

文章编号 1005-0388(2007)04-0665-06

# 高频地波雷达天线阵抗电离层干扰<sup>\*</sup>

陈 聪 高火涛 张小林

(武汉大学电子信息学院, gaohgt@163.com, 湖北 武汉 430079)

**摘要** 高频表面波雷达是近年发展起来用于超视距监测大面积海洋环境的工具, 但由于天线本身的特性和天线场的限制, 发射天线辐射波束 E 面有一定的宽度或向上翘起一定角度, 其辐射的电磁波能量除了沿海面绕射传播外, 还有一部分能量以一定的角度向上半空间辐射, 与电离层和所经路径上的散射体相互作用后, 其后向散射信号又以原路径回到雷达, 并对雷达形成严重的自干扰。本文基于自适应天线理论, 在对功率倒置算法改进的基础上, 介绍了一种自适应对消电离层自干扰新方法, 雷达现场观测实验表明, 本方法可以抑制电离层自干扰。

**关键词** 高频表面波雷达, 电离层, 功率倒置算法, 自适应抗干扰

**中图分类号** TN011 **文献标识码** A

## Adaptive nulling of ionospheric self-interference for HFSWR

CHEN Cong GAO Huo-tao ZHANG Xiao-lin

(School of Electronic Information, gaohgt@163.com,  
Wuhan University, Wuhan Hubei 430079, China)

**Abstract** HF surface wave radar (HFSWR) as an effective tool inspecting the environment of the ocean in beyond-the-horizon area has been developing in recent years. However, because the radiating beam of transmitting antenna is of certain width in the E plane and inevitably turns up some degree, its electromagnetic radiating power propagates not only along the sea surface but also to the upper space, and as a result, after interacting with ionosphere or scattering object on its path, the backscattered signal then returns to the radar in the same coming path. Based on the performance for suppression of interference and eigenspace analysis, this paper explains the essence of power inversion array. The algorithm proposed can increase the depth of the null in the direction of the weak interference. An effective method for ionosphere interference suppression in HF surface wave radar based on an improved power inversion algorithm is presented. Experimental results acquired with the HF system OSMAR confirm that the method can achieve effective ionosphere interference suppression.

**Key words** high frequency surface wave radar, ionospheric, improved power inversion algorithm, adaptive nulling

\* 收稿日期: 2005-09-20.

基金项目: 国家自然科学基金(60672021), 国家高科发展计划项目(2001AA631050)

资助

## 1 引言

自1955年Crombie首次用13.56MHz的高频雷达进行海面散射实验<sup>[1]</sup>,并成功解释了雷达海洋回波的Bragg散射机制以来<sup>[2]</sup>,世界上广泛开展了利用高频雷达探测海洋表面动力要素的理论和实验研究<sup>[3]</sup>。经过30多年大量的理论和实验研究证实,利用高频表面波雷达,能实现中远距离(如200km)的超视距观测,并能同时监测海上低速移动目标和海洋环境。相对于卫星遥感和声纳阵列等其它探测方式,高频表面波雷达具有成本低廉,测量精度高和全天候工作等优点,因此世界各国都投入大量的人力和资金进行研究开发。高频表面波雷达已经成为实现海洋环境监测的一种方兴未艾的高新技术手段<sup>[4]</sup>。

然而,由于高频雷达发射天线地网有限大和地面的损耗,以及天线辐射波束E面具有一定的宽度,致使天线波束向上翘起一定角度<sup>[5]</sup>,其辐射的高频电磁波能量除了沿海面绕射传播外,还有一部分能量以一定的仰角向上半空间辐射,与电离层相互作用后以天波形式传播,然后以各种路径回到雷达,并且对雷达形成严重的自干扰。本文从天线阵的空间滤波特性出发,对功率倒置算法进行了改进,同时介绍一种高频表面波雷达抑制电离层自干扰的天线阵的设计方法。雷达观测实验说明,所提出的方法可以抑制电离层自干扰。

## 2 问题提出

根据经典电磁场理论,当垂直极化天线位于无限大理想导电平面时,天线在其轴线方向上无辐射,但当天线架设的地面为非无限大理想导电平面时,如地网大小和密度有限、地面存在损耗等,天线波束不仅会上翘一定的角度,而且在天线的轴线方向上还存在辐射。图1表示某垂直极化发射天线与地网的示意图。如图2表示某垂直极化发射天线在有耗地面和在敷有地网情况下E面的辐射方向图(图中,实线和虚线分别对应有耗地面和敷设有地网情况的方向图)。在实际雷达工程中,天线架设的场地不可能做到理想的无限大导电平面,因此发射天线在其轴线方向上一定存在近垂直方向上的电磁辐射。同时由于天线在E面存在一定的波瓣宽度,因此发射天线在其仰角方向上也一定存在斜向上的电磁辐射。

众所周知<sup>[6,7]</sup>,从离地面60km高度开始,部分大气分子被太阳电磁辐射、粒子辐射电离,形成一个由电子、正离子和负离子以及中性粒子组成的空间

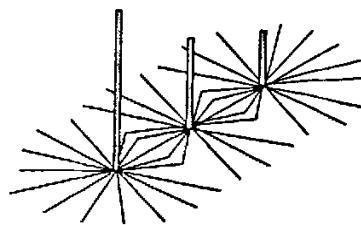


图1 垂直极化发射天线与地网示意图

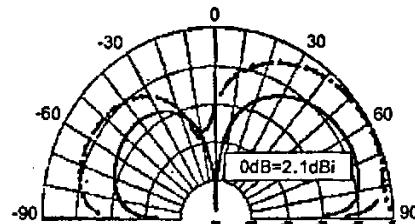


图2 垂直极化发射天线E面方向图

电离介质区域。这个存在于高层大气中的电离介质区域被称为电离层<sup>[7,8]</sup>。电离层一直延伸到大气层外缘几千公里高度的空间。根据电子浓度的变化,电离层可分成几个区域,即D层(60~90km)、E层(90~140km)、F1层(140~200km)、F2层(200~1000km或2000km)和外电离层(F2层以上)<sup>[6,7]</sup>。图3是模拟的中纬白天典型电离层剖面图。

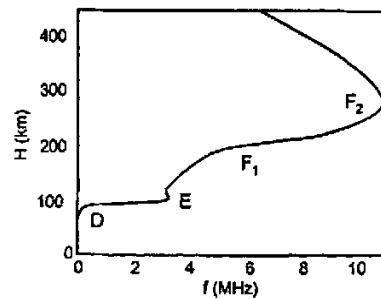


图3 中纬白天电离层剖面图

由于电离层的存在,当发射天线辐射波束在垂直面有一定的宽度或向上有一定的仰角时,其辐射的高频电磁波能量除了沿海面绕射传播外,还有一部分能量以一定的角度斜向上半空间辐射,与电离层相互作用后以天波形式传播,与海空目标相互作用后,其后向散射信号又以原路径回到雷达。如图4表示表面波雷达天线辐射能量在海洋表面与电离层之间的传播路线。

大量的雷达观测实验结果表明,高频表面波雷

达电离层回波经常发生在 E 层、F1 层和 F2 层, 有时甚至电离层 D 层也具有反射(或散射)特性。白天来自电离层 F 层回波之强, 有时甚至可以与近海回波相比拟(如图 5 所示), 严重地影响着雷达的性能, 有时甚至使雷达无法正常工作。如图 6 表示海面回波受电离层回波“污染”后的海流图。如图 7 表示海洋回波受电离层“污染”后的回波谱。从这些图明显可见, 在被电离层“污染”的距离元, 海洋回波全被淹没在强大的电离层回波中, 在被“污染”的距离元由于电离层的干扰而没有反演出海流, 从而形成了一定范围的距离“盲区”。

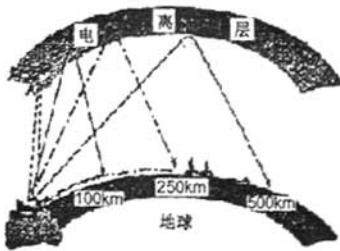


图 4 高频电磁波在海空之间的传播路线

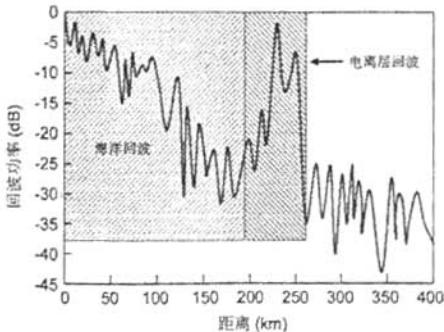


图 5 强电离层 F 层回波



图 6 海面回波受电离层“污染”后的海流图

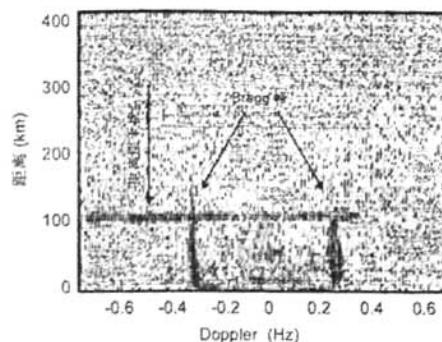


图 7 海面回波受电离层“污染”后的回波谱

### 3 基于子阵改进的功率倒置算法

#### 3.1 功率倒置算法

实现雷达对消外界强干扰, 关键之一是选择合适的自适应算法。武汉大学研制的高频表面波雷达 OSMAR2000 接收天线阵为  $2 \times 4$  元平面阵, 为对消来自水平面以上的电离层干扰, 现将天线阵分成若干子阵, 其中一子阵的阵元数为  $M$ 。为简化分析, 设参考阵元位于坐标原点, 阵元  $m$  在  $(x, y)$  平面上的位置用它到坐标原点的距离  $r_m$  和与  $x$  轴的夹角  $\theta_m$  来表示。信号源的仰角  $\alpha_d$  定义为波达方向与  $z$  轴的夹角, 方位角  $\beta_d$  定义为波达方向在  $(x, y)$  平面投影与  $x$  轴的夹角, 则空间  $D$  个信号源以不同二维方向角  $(\alpha_d, \beta_d)$  入射到  $M$  元天线阵, 阵列输出数据向量为

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (1)$$

式中,

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$$

$$A = [a(\alpha_1, \beta_1), a(\alpha_2, \beta_2), \dots, a(\alpha_D, \beta_D)]^T$$

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$$

$$N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$$

$$a(\alpha_d, \beta_d) = \{1, \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_1], \dots,$$

$$\exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_m], \dots, \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_M]\}$$

$$\Delta_m = r_m \sin \alpha_d \cos(\beta_d - \theta_m)$$

传统的功率倒置自适应算法<sup>[3, 4]</sup>的基本思想是保持第一支路阵元的输出功率恒定, 其它阵元的加权系数可以调整, 通过调整其它  $M-1$  个加权系数使最后阵元的输出最小。由于有一个阵元的输出功率恒定, 所以在调整加权系数使输出功率最小时, 即在干扰方向上形成零点, 并且干扰越强, 零点越深。功率倒置自适应阵的最优权为

$$\omega_{opt} = R^{-1} a(\alpha_0, \beta_0) \quad (2)$$

式中

$$a(\alpha_0, \beta_0) = [1, 0, \dots, 0]^H \quad (3)$$

通过(2)式形成的最优权,可以在干扰方向上形成零点,而且干扰越强,零点越深。

### 3.2 算法分析<sup>[10]</sup>

对接收矢量协方差矩阵 R 进行特征值分解

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i q_i q_i^H = \sum_{i=1}^D \lambda_i q_i q_i^H + \sum_{i=D+1}^M \sigma^2 q_i q_i^H \quad (4)$$

其中,  $\lambda_i$  为矩阵 R 的第 i 个特征值,  $q_i$  为对应的特征向量。由于 R 为埃尔米特矩阵, 则有

$$R^{-1} = \sum_{i=1}^D \lambda_i^{-1} q_i q_i^H + \sum_{i=D+1}^M \sigma^{-2} q_i q_i^H \quad (5)$$

结合(3)式, 并将(4)式代入(2)式

$$\omega_{opt} = \sum_{i=1}^D \lambda_i^{-1} q_i^* q_i^H + \sum_{i=D+1}^M \sigma^{-2} q_i^* q_i^H \quad (6)$$

由式(4)可见, 功率倒置算法的最优权值是特征值对应特征矢量的加权和。第一项为干扰特征值对应的特征矢量和, 第二项由噪声特征值矢量构成。根据子空间理论, 噪声特征向量和干扰导向矢量正交, 而干扰特征向量组成的子空间和干扰导向矢量组成的子空间相同, 对于强干扰, 其特征值较大, 对形成的最优加权贡献较小, 因此能在强干扰方向形成较深的零点, 而对于相对弱小的干扰, 特征值大小接近噪声特征值, 干扰特征向量在最优权中的影响较大, 不能形成较深的零点。但如果舍弃第一项, 而只采用噪声特征矢量的加权作为最优权, 可在干扰的方向形成更深的零点, 此时的权值可表达为

$$\omega_{opt} = \sum_{i=D+1}^M \sigma^{-2} q_i^* q_i^H = Q_n Q_n^H \quad (7)$$

式中,  $Q_n = [q_{D+1}, q_{D+2}, \dots, q_M]$  为噪声特征向量组成的噪声子空间。

## 4 系统简介与实验结果

### 4.1 高频表面波雷达系统简介

OSMAR2000 高频表面波雷达是由武汉大学海态实验室研制<sup>[11]</sup>, 雷达常用工作频率范围为 4~8 MHz, 发射天线为三元八木天线, 接收天线阵由 2 排 4 列的垂直极化天线组成, 阵元前后和左右间距分别为 8 m 和 13.3 m。雷达系统采用 FMICW 波形, 数字接收机经过几分钟的相干积累, 通过 Fourier 分析和高分辨算法, 获得与距离、方位和 Doppler 相关的信息。武汉大学海态实验室在浙江舟山群岛有两个用于探测海洋面风、浪、流的雷达

站。如图 8 和 9 分别表示浙江舟山某雷达站的发射天线和接收天线阵。



图 8 发射天线

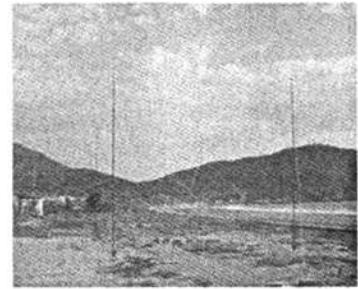


图 9 接收天线阵

### 4.2 OSMARXP 雷达系统主要工作参数<sup>[11]</sup>

工作频率: 4~8 MHz

发射功率: 峰值 200W, 平均 100W

发射波形: FMICW

距离分辨率: 5 km 或 2.5 km

收发周期: 3.2 ms

占空比: 50%

扫描带宽:  $B = 30$  kHz

### 4.3 试验结果

下面以武汉大学海态实验室研制的 OSMAR2000 高频雷达系统试验数据为例来说明本文介绍抑制电离层自干扰方法的有效性。

(1) Es 是电离层突然增强的 E 区薄层<sup>[6,7]</sup>, 是偶尔出现在地球上空 120 km 高处的电离层。Es 的形态结构非常复杂, 影响其形成的因素也很多。2003 年狮子座流星雨爆发期间, 雷达观察发现, 流星雨爆发对 Es 层的形成有一定的影响。如图 10 表示 130 km 某时间段雷达的回波 Doppler 谱图(在本次流星雨爆发前后几天很少出现此类现象)。由此图可见, 流星雨爆发期间出现 Es 层, 海洋回波被完

全隐没在电离层 Es 的反射回波中, 但利用本文提出对消干扰的方法, 对消后的回波谱得到极大的改善, 海洋回波的 Bragg 峰明显可见了。

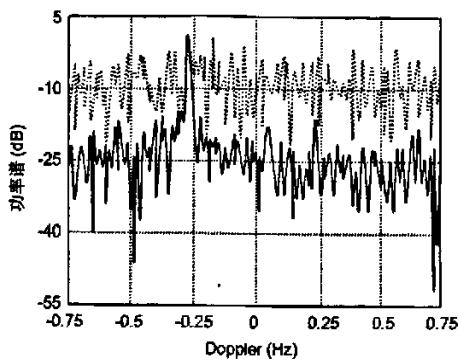


图 10 电离层 E 层的 Doppler 谱

(2) 对短波通信和高频天波雷达而言, F 层是最重要的, 在一般情况下, 远距离通信都选用 F 层作反射层。在白天 F 层有两层: F1 层位于地球上空 150~200 km 高度处; F2 层位于地球上空 200 km 以上。它们的高度在不同的季节和同一天不同的时刻是不一样的。F2 层和其它层次不同, 在日落后并没有完全消失, 仍然保持有剩余的电离。如图 11 表示 200 km 的回波 Doppler 谱图。从此图可见, 由于电离层的反射, 海洋回波被完全隐没在电离层回波中。从来波干扰的距离看, 此干扰显然来自电离层 F 层。从此对消的结果看, 对消干扰的效果也非常明显。

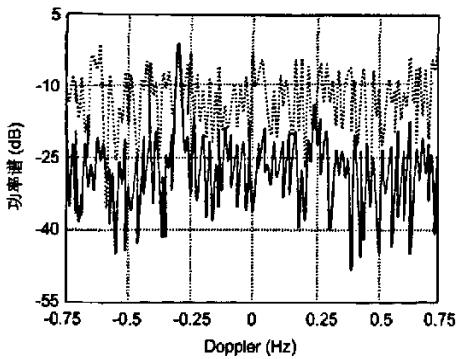


图 11 电离层 F 层对 Doppler 谱

(3) 流星余迹回波类似脉冲波, 幅度快速增加到最大, 持续几秒钟后消退。根据流星雨的回波特征, 在午夜和中午的实验中经常能观测流星雨回波(一般在下午数小时内较少), 其回波一般来自上层大气层 80~120 km 的范围内。流星雨回波

Doppler 谱较宽, 它们的幅度高出噪声基底约 30~40 dB。如图 12 一方面显示了流星余迹回波对的海洋回波 Doppler 谱影响的严重性, 另一方面也说明本文提出的对消近垂直方位流星余迹回波的可行性。

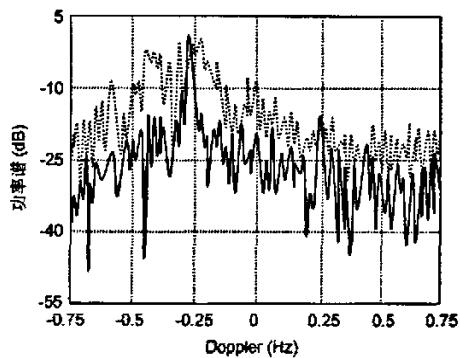


图 12 流星余迹对的 Doppler 谱

## 5 结论

外界干扰严重影响高频雷达的整体性能<sup>[12,13,14]</sup>, 论文从天线阵的空间滤波特性出发, 介绍了一种高频表面波雷达对消电离层自干扰的方法。雷达观测实验表明, 所用技术可以抑制电离层干扰。

## 参考文献

- [1] Crombie D D. Doppler spectrum of echo at 13.56 Mc/s [J]. Natrue, 1955, 175: 681-682
- [2] Wait J R. Theory of HF ground wave backscatter from sea waves [J]. J. Geophys. Res., 1966, 71: 4839-4842.
- [3] Teague C C, Vesecky J F and Fernandez D M. HF radar instruments, past to present [J]. Oceanography, 1997, 10(2): 72-75.
- [4] Leigh Baines. HF Radar-the key to efficient wide area maritime surveillance [M]. EEZ Technology, Edition 3, London: ICG Publishing LTD., 1998, 115-118.
- [5] 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计 [M]. 成都: 成都电子工程学院, 1985.
- [6] Budenn K G. Radio waves in the ionosphere [M]. London: Cambridge Univ. Press, 1961.
- [7] Michael, C K. The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamic [M]. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1989.
- [8] Gao Huotao, Zheng Xia, Li Jie. Adaptive anti-interference technique using subarrays in HF surface wave radar [J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2004, 151(2): 100-104.

(下转第 695 页)

in PN spread-spectrum systems[J]. IEEE Trans. on Communications 1982, 30(5): 913-924.

李 旭 (1968-), 男, 山西人, 中国电波传播研究所高级工程师, 硕士生导师。1997年4月西安电子科技大学信号处理专业硕士毕业。目前主要研究方向为信号处理, 通信信号处理与分析。

李竟翔 (1979-), 男, 陕西人, 硕士生。2002年7月陕西工学院本科毕业。目前主要研究方向为扩频通信关键技术研究, 数字电路设计。

E-mail: ljjx791118@126.com.

戴鹿村 (1940-), 男, 湖南人, 中国电波传播研究所研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为信号处理。

(上接第669页)

- [9] H Leong: 'Adaptive nulling of skywave interference using horizontal dipole antennas in a coastal surface HF surface wave radar system[J]. Radar 97, 14-16 October 1997, Publication No. 49: 26-30.
- [10] 武思军, 张锦中. 基于功率倒置阵的特征分解法[J]. 应用科技, 2005, 32(3): 14-16.
- [11] 国家高新技术发展计划课题实施方案: 远程高频表面波雷达监测技术[R]. 武汉大学, 2001.
- [12] 强 勇, 侯 彪, 焦李成等. 天波超视距雷达抑制流星余迹干扰方法的研究[J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 23-27.
- Qiang Y, Hou B, Jiao L C, et al.. An approach of suppressing meteor trail interference in over-the-horizon radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(1): 23-27.
- [13] 苏洪涛, 保 锋, 张守宏. 自适应地波超视距雷达高频通信干扰抑制[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 270-274.
- Su H T, Bao Z, Zhang S H. Adaptive HF communication interference mitigation in HF-GWR[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 270-274.
- [14] 邢孟道, 保 锋. 电离层电波传播相位污染校正[J].

(上接第674页)



刘学观 (1965-), 男, 江苏人, 苏州大学电子信息学院, 教授, 中国航天科工集团第二研究院获博士, 主要从事电磁目标特性、射频工程等教学、科研工作。

电波科学学报, 2002, 17(2): 129-133.

Xing M D, Bao Z. Phase perturbation correction in ionospheric electromagnetic wave propagation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(2): 129-133.

陈 聪 (1982-), 男, 湖北人, 武汉大学电子信息学院博士生, 目前主要研究方向为电磁场数值计算、电磁散射以及天线分析与设计等。

高火涛 (1964-), 男, 湖北人, 武汉大学电子信息学院教授、博士, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 获国家教育部科技进步一等奖两项, 获实用新型专利三项, 申请国家发明专利四项, 在国内外核心刊物上发表论文二十余篇。研究方向: 电波传播与复杂目标的电磁散射、自适应阵列信号处理和天线理论与工程等。

张小林 (1981-), 男, 湖北人, 武汉大学电子信息学院博士生。目前主要研究方向为电磁场数值计算、电磁散射以及天线分析与设计等。



殷红成 (1967-), 男, 江西人, 教授, 博导, 主要从事电磁理论、目标特性等方面的研究。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>