

## GW 级高功率径向线螺旋阵列天线

李相强<sup>1</sup>, 赵柳<sup>1</sup>, 陈晓波<sup>2</sup>, 刘庆想<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610031; 2. 中国西南电子设备研究所, 四川 成都 610036)

**摘 要:** 为提高高功率径向线螺旋阵列天线的功率容量, 实现 GW 级高功率微波定向辐射, 通过对螺旋线单元天线和阵列布局的改进, 设计了功率容量大于 1 GW 的 4 圈 48 单元磁探针径向线螺旋阵列天线, 并对其进行了理论分析、数值模拟和试验研究。测量结果表明: 在 3.6~4.1 GHz 范围内, 天线增益大于 22 dB, 轴比小于 2 dB, 口径效率大于 55%。

**关键词:** 螺旋天线; 径向线; 阵列天线; 磁探针耦合; 高功率微波

**中图分类号:** TN82 **文献标识码:** A

## GW-Level High-Power Radial Line Helical Array Antenna

LI Xiangqiang<sup>1</sup>, ZHAO Liu<sup>1</sup>, CHEN Xiaobo<sup>2</sup>, LIU Qingxiang<sup>1</sup>

(1. School of Physical and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** In order to raise the power-handling capacity of a high-power radial line helical array antenna and realize the directional radiation of GW-level high-power microwaves, a GW-level 4-ring 48-element radial line helical array antenna using H-coupled probes was designed based on the improvements of element helical antenna and array arrangement. Theoretical analysis, numerical simulation and experimental measurement of this radial line helical array antenna were carried out. The result of the experimental measurement shows that in the range of 3.6 to 4.1 GHz, the antenna gain is over 22 dB, the antenna axial ratio is below 2 dB, and the aperture efficiency is more than 55%.

**Key words:** helical antenna; radial waveguide; array antenna; H-coupled probe; high-power microwave

高功率微波辐射技术是在传统微波辐射技术的基础上, 为了满足高功率微波系统的独特需求而逐渐发展起来的一种特殊的微波辐射技术, 它主要需解决高功率容量、旋转轴对称模的定向辐射、过模传输等技术问题。目前已经报道的高功率微波辐射技术主要包括波导模式转换器加辐射喇叭<sup>[1~3]</sup>、Vlasov 天线<sup>[4]</sup>、COBRA 天线<sup>[5]</sup>、反射面天线<sup>[6]</sup>等几种类型。然而, 它们或多或少地存在着诸如辐射效率不高、辐射特性不理想、口径效率低、功率容量不高、系统笨重等缺点, 限制了其应用。

为此, 在国外学者研究的径向线阵列天线<sup>[7]</sup>的基础上, 通过改进耦合探针等关键环节, 提出了一种新型高功率径向线螺旋阵列天线。文献[8, 9]分别对 36 单元双层和单层阵列天线进行了理论分析和数值模拟, 文献[10]对 36 单元双层阵列天线进行了实验研究, 通过理论分析、数值模拟和实验研究验证了这种天线实现高功率微波定向辐射的可行性。然而, 通过对 36 单元阵列天线的功率容量分析发现, 由于阵列天线口径场强分布不均匀, 导致天线真空介质罩处的功率容量下降<sup>[10]</sup>。为了提高天线的功率容量, 使其达到 GW 级的水平, 文献[11]提出了改进单元天线和阵列布局的方案。

收稿日期: 2007-10-12

作者简介: 李相强(1982-), 男, 助教, 博士研究生, 研究方向为高功率微波技术, E-mail: xiangqiang\_li@163.com

通讯作者: 刘庆想(1964-), 男, 教授, 博士, 研究方向为高功率微波技术, E-mail: liu\_qingxiang@163.com

笔者首先根据文献[11]提出的改进方案进行相应的改进设计,然后通过理论分析和数值模拟设计达到 GW 级功率容量水平的高功率径向线螺旋阵列天线,最后对其进行实验研究。

## 1 改进设计

通过文献[11]的分析可以看出,36 单元阵列天线的功率容量主要局限在介质罩外表面处。为此提出增大天线口径,同时增加单元数量的方法。这需要重新设计阵列天线的布局。另外,螺旋线单元天线也是功率容量较低的位置,需要加以改进,提高其功率容量。

### 1.1 螺旋线单元天线

36 单元阵列天线中使用的螺旋线单元天线圈数为 1.5 匝,螺距角为  $6.5^\circ$ ,馈电同轴线内导体半径 1.5 mm,外导体半径 15 mm,其剖面的场强分布如图 1 所示(输入功率为 1 W)。

由图 1 可以看出,天线内部场强  $E_{\text{field}}$  最大值为 12.011 kV/m。天线存在两处局部场强集中:(1) 同轴馈电波导内导体表面;(2) 天线的底部横杆与螺旋连接处。这两处场强集中限制了整个天线的功率容量。经分析发现,同轴馈电波导内导体表面场强集中的原因是内导体半径较小;横杆与螺旋连接处场强集中原因较多,如连接杆半径较小和结构突变引起较大的反射等。因此,拟采用增大同轴内导体半径和横杆半径的方法提高螺旋线单元天线的功率容量。

将同轴内导体半径扩大为 2.5 mm,横杆半径扩大为 2 mm(原为 1.5 mm)。在此基础上对螺旋线单元天线进行了模拟优化。优化得到的天线结构尺寸:螺旋半径  $R = 13$  mm,螺旋圈数  $N = 1.5$ ,螺距  $S = 8.2$  mm,螺旋导线半径  $r = 1.5$  mm,弯曲处高度  $h = 4.5$  mm。此螺旋线单元天线剖面的场强分布示于图 2 中,在不同方位平面的方向图和轴比示于图 3 中(其中  $\theta$  表示俯仰角,  $\varphi$  表示方位角)。

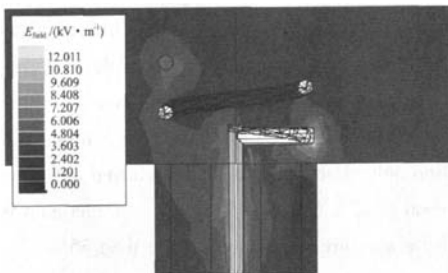


图 1 原螺旋线单元天线场强分布  
Fig. 1 Field distribution of the former helix

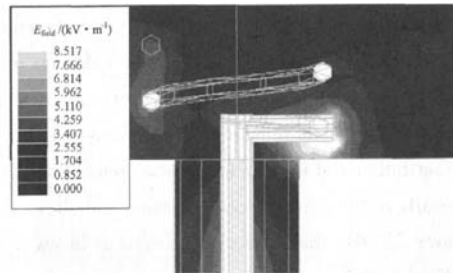
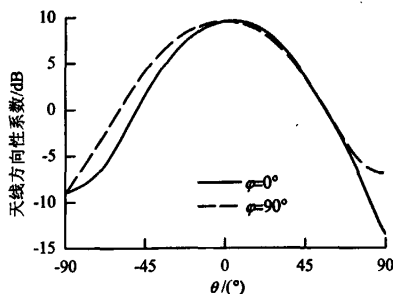
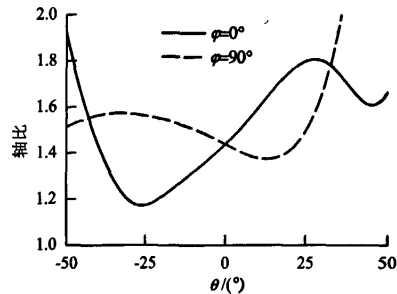


图 2 改进后螺旋线单元天线场强分布  
Fig. 2 Field distribution of the improved helix



(a) 方向图



(b) 轴比

图 3 改进后螺旋线单元天线方向图和轴比  
Fig. 3 Antenna directivity pattern and axial ratio of the improved helix

比较图 1 和 2 可以看出,单元天线内部场强最大值降为 8.517 kV/m,功率容量提高到原来的  $(12011/8517)^2 \approx 2$  倍。由图 3 可以看出,改进后的螺旋线单元天线轴对称性和轴比都比较理想,天线方向性系数为 9.6 dB,方向图在上半空间可用  $\cos^{1.7} \theta$  来近似,轴向轴比为 1.43。

1.2 阵列布局

对阵列布局进行改进设计的思想是扩大天线口面,同时增加同心圆环圈数,增加总的单元数量.这样可以有效地降低天线口面场的最大场强,提高天线功率容量,同时进一步提高天线的增益,使得口径效率等设计参数满足设计要求.

通过对不同口径的阵列天线的模拟,发现当天线口径扩大到 0.4 m 以上时,天线口面可以达到 1 GW 的功率容量水平.综合考虑阵列天线设计各种因素(径向线馈电、互耦、增益等),改进后的阵列天线由 4 圈组成,各圈半径分别为 27 mm,73 mm,119 mm 和 165 mm,螺旋数量定为 3,9,15 和 21,阵列布局如图 4 所示.对上述阵列布局进行了数值模拟(采用改进后的螺旋线单元天线),给出了 4.0 GHz 下天线口面场的分布图及场强大小示于图 5 中.

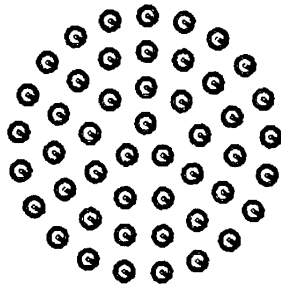


图 4 阵列布局示意  
Fig. 4 Arrangement of array antenna

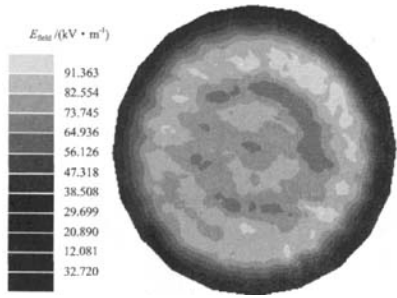


图 5 均匀激励下阵列口面场分布  
Fig. 5 Field distribution of the array aperture

可以看出,通过天线口径面的扩大和螺旋天线的改进,天线的口径面场强明显减小.在输入功率为 1 W 的情况下,距径向线顶板 40 mm 处降为场强最大值为 91.4 V/m,按空气中击穿场强 3 MV/m 计算,功率容量为 1.077 GW,在这一位置处加天线罩可以保证 GW 级的微波发射.

2 理论分析

经过上述改进设计,设计了一个 4 圈 48 单元阵列天线.下面采用阵列天线理论计算该天线轴向辐射时的方向图及方向性系数,采用的计算方法与文献[7,8]相同.

取单元天线上半平面的方向图为  $\cos^{1.7} \theta$ ,假设螺旋线单元天线激励幅度与激励相位均相同,可以计算得到 4.0 GHz 下阵列天线的方向图,其对应的曲线示于图 6 中.由图可以看出,天线副瓣电平为 -17.5 dB,波瓣宽度为 11.7°.通过计算可以得出 4.0 GHz 下阵列天线的方向性系数为 24.2 dB.

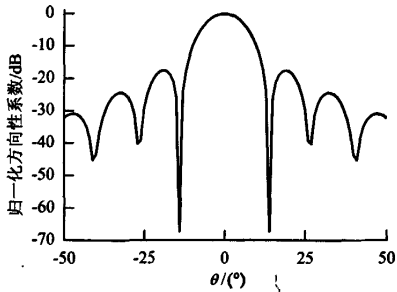


图 6 计算得到的天线方向图  
Fig. 6 Calculated Antenna directivity pattern

3 数值模拟

3.1 耦合特性

为了从径向线中提取能量激励螺旋线单元天线,仍采用文献[8,9]所述的磁探针.设计的目的是使各单元天线的激励幅度近似相等,由于各圈探针所处位置处场强不同,必须调整探针的耦合量才能使其耦合的能量一致,这需要通过改变磁探针的探入深度、调整反射环、优化封口等方法实现.经过细致的优化设计,得到的中心频点下各圈探针典型的耦合量和耦合相位列于表 1 中(用天线的 1/3 进行模拟).由表 1 的

表 1 中心频率下各圈探针典型的耦合结果(模拟)  
Tab. 1 Typical coupling result of the probes (simulated)

结果	第 1 圈	第 2 圈	第 3 圈	第 4 圈
耦合量	0.270	0.257	0.232	0.251
耦合相位/(°)	93.0	-90.6	147.6	54.7

结果可见,得到的耦合量基本一致,单元天线间激励能量的差别小于 $10\lg(0.270/0.232)^2 \approx 1.3\text{ dB}$ ,这样可以获得较高的方向性系数;耦合相位将用来确定螺旋天线的旋转角度,以使阵列天线实现轴向辐射.

3.2 反射特性

在天线的设计过程中,尽量减小探针的插入反射,并且通过调整反射环和封口位置等方法降低天线反射,同时保证耦合探针与螺旋线单元天线之间的良好匹配.经过细致的模拟优化,得到的天线反射系数随频率的变化如图7所示.由图可见,在3.2~4.5 GHz的频带范围内,天线驻波比小于1.5.

3.3 辐射特性

根据表1中磁探针耦合后各单元的耦合相位,绕轴旋转螺旋线单元天线即可实现阵元辐射相位的一致,从而实现微波的轴向辐射.旋转方法如下:若耦合单元的耦合相位为 $\alpha$ ,只需将螺旋绕轴沿其旋转方向旋转 $-\alpha$ 即可.

用有限元软件模拟了按照上述方法旋转后得到的螺旋阵列天线,图8给出了模拟得到的4.0 GHz的辐射方向图,表2总结了主要频点的天线方向性系数、口径效率、副瓣电平和轴比等辐射特性.

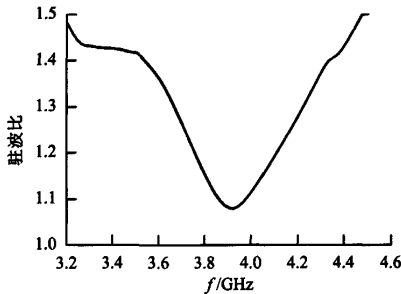


图7 模拟的天线反射特性  
Fig.7 Simulated antenna VSWR

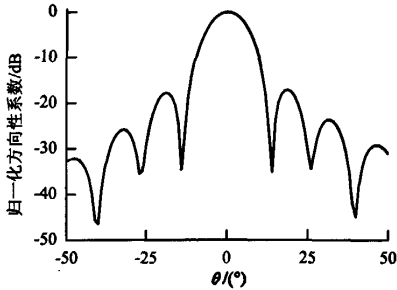


图8 模拟得到的中心频点辐射方向图  
Fig.8 Simulated antenna directivity pattern

表2 模拟得到的主要频点下天线的辐射特性  
Tab.2 Simulated antenna radiation characteristics

辐射特性	频率/GHz			
	3.6	3.8	4.0	4.2
方向性系数/dB	23.38	23.90	24.18	24.32
口径效率(口面直径460 mm)/%	79.2	80.0	77.2	72.2
副瓣电平/dB	-18.9	-16.5	-14.5	-13.2
轴比	1.46	1.47	1.61	1.83

由图8和表2可以看出,在3.6~4.2 GHz的频带范围内,天线方向性系数大于23.38 dB,口径效率大于72%,天线副瓣电平保持在-13 dB以下,轴比小于1.83.

4 实验研究

实验研究主要包括测量天线的反射特性和辐射特性等,采用的实验方法与文献[10]中相同.

4.1 反射特性

根据各探针的耦合相位绕轴旋转螺旋线单元天线使其辐射相位一致,图9示出了旋转后螺旋天线的角度位置(螺旋天线为右手螺旋,各耦合口引出的线段表示螺旋天线横杆指向).在图9所示的角度位置下将螺旋线单元天线固定,在5 m×4 m×4 m的微波暗室中测量天线的反射特性,测量结果示于图10中.由图可见,天线在3.4~4.2 GHz的频带范围内驻波比小于1.6,若不计天线欧姆损耗,其辐射效率大于94%.

4.2 辐射特性

将阵列天线置于22 m×15 m×8 m的微波暗室中测量其辐射特性.表3总结了3.6~4.3 GHz各频点下天线辐射特性的测量结果.图11给出了主要频点下天线的辐射方向图.

由表 2 和图 11 可以看出:天线在 3.6~4.1 GHz 的频带范围内可实现良好的轴向辐射,增益大于 22 dB,轴比小于 2 dB,天线口径效率大于 55%.

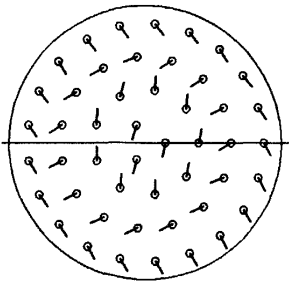


图 9 螺旋天线旋转后的角度位置  
Fig. 9 Helix position after rotation

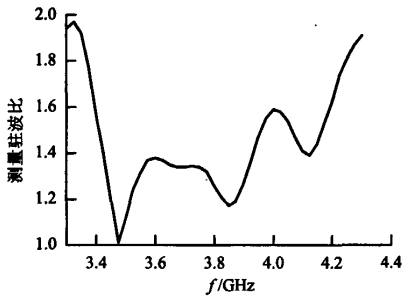
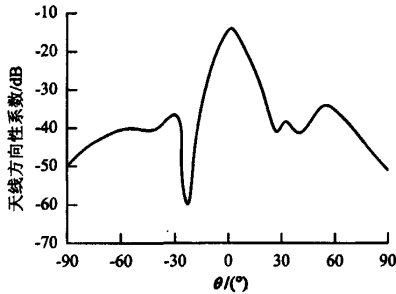


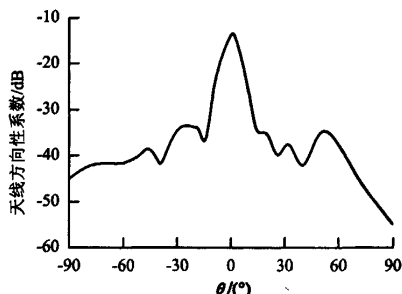
图 10 阵列天线驻波比测量曲线  
Fig. 10 Measured antenna VSWR

表 3 阵列天线辐射特性测试结果  
Tab. 3 Measured antenna radiation characteristics

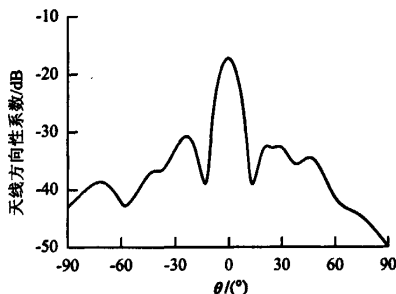
辐射特性	频率/GHz							
	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3
待测天线增益/dB	21.99	22.37	22.82	23.03	22.96	22.93	22.83	23.22
口径效率( $D=440\text{ mm}$ )/%	0.575	0.594	0.626	0.623	0.583	0.550	0.513	0.535
轴比/dB	0.28	0.71	1.15	1.41	1.68	1.94	2.17	2.58



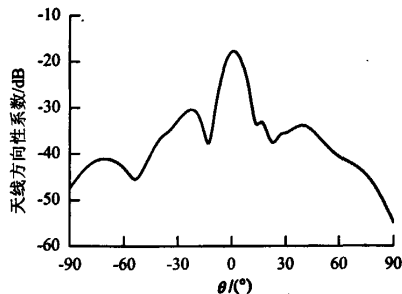
(a) 3.6 GHz



(b) 3.8 GHz



(c) 4.0 GHz



(d) 4.2 GHz

图 11 主要频点下天线的辐射方向图  
Fig. 11 Measured antenna directivity pattern

4.3 结果分析

从实验测量结果可以看出,实验测得的驻波比、辐射方向图及天线增益等与数值模拟结果总体上相互吻合,从原理上验证了理论分析和数值模拟的正确性,但其中也存在一定的差异,主要包括:(1) 实验测得

的驻波比略高于模拟值;(2)实验测得的辐射方向图中副瓣的轴对称性不高;(3)实验测得的天线增益值略低于模拟值.产生上述差异的原因主要有:(1)在加工和装配过程中,阵列天线的内部结构尺寸不可避免地会发生一定的误差,这种误差会恶化驻波比并改变耦合探针的耦合量和耦合相位,使得天线的口面分布无法与模拟中完全一致,导致天线副瓣轴对称不高、增益下降;(2)实验中采用非标准接口到标准接口的阻抗变换器进行测量,阻抗变换器本身存在一定的反射和损耗,会对驻波测量结果和天线增益产生一定的影响.

## 5 结 论

以提高天线的功率容量为目的,对螺旋线单元天线和阵列布局进行了改进设计,在此基础上设计了4圈48单元磁探针径向线螺旋阵列天线,所设计出的阵列天线功率容量大于1 GW.在理论分析和数值模拟的基础上对设计出的阵列天线进行了实验研究,测量结果表明:在3.6~4.1 GHz的频带范围内,阵列天线可以实现微波的轴向辐射,天线辐射效率大于94%,增益大于22 dB,轴比小于2 dB,口径效率大于55%.

### 参考文献:

- [1] YANG S W, LI H F. Numerical modeling of 8mm TM<sub>01</sub>-TE<sub>11</sub> mode converter[J]. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1996, 17(11): 1935-1943.
- [2] EISENHART R L. A novel wideband TM<sub>01</sub>-TE<sub>11</sub> mode converter[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 1(11): 249-252.
- [3] 刘庆想,袁成卫.一种新型同轴 TEM-圆波导 TE<sub>11</sub> 模式变换器[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1421-1424.  
LIU Qingxiang, YUAN Chengwei. A new type of coaxial TEM-circular waveguide TE<sub>11</sub> mode convertor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11): 1421-1424.
- [4] VLASOV S N, ORLOVA I M. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into highly directional wave beam[J]. *Radiofizika*, 1974, 17(1): 148-154.
- [5] COURTNEY C C, BAUM C E. The coaxial beam-rotating antenna (COBRA): Theory of operation and measures performance [J]. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2000, 48(2): 299-309.
- [6] YAHYA R S, DUAN D W, GIRI D V, et al. Canonical examples of reflector antennas for high-power microwave applications [J]. *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 1992, 34(3): 197-205.
- [7] NAKANO H, TAKEDA H, KITAMURA Y. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1992, 40(3): 279-284.
- [8] 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[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2231-2234.
- [9] 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[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11): 1421-1424.
- [10] 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[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 265-268.
- [11] 李相强,刘庆想,赵柳.36单元高功率双层径向线螺旋阵列天线功率容量研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(6): 943-946.  
LI Xiangqiang, LIU Qingxiang, ZHAO Liu. Study on power capacity of a 36-element high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 943-946.

(中文编辑:唐 晴 英文编辑:付国彬)

## 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,一直致力和专注于微波、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>