

文章编号: 1001-4322(2010)08-1914-05

# 高功率线极化径向线阵列天线优化及实验研究

王 欣, 刘庆想

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:** 为了提高高功率线极化径向线阵列天线性能(口径效率及反射特性等), 实现更优的径向线极化阵列天线辐射, 通过提高单元天线性能、调整阵列布局、改进馈电径向线和探针这3种途径对其进行优化, 并对其进行理论分析、数值仿真和实验研究。实验结果表明: 在中心频率1.57 GHz下, 驻波比为1.19, 增益为17.65 dBi, 轴比为-39.2 dB; 在1.47~1.77 GHz的频率范围内驻波比都小于1.4。

**关键词:** 线极化; 径向线; 口径效率; 阵列天线反射特性

中图分类号: TN811, TN814 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20102208.1914

1992年, 日本学者H. Nakano和H. Takeda等对单层径向线短螺旋阵列天线进行了研究<sup>[1]</sup>。这种形式的天线利用探针深入径向线内部的长度不同来调节激励幅度, 不适合应用于高功率微波领域。然而, 近年来国内学者通过研究高功率螺旋径向线阵列天线, 较好地实现了径向线应用于高功率微波领域中辐射圆极化微波的目标<sup>[2-6]</sup>。其后续研究的单圆环径向线阵列天线有望实现高功率径向线天线的线极化辐射<sup>[7]</sup>。文献[7]首次提出了这种线极化径向线天线, 不仅扩展了高功率领域中径向线阵列天线的应用范围, 而且解决了一些应用场合中圆极化天线可能遇到的问题。但是, 这种天线的口径效率、反射特性等还有进一步提高的空间, 研究并未涉及天线功率容量相关问题, 在现有文献中也少有进一步研究的相关资料。因此, 为了实现更优的径向线极化阵列天线, 本文对该种天线进行了进一步的分析研究, 并且加工实物进行了实验研究。

## 1 理论分析及优化设计

由天线基础理论可知, 口径均匀分布时, 天线增益为<sup>[8]</sup>

$$G = (4\pi/\lambda^2)\eta A_p \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $\eta$  为口径效率;  $A_p$  为天线口径面积。从中可以看出, 在波长一定的情况下, 口径效率由增益和天线口径面积共同决定, 与增益成正比关系, 与口径面积成反比。而阵列天线的反射特性与馈电系统和单元天线的反射特性是分不开的, 阵列天线的功率容量也和馈电系统和单元天线有密切关系, 因此, 对馈电系统和单元天线的优化将影响阵列的整个特性。

### 1.1 水平单圆环天线

阵列天线的方向图是单元天线和阵列布局共同产生的结果, 为了提高阵列的增益, 提高单元天线增益是其中一个方法, 但单元天线结构上的场强集中会造成整个天线的功率容量降低, 所以在改进过程中需两者兼顾。

文献[7]提出的水平单圆环单元天线, 增益为7.335 dBi, 最大场强主要集中在弯曲横杆与圆环连接处, 有效值为2579.46 V/m, 如图1(a)所示。为了提高增益、减小场强集中, 主要将弯曲横杆由圆柱改为圆锥形, 底

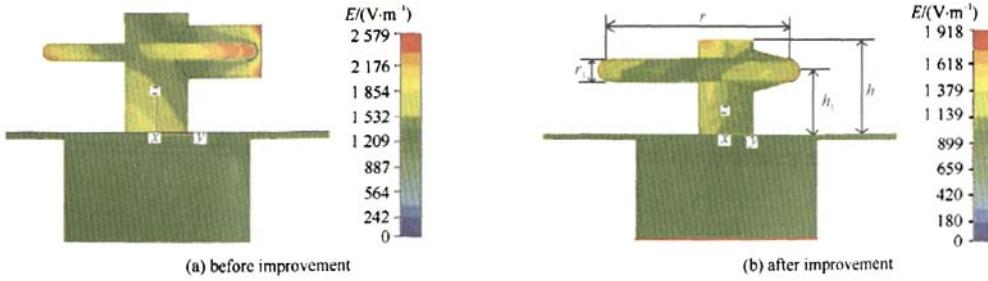


Fig. 1 Electric field distributions of ring antenna before and after improvement

图1 改进前后的单元天线场强分布

\* 收稿日期: 2009-09-01; 修订日期: 2009-12-08

作者简介: 王 欣(1982—), 女, 博士研究生, 从事高功率微波技术研究; wxpanda2701@163.com。

半径为 11 mm, 顶半径为 4.5 mm, 在此基础上对单元天线进行了仿真优化, 得到的尺寸为: 单圆环半径  $r=35.5$  mm, 线径(半径)  $r_1=4.5$  mm, 离输出口高  $h_1=24.5$  mm; 内导体高  $h=36.5$  mm; 弯曲横杆与单圆环同时向  $-y$  方向移动了 11 mm。改进后, 天线最大场强有效值为 1 918.05 V/m, 场强分布如图 1(b)所示。中心频率 1.57 GHz 下天线反射系数为 0.078, 增益为 7.807 dBi, 轴比为  $-160.3$  dB。不同方位角内的方向图如图 2(a)所示, 图 2(b)是对应面内的极化图(其中  $\theta$  为俯仰角,  $\varphi$  为方位角)。

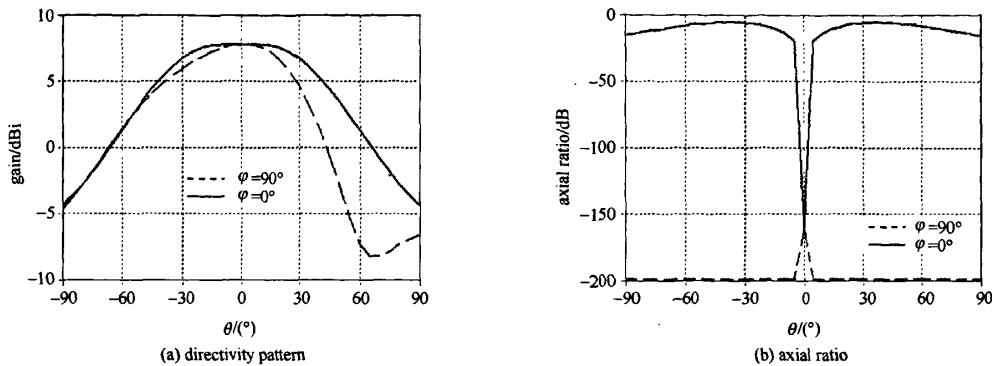


Fig. 2 Directivity pattern and axial ratio of antenna at  $\varphi=0^\circ$  and  $\varphi=90^\circ$

图 2  $\varphi=0^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$  面内单元方向图和极化图

## 1.2 阵列布局

间距是天线布局中的一个关键因素, 也是影响阵列天线口径效率的因素, 这里对不同间距下阵列天线的增益及口径效率进行理论分析, 阵列天线的布局如图 3 所示。

等幅同相激励且轴向辐射天线的方向图函数为<sup>[8]</sup>

$$G(\theta_0, \varphi_0) = \eta' D(\theta_0, \varphi_0) = \eta' \frac{4\pi N^2}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta} \quad (2)$$

其中:  $\eta'$  为天线效率;  $F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N \exp[jka \sin\theta \cos(\varphi - \frac{2\pi n}{N})]$  为阵列天线方向图, 其中,  $f(\theta, \varphi)$  为单元天线方向图;  $N$  为阵列天线单元数目。由于大多数口径天线欧姆损耗很小,  $\eta' \approx 1$ , 所以式(2)可以简化为

$$G(\theta_0, \varphi_0) = \frac{4\pi N^2}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta} \quad (3)$$

利用改进后的单元天线, 对其方向图进行数值拟合, 利用 Matlab<sup>[9]</sup> 编程得到结果为

$$f_u = (\theta, \varphi) = 0.0276\theta^{10} + 0.045\theta^8 - 0.172\theta^6 - 0.33\theta^4 + 0.29\theta^2 + 0.83\theta + 0.18\theta^4 - 0.748\theta^3 - 0.973\theta^2 - 0.045\theta + 1.0015 \quad (4)$$

结合式(3)和(4), 计算出在不考虑互耦影响的情况下, 不同间距( $d$ )及天线口面半径( $R$ )的阵列天线增益( $G$ ), 同时利用式(1)计算出相应的理论口径效率  $\eta_s$ , 其结果如表 1 所示。表中数据显示随着间距的减小, 口径效率得到了提高, 到  $0.65\lambda$  和  $0.60\lambda$  时, 口径效率的提高逐渐变缓慢, 再减小间距时又增加。然而在实际中由于互耦随着间距的减小而变大, 间距越小, 阵列单元间的互耦影响越是不能忽略, 实际增益与理论计算将会存在更大的差距, 因此将间距减小到  $0.60\lambda$ , 以期阵列天线口径效率能够得到提高。

## 1.3 子阵馈电以及馈电探针

子阵馈电的形状是决定阵列口面大小的关键因素之

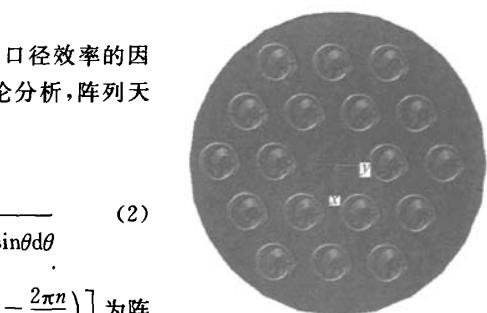


Fig. 3 Layout of array antenna

图 3 阵列天线布局图

表 1 不同间距、天线口面半径下的理论增益及口径效率

Table 1 Theoretic gain and aperture efficiency of array antenna at different unit spacing and antenna radius

$d$	$G/\text{dBi}$	$R/\text{m}$	$\eta_s/\%$
$0.80\lambda$	21.072	0.3820	81.057
$0.75\lambda$	20.684	0.3585	84.168
$0.70\lambda$	20.205	0.3345	86.571
$0.65\lambda$	19.647	0.3105	88.374
$0.60\lambda$	19.053	0.2870	90.214
$0.55\lambda$	18.427	0.2630	93.006
$0.50\lambda$	17.742	0.2390	96.191

一, 文献[7]中子阵馈电组合后呈齿状圆盘, 天线口面面积则由齿状圆盘的最大尺寸  $R_1$  (如图 4 所示) 决定, 为  $S_1 = \pi R_1^2$ , 而齿状部分的存在影响了口径效率, 为此, 经研究分析得: 将齿状部分切去, 使其变为梯形, 组合后呈六边形, 最大尺寸则为  $R_2$ , 口面面积为  $S_2 = \pi R_2^2$ , 明显的  $R_2 < R_1$ , 由阵列的布局尺寸可得  $S_1/S_2 = 1.24$ , 这样, 切去齿状部分后实际的口径面积将会减小。

探针是从径向线中耦合能量以激励单元天线的, 因此在保证一定的耦合幅度和耦合相位的前提下, 需要尽量减小其反射和场强集中。文献[7]采用的探针是单边立柱型(图 5(a)), 但是由于在子阵馈电结构中探针圆台最高处与同轴径向线转换部分相距较近, 从而产生场强集中, 为此, 对这种探针的结构进行了改进, 如图 5(b) 所示。改进后的探针圆锥台与立柱和同轴径向线转换部分的距离都较大, 从而避免了场强集中。

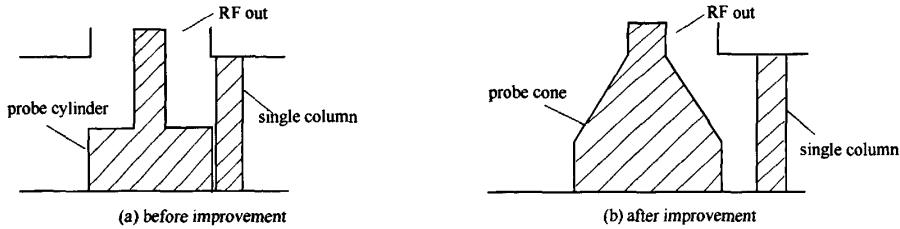


Fig. 5 Probe before and after improvement

图 5 改进前后的耦合探针

#### 1.4 天线功率容量

在输入功率为 1 W 的情况下, 如果按空气中击穿场强为 3.17 MV/m 计算, 功率容量满足 1 GW 时, 则对应的最大场强有效值应为 70.89 V/m。只要天线辐射场区某一距离处的最大场强小于这一最大场强, 在这一距离处加天线罩, 就能够保证整个天线的功率容量。

通过模拟, 得到在距离径向线顶板 70 mm 处场强最大值(有效值)为 61.5 V/m(图 6 为该处的场强分布图)。该距离上的最大场强小于 70.89 V/m, 并且这一高度处于天线的感应近场区。由天线的场区划分原理可知<sup>[10]</sup>, 在这一区域内, 天线场强呈快速下降趋势, 并且大于辐射近区和远区场强, 因此在这一高度处加天线罩就可以保证 GW 级的微波发射。

## 2 数值仿真

### 2.1 反射特性

反射特性是天线的一个重要指标, 在设计过程中也是一个重要环节, 该阵列天线在每层馈电设计中需要考虑反射特性, 而且在整个天线组合中也是要保证其良好的匹配, 包括耦合探针和单元的匹配, 以及单元不同方向时产生的影响。经过优化, 模拟得到在中心频率上的阵列天线的反射系数为 0.067, 在 1.43 ~ 1.76 GHz 的范围内反射小于 0.15(图 7), 相比较文献[7]中的阵列, 反射特性得到了优化。

### 2.2 辐射特性

经过优化, 中心频率上的方向图和极化图如图 8 所示, 几个主要频点下阵列天线的增益、轴比以及口径效率见表 2。计算口

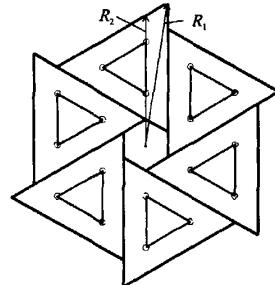


Fig. 4 Dentate disk combined with array units

图 4 子阵馈电组合形成的齿状圆盘

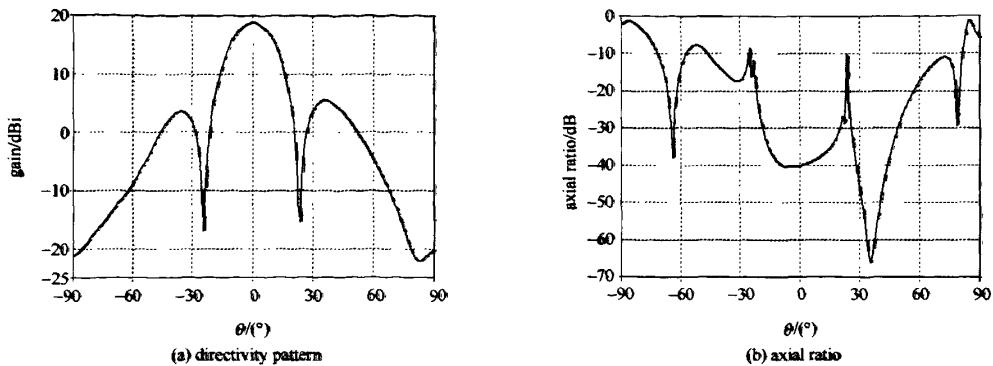


Fig. 8 Simulated directivity pattern and axial ratio of ring antenna at 1.57 GHz

图8 1.57 GHz线极化平面内的方向图和轴比图

径效率时,考虑到为固定天线罩必须扩大天线口面需给予一定的空间,因此,在仿真建模时取天线口面半径为303 mm。从表中数据可以看出在1.47~1.77 GHz的范围内,天线增益大于18.3 dBi,口径效率大于68%,轴比小于-39.35 dB。

### 3 实验结果及分析

实验的内容主要包括测量天线的反射特性和辐射特性,将天线放于22 m×15 m×8 m的微波暗室中进行特性测量。

#### 3.1 反射特性

按照整体结构装配天线后,首先对其反射特性进行了测量,结果如图9所示,其纵轴表示驻波比(VSWR)。由图可见,天线在1.47~1.77 GHz的频带范围内驻波比都小于1.4,若不计天线欧姆损耗,其辐射效率大于97%。

#### 3.2 辐射特性

图10是中心频率下的极化平面内的方向图和轴比图,表3是1.47~1.77 GHz各频点下天线辐射特性的测量结果(天线口径半径为303 mm)。由表3和图10可以看出,天线在1.47~1.77 GHz的频率范围内实现了较好的轴向辐射,增益大于17.31 dBi,线极化程度较好,天线的口径效率大于54%。

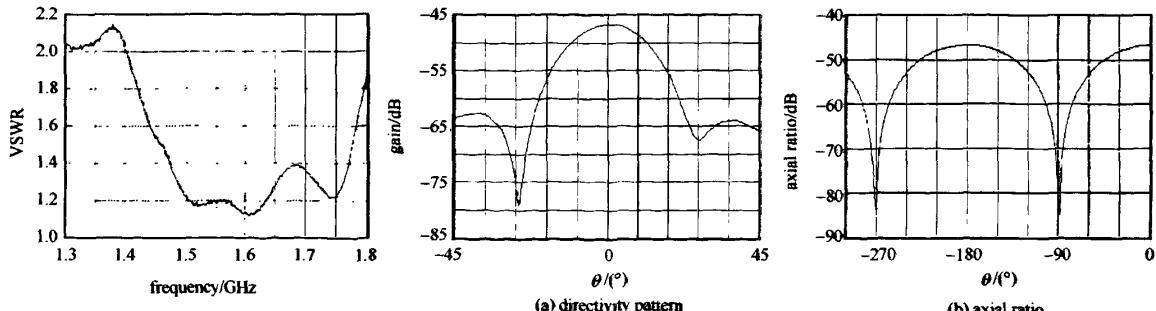


Fig. 9 Measured reflection coefficient

图9 测量得到阵列天线的反射曲线

### 4 结论

以改进高功率线极化径向线阵列天线特性为目的,对阵列天线的相关参数进行了改进,设计出的阵列天线功率容量大于1 GW。在经过理论分析和数值模拟后,对阵列天线进行了实验研究,测量结果表明:在1.47~1.77 GHz的频带范围内,阵列天线实现了线极化微波的轴向辐射,天线辐射效率大于97%,增益大于17.31

表2 仿真得到的主要频点下天线辐射特性

Table 2 Simulated antenna radiation characters

f/ GHz	G/ dBi	aperture efficiency/%	axial ratio/ dB
1.47	18.30	68.00	-39.35
1.57	18.73	75.13	-39.82
1.67	19.28	85.28	-45.08
1.77	19.02	80.32	-49.44

表3 实验测量的主要频点下天线辐射特性

Table 3 Measured antenna radiation characters

f/ GHz	G/ dBi	aperture efficiency/%	axial ratio/ dB
1.47	17.31	54.2	-38.60
1.57	17.65	58.6	-39.20
1.67	18.20	66.5	-40.75
1.77	17.97	63.1	-45.30

Fig. 10 Measured directivity pattern and axial ratio of antenna at 1.57 GHz

图10 测量得到的1.57 GHz下线极化平面内方向图和轴比图

dB<sub>i</sub>, 轴比小于-38.6 dB, 口径效率大于54%。

### 参考文献:

- [1] Nakano H, Takeda H, Kitamura Y, et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1992, **40**(3): 279-284.
- [2] 刘庆想, 李相强, 袁成卫, 等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线理论分析与数值模拟[J]. 电子学报, 2005, **33**(12): 2231-2234. (Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, Yuan Chengwei, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of a high power helical array antenna fed from double-layer radial waveguide. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(12): 2231-2234)
- [3] 李相强, 刘庆想, 赵柳. 高功率单层径向线螺旋阵列天线的设计和模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11): 1421-1424. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu. High power helical array antenna fed from single-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1421-1424)
- [4] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2): 265-268. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, et al. Experiment research of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 265-268)
- [5] 赵柳, 张健穹, 吴晓降, 等. 4单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(11): 1869-1872. (Zhao Liu, Zhang Jianqiong, Wu Xiaojiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1869-1872)
- [6] 赵柳, 李相强, 刘庆想, 等. 16单元组合式矩形径向线螺旋阵列天线的设计[J]. 电波科学学报, 2008, **23**(4): 640-644. (Zhao Liu, Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, et al. Design of 16-element assembled square helical array antenna fed from radial waveguide. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, **23**(4): 640-644)
- [7] 王欣, 刘庆想, 张健穹, 等. L波段高功率线极化径向线阵列天线理论分析与数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(3): 416-420. (Wang Xin, Liu Qingxiang, Zhang Jianqiong, et al. High power linear polarized radial waveguide array antenna for L-band. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(3): 416-420)
- [8] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. (Kang Xingjian. The theory and design of antenna. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993)
- [9] 张志涌, 徐彦琴. MATLAB教程——基于6.x版本[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001. (Zhang Zhiyong, Xu Yanqin. MATLAB course-based on 6.x edition. Beijing: Beihang University Press, 2001)
- [10] 杨儒贵. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (Yang Rugui. Electromagnetic fields and waves. Beijing: Higher Education Press, 2003)

## Optimization and experiment research of high power linearly polarized radial waveguide array antenna

Wang Xin, Liu Qingxiang

(School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The performance affecting factors were analyzed to improve the high power linearly-polarized radial waveguide array antenna in its aperture efficiency, reflection and so on. Based on the analysis, three optimization approaches were adopted, i.e., improving the performance of cell antenna, adjusting the layout of array antenna and improving the radial waveguide and probe. Theoretical analysis, numerical simulation and experimental measurement of the array antenna were carried out. The experiment shows that at 1.57 GHz, the voltage standing wave ratio(VSWR) is 1.19, the gain is 17.65 dB<sub>i</sub>, and the axial ratio is -39.2 dB. In the range of 1.47 to 1.77 GHz, the VSWR is below 1.4.

**Key words:** linear polarization; radial waveguide; aperture efficiency; reflection of array antenna

## 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>