space is proposed in this paper. According to the scaling relationship, the scaling factors of the plate and cylinder in half-space are presented. To verify the validity of the formulas, the radar cross section (RCS) of the original target and the scaling model target with the scaling factor is computed with the moment method (MOM). Numerical results show that the formulas are feasible.

Key words PEC, half space, RCS, scaling

1 引言

大型目标的雷达散射截面(RCS)的预测一直是电磁领域的热点与难点^[1], 由于测量电大尺寸的目标散射特性需要极高的费用, 因此很自然地提出了缩比测量的概念。通过测量缩比后模型的散射特性从而得到原型的散射特性, 这是缩比测量的基本思想。满足理想缩比条件的全空间缩比理论是通过 Maxwell 方程组、速度不变条件和阻抗不变条件导

出的。在满足此条件的前提下, 模型的几何形状与被测的实际目标完全相似, 只是它的尺寸均按同一比例缩小, 同时波长也按相同比例缩小, 以保证目标的电尺寸不变。目前, 满足理想缩比条件的缩比测量技术已经得到了广泛的应用^{[2][3]}。实际的微波工程中, 由于种种因素, 有时理想缩比条件无法满足, 于是文献[4]提出了近似缩比理论。文献[5]提出的不满足理想缩比条件时的反演计算方法, 大大减少了模型测量的误差。在可见光、近红外激光波

段, 波长的变化会导致目标与模型的表面粗糙度、介电常数等的相当大的变化, 沿用一般的缩比理论将会遇到很大困难, 为了解决这一问题, 只有不改变入射波长, 于是文献[6]研究目标的散射特性仅与其尺寸有关系。

上述研究工作大大推动了缩比技术的研究, 但是以上研究的都是自由空间的缩比理论。现代的很多军事目标都是位于地面或海面的, 这些目标的缩比关系依赖于半空间缩比理论的研究。由于不同频率的入射波照射下, 半空间表面的介电常数变化比较大, 这给位于半空间的理想导体目标的缩比关系的研究带来了复杂性。在缩比前后目标的电尺寸保持恒定的前提下, 利用物理光学方法并结合半空间矢量格林函数研究了位于半空间的理想导体目标的缩比关系, 给出了薄板和柱面的 RCS 缩比因子计算公式。算例可以证明所给公式的有效性。

2 半空间理想导体目标缩比关系

远场近似后半空间并矢格林函数可以表示为^[7]:

$$\overline{GG}(\bar{r}, \bar{r}') = \{[(1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta}) \bar{u}_\varphi \bar{u}_\varphi] + \\ [(\bar{u}_\theta + R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta} \frac{\Delta}{\lambda} \bar{u}_\theta) \bar{u}_\theta]\} \cdot \\ G_0(\bar{r}) e^{-ik_z r'} \quad (1)$$

式中, $\bar{u}_r, \bar{u}_\theta, \bar{u}_\varphi$ 分别为球坐标系中 r, θ, φ 方向的单位矢量; $\eta = \bar{r}' \cdot \bar{u}_z$ 为距半空间表面高度;

$$G_0(\bar{r}) = \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \quad (2)$$

为自由空间格林函数;

$$R^{\text{TE}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (3)$$

$$R^{\text{TM}} = \frac{-\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (4)$$

为 Fresnel 反射系数。

在定义半空间平面为 $z=0$ 平面时, \bar{u}_θ 的反射矢量 $\overset{\Delta}{\bar{u}}_\theta = \bar{u}_\theta - 2(\bar{u}_\theta \times \bar{u}_z)\bar{u}_\theta$ 。根据物理光学近似, 位于半空间的理想导体目标散射场计算公式如下:

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = 2i\omega\mu \times \iint_{S_1} \overline{GG}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot [\hat{n} \times \bar{H}^i(\bar{r}')] dS' \quad (5)$$

设:

$$M_l = \frac{l}{l'} \quad (6)$$

式中, l 为原型的几何尺寸, l' 为缩比后的模型的几

何尺寸。由已知得 M_l^2 为位于自由空间理想导体目标的 RCS 缩比因子^[2~4]。假设后面的讨论中, 带上标'的均为缩比模型的参数。

2.1 HH 极化

水平极化的平面电磁波可表示成如下形式:

$$\begin{aligned} \bar{E}^i &= -E_0 e^{-ik_z r} \bar{u}_\varphi \\ \bar{H}^i &= -H_0 e^{-ik_z r} \bar{u}_\theta \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\bar{k} = k\bar{u}_r$, k 为自由空间波数。

将式(1)和式(7)代入式(5), 得:

$$\bar{E}^s(\bar{r}) = -2i\omega\mu H_0 G_0(\bar{r}) \bar{u}_\varphi \hat{n} \cdot \iint_{S_1} (\hat{n}(1 + \\ R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta}) e^{-2ik_z r'} dS') \quad (8)$$

设接收天线的极化方向仍为水平极化方向, 则有:

$$\bar{E}^s(\bar{r}) \cdot \bar{u}_\varphi = -2i\omega\mu H_0 G_0(\bar{r}) \bar{u}_r \cdot \iint_{S_1} (\hat{n}(1 + \\ R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta}) e^{-2ik_z r'} dS') \quad (9)$$

可见, 由于界面的反射, 与自由空间的物理光学积分公式相比, 半空间的积分公式只是多了一项 $(1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta})$ 。如果半空间表面的介电常数不随频率变化, 那么 $(1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta})$ 不随频率变化, 则半空间目标的 RCS 缩比因子仍为 M_l^2 。但在大多情况下, 半空间表面的介电常数随频率变化是很大的。

下面分别讨论位于半空间的薄平板和柱面 RCS 缩比因子计算公式。

2.1.1 薄平板

薄平板如图 1 放置, 由于薄平板上各点距半空间表面高度均为 η , 所以式可以写成如下形式:

$$\bar{E}^s(\bar{r}) \cdot \bar{u}_\varphi = -2i\omega\mu H_0 G_0(\bar{r}) \times (1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z\eta}) \\ [\bar{u}_r \cdot \iint_{S_1} (\hat{n} e^{-2ik_z r'} dS')] \quad (10)$$

已知全空间的 RCS 缩比因子为 M_l^2 , 由式可以得到水平极化波入射到位于半空间的平板时, 平板的缩比模型和原型的 RCS 之比, 即平板的 RCS 缩比因子为:

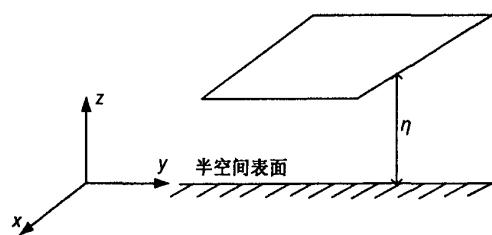


图 1 半空间薄平板

$$M_s = |1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z \eta}|^2 / |1 + R^{\text{TE}'} e^{2ik'_z \eta}|^2 M_l^2 \quad (11)$$

2.1.2 柱面

位于半空间的柱面如图2放置,显然,对于柱面而言,其x、y分量的取值与z分量无关,且柱面的法向 \hat{n} 的取值也与z分量的取值无关,所以式的积分项可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} & \iint_{S_1}^{\Lambda} \hat{n} (1 + R^{\text{TE}} e^{2ik_z \eta}) e^{-2ik \cdot r'} dS' = \\ & [\lambda (e^{-2ikh_1 \cos\theta} - e^{-2ikh_2 \cos\theta}) / (i4\pi \cos\theta) + \\ & R^{\text{TE}} (h_2/\lambda - h_1/\lambda)] \times \\ & \int_{S_1}^{\Lambda} n e^{-2i(kr' \sin\theta \cos\varphi + kr' \sin\theta \sin\varphi)} dx' \end{aligned} \quad (12)$$

式中, h_1 和 h_2 分别为入射波可以照射到柱面的最低和最高高度, 由此可得水平极化波入射到位于半空间柱面时, 柱面的缩比模型和原型RCS之比, 即柱面的RCS缩比因子为:

$$\begin{aligned} M_s = & |(e^{-2ikh_1 \cos\theta} - e^{-2ikh_2 \cos\theta}) / (i4\pi \cos\theta) + \\ & R^{\text{TE}} (h_2/\lambda - h_1/\lambda)|^2 / \\ & |(e^{-2ikh'_1 \cos\theta} - e^{-2ikh'_2 \cos\theta}) / (i4\pi \cos\theta) + \\ & R^{\text{TE}'} (h'_2/\lambda' - h'_1/\lambda')|^2 \times M_l^2 \end{aligned} \quad (13)$$

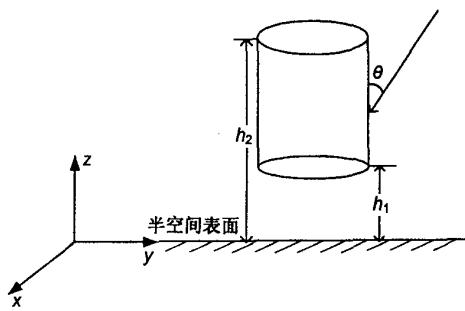


图2 半空间柱面

2.2 VV极化

垂直极化的平面电磁波可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} \bar{E}^i &= -E_0 e^{-ik \cdot r} \bar{u}_\theta \\ \bar{H}^i &= H_0 e^{-ik \cdot r} \bar{u}_\varphi \end{aligned} \quad (14)$$

将式(1)和式(14)代入式(5)得:

$$\begin{aligned} \bar{E}^i(\bar{r}) &= -2i\omega\mu H_0 G_0(\bar{r}) (\hat{n} \cdot \bar{u}_r) \times \\ & \iint_{S_1}^{\Lambda} [(\bar{u}_\theta + R^{\text{TM}} e^{2ik_z \eta} \frac{\Delta}{\bar{u}_\theta})] e^{-2ik \cdot r'} dS' \end{aligned} \quad (15)$$

设接收天线的极化方向仍为垂直极化方向, 则有:

$$\bar{E}^i(\bar{r}) \cdot \bar{u}_\theta = -2i\omega\mu H_0 G_0(\bar{r}) \bar{u}_r \times$$

$$\iint_{S_1}^{\Lambda} \hat{n} [1 + R^{\text{TM}} (1 - 2\sin^2\theta) e^{2ik_z \eta}] \times e^{-2ik \cdot r'} dS' \quad (16)$$

通过比较可得, 只要将式(9)中的 R^{TE} 换成 R^{TM} $(1 - 2\sin^2\theta)$, 即可得式(16)的结果。所以由式(11)得VV极化时薄平板的缩比因子:

$$M_s = |(1 + R^{\text{TE}} (1 - 2\sin^2\theta) e^{2ik_z \eta})|^2 / |(1 + R^{\text{TM}} (1 - 2\sin^2\theta) e^{2ik'_z \eta})|^2 \times M_l^2 \quad (17)$$

同理, 由式(13)可得VV极化时柱面的缩比因子:

$$\begin{aligned} M_s = & |(e^{-2ikh_1 \cos\theta} - e^{-2ikh_2 \cos\theta}) / (i4\pi \cos\theta) + \\ & R^{\text{TM}} (1 - 2\sin^2\theta) (h_2/\lambda - h_1/\lambda)|^2 / \\ & |(e^{-2ikh'_1 \cos\theta} - e^{-2ikh'_2 \cos\theta}) / (i4\pi \cos\theta) + \\ & R^{\text{TM}'} (1 - 2\sin^2\theta) (h'_2/\lambda' - h'_1/\lambda')|^2 \times M_l^2 \end{aligned} \quad (18)$$

3 计算结果

算例用海水作为半空间的表面。海水的介电常数与其温度, 盐度及入射波的频率均有关, 具体公式参见文献[8], 在此不再赘述。假定海水温度 $T = 30^\circ\text{C}$, 海水盐度 $S = 35\text{ppt}$, 图3、图4分别给出了海水介电常数的实部和虚部随频率变化图形。可以看出, 海水的介电常数随频率变化很大, 因此自由空间的缩比理论在这里不适用。

为了验证半空间缩比公式的有效性, 作者用两种方法计算了同一个目标的RCS。第一种方法是直接用矩量法计算原型目标的RCS, 第二种方法是用矩量法计算目标缩比模型的RCS, 然后用缩比模型的RCS结果和半空间缩比因子公式计算得到原型的RCS。所研究的目标满足理想缩比条件, 即缩比前后目标的电尺寸不变。

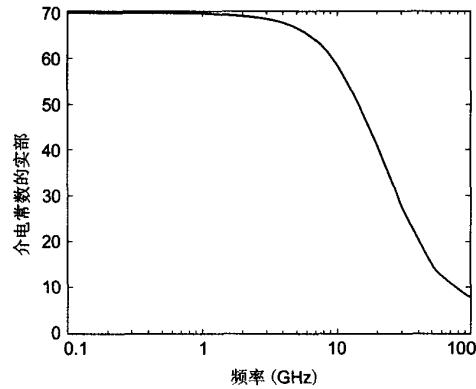


图3 海水介电常数的实部随频率变化

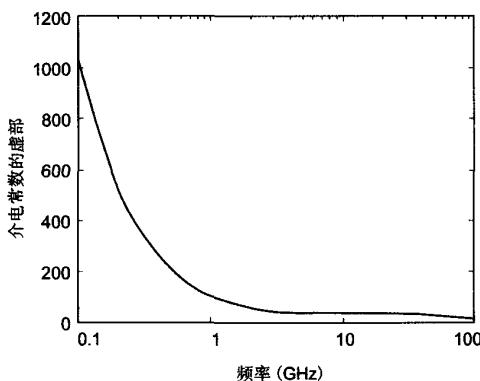


图 4 海水介电常数的虚部随频率变化

3.1 平板的散射

正方形平板如图 1 放置, 距离半空间表面的高度 $\eta=0.3$ m, 边长为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, 入射波频率为 1 GHz。图 5 和图 6 分别为 HH 极化和 VV 极化时, 两种方法计算目标 RCS 的结果的对比。图中, 直线是用矩量法计算原型目标的 RCS 结果, 空心圆点的是用矩量法计算缩比模型的 RCS, 然后通过

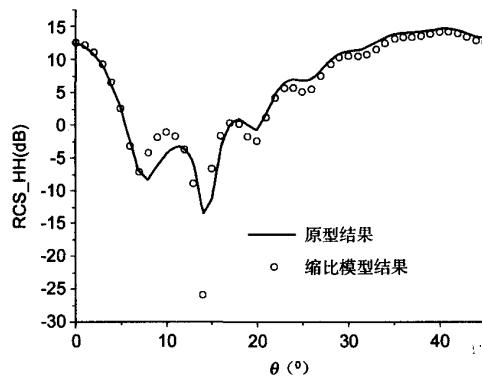


图 5 HH 极化时平板的结果对比

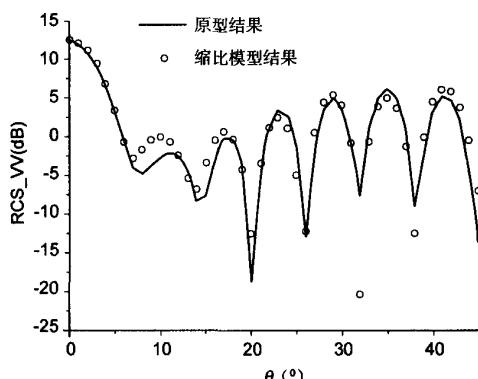


图 6 VV 极化时平板的结果对比

平板缩比因子计算公式得到原型 RCS 的结果。缩比模型和原型尺寸之比 $M_t=l/l'=20$, 因此缩比模型距离半空间表面的高度 $\eta=1.5$ cm, 边长为 $7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$, 为了保持缩比前后目标的电尺寸不变, 缩比模型的入射波频率为 20 GHz。

3.2 柱面的散射

柱面的位置见图 2, 半径 $r=7.5$ cm, 下底面距离半空间表面的高度 $h_1=15$ cm, 上底面距离半空间表面的高度 $h_2=45$ cm, 入射波频率为 1 GHz。图 7 和图 8 分别为 HH 极化和 VV 极化时, 两种方法计算目标 RCS 的结果的对比。图中, 直线是用矩量法计算原型目标的 RCS 结果, 空心圆点的是用矩量法计算缩比模型的 RCS, 然后通过柱面缩比因子计算公式得到原型 RCS 的结果。缩比模型和原型尺寸之比 $M_t=20$, 因此缩比模型的半径 $r=3.75$ mm, 下底面距离半空间表面的高度 $h_1=0.75$ cm, 上底面距离半空间表面的高度 $h_2=2.25$ cm, 为了保持缩比前后目标的电尺寸不变, 缩比模型的入射波频率为 20 GHz。

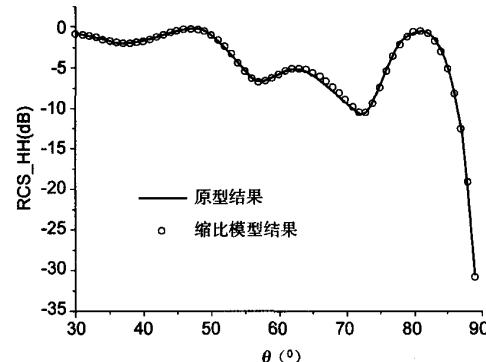


图 7 HH 极化时柱面的结果对比

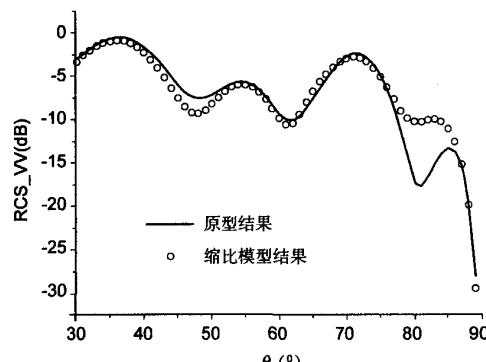


图 8 VV 极化时柱面的结果对比

4 结论

由图 5、图 6、图 7、图 8 可以看出, VV 极化和 HH 极化时, 由缩比模型的 RCS 结合本文提出的缩比因子计算公式得到原型的 RCS 曲线和直接计算原型得到的 RCS 曲线基本是吻合的, 由此验证了缩比因子计算公式的有效性。由于缩比因子计算公式是基于 PO 方法的, 忽略了目标的边缘绕射影响, 所以图 4 和图 5 中, 和平板法向夹角比较小的角度缩比因子计算公式的误差就比较小。进一步, 将推导多散射中心的复杂散射体半空间 RCS 缩比因子计算公式。

参考文献

- [1] 万继响, 张玉, 项铁铭, 等. FMM 结合改进自适应 MBPE 技术快速求解单站 RCS[J]. 电波科学学报, 2004, 19(1): 72~76.
- [2] J X Wan, Y Zhang, T M Xiang, et al.. Rapid solutions of monostatic RCS using FMM with adaptive MBPE technique[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(1): 72~76.
- [3] 夏应清, 杨河林, 鲁述, 等. 超电大复杂目标 RCS 缩比模型预估方法[J]. 微波学报, 2003, 19(1): 8~11.
- [4] 时振栋. 基本散射体 RCS 分析和综合[J]. 应用科学学报, 2003, 21(4): 331~333.
- [5] 梁昌洪, 胡小培. 微波工程设计中的缩比理论[J]. 微波与卫星通信, 1993, 23(1): 8~11.
- [6] 时振栋, 刘宏伟. 隐身目标雷达截面的缩比测量及反演计算[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(1): 13~17.
- [7] 林溪波. 激光雷达散射截面和几何缩比关系[J]. 飞航导弹, 1998, 28(9): 52~57.

[7] William T Shaw, Andrew J Dougan. Green's function refinement as an approach to radar backscatter: general theory and applications to LGA scattering from the ocean[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1998, 46(1): 57~66.

[8] F Daout, A Khenchaf, J Saillard. The effect of salinity and temperature on the electromagnetic field scattered by sea water[R]. OCEANS'94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.' Proceedings, 1994, (1): 110~115.



陈晓洁 (1980—), 女(满族), 河北人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生, 主要研究兴趣: 计算电磁学。



李磊 (1980—), 男, 安徽人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究兴趣: 计算电磁学、微波毫米波集成电路设计。



史小卫 (1963—), 男, 广东人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向有: 智能天线、射频识别以及电磁兼容。

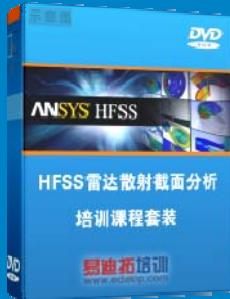
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>