

文章编号:1005-0388(2000)02-0216-05

# 毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线的研究<sup>\*</sup>

王 杰, 吕善伟

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:**研究的毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线是一种薄形的波导裂缝阵, 结构新颖, 特别适用于飞行器天线。由于这种天线的数学模型比较复杂, 并且工作在毫米波段, 使设计和分析带来了一定的困难。根据裂缝阵设计的理论基础, 对毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线进行了研究, 采用了终端短路的准行波天线阵的方案, 设计得到的毫米波裂缝阵天线具有斜角扇形波束、较低副瓣、宽频带和薄形等优点。理论结果和实测结果相吻合, 在工程上应用已得到了良好效果。

**关键词:**毫米波裂缝天线; 裂缝天线; 波导阵天线; 毫米波; 计算机辅助设计

中图分类号: TN823<sup>+</sup>. 24

文献标识码: B

## Study of the millimeter wave linear array with fan beam of inclined angle

WANG Jie, LÜ San-wei

(Department of Electronic Engineering Beijing University of  
Aeronautics & Astronauts, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The new kind of millimeter wave quasi-traveling antenna array was investigated. The antenna was a thin type of slot array of wave-guide. The structure of the wave-guide's terminal short was applied. Because the mathematics model of the antenna was more complicated and the antenna worked in the millimeter wave band, it was very difficult to design. Based on the theory of the slot array design, the main difficult points have been solved. The antenna designed has advantage with the beam of inclined angle, low side lobe level and wide work band (more than 1.4GHz). The theoretical results and experimental ones are in good agreement. It befits especially to apply in the field of aero apparatus. The favorable effects have been gotten in the application of the engineering project.

**Key words:** Slot-array of millimeter wave; Slot-array; Waveguide-slot array; Millimeter wave; Design with aid of computer

## 1 概述

讨论的斜扇形波束是指在天线轴向面有一个倾斜于天线法向的窄波束, 在天线的滚动面是一个宽波束的方向图。这种天线广泛地应用于无线电引信、微波定点通信等领域。通常, 用一维行波天线阵来实现这种斜扇形波束的功能。文章对毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线进行了研究。在毫米波段用裂缝天线设计会带来下列问题: (1) 缝隙细小会带来加工困难; (2) 毫米波天线本身体积非常小, 但从行波天线的工作原理考虑要加终端负载, 与体积小发生矛盾。

作者运用 Elliott 裂缝天线的基本设计理论<sup>[1]</sup>, 结合毫米波段行波天线阵的特点, 采用了不用终端负载的准行波天线阵的方案。通过合理设计, 解决了准行波天线阵终端反射的影响, 使每个单元能够充分地辐射, 同时在设计中考虑了天线的薄形结构。这种多元阵的薄型波导裂缝阵天线已经成功地应用于毫米波设备中, 取得非常好的效果。

## 2 基本设计方法

我们在 Elliott 裂缝天线的基本设计理论<sup>[1~3]</sup>的基础上进行分析设计。首先是根据天线阵轴向面的

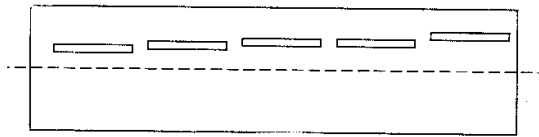
\* 收稿日期: 1999-09-15

波束指向,选取合适的波导纵向裂缝阵的阵元分布形式,然后应用 Elliott 的设计方法建立天线阵的等效网络进行求解。

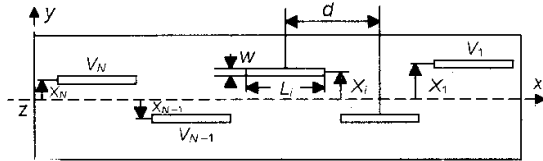
2.1 根据波束指向选取波导纵向裂缝阵的结构

一维波导纵向裂缝阵在天线的滚动面能自然形成宽波束,在天线的轴向面通过设计可以得到不同指向的窄波束。

天线的轴向面的波束指向由波导宽边  $a$ , 阵元间距  $d$ , 以及阵元的分布形式等因素决定。通常有图 1(a)、(b) 所示的两种天线阵元的结构分布形式。



(a) 天线阵元的分布形式



(b) 天线阵元的分布形式

图 1 天线阵元的分布结构示意图

$l_i$ —表示第  $i$  个裂缝的长度(mm).  
 $x_i$ —表示第  $i$  个裂缝中心与波导中心的偏移量(mm).  
 $V_i$ —表示第  $i$  个裂缝的缝电压( $i=1, \dots, N$ ).  
 $W$ —表示裂缝的宽度(mm).  
 $d$ —表示相邻两裂缝之间的间距(mm).

XOZ 平面通过天线轴向,称为天线的轴向面。在天线轴向面的波束方向上绕天线轴滚动所形成的面称为天线的滚动面。馈电波导的传输方向沿  $x$  轴方向。

图 1(a) 的阵元分布形式的波束指向公式为:

$$a = \frac{\lambda_0}{2\sin\theta_0} \quad 0 < \theta_0 < 90^\circ \tag{1}$$

它的特点是波导宽边  $a$  决定行波阵的波束指向,指向不受阵元间距  $d$  的影响, $d$  可以自由选择来调节其它的天线指标。但是由于波导的宽边  $a$  完全由  $\theta_0$  决定, $\theta_0$  越大  $a$  越小,对大  $\theta_0$  角度的波束指向设计会带来以下问题:

(1) 波导工作在临界截止区,如果天线的工作频

带比较宽,当频率为工作频带下限时,就有可能出现截止现象。

(2) 由于波导宽边小,阵元相对于波导宽边中心的分布范围就很窄,定位精度的要求就要提高,这对于毫米波段天线的设计是十分不利的。

所以毫米波段天线的设计在大  $\theta_0$  角度的波束指向情况下不宜采用这种分布方式。

图 1(b) 的阵元分布形式的波束指向公式为:

$$d = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{\lambda_g} - \frac{\cos\theta_0}{\lambda}} \tag{2}$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \tag{3}$$

通过对  $d, a$  的合适调节,可以满足行波阵不同斜角波束指向的设计要求,特别适合于  $\theta_0$  在  $90^\circ$  附近的波束指向要求。

2.2 用 Elliott 的设计方法建立准行波天线阵的求解方程<sup>[1~4]</sup>

Elliott 裂缝天线的基本设计理论的特点是用等效网络的方法考虑裂缝阵元之间的互相耦合的影响,计算快捷。在应用到毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线设计中,我们着重考虑了裂缝宽度和行波阵终端负载的影响,后者影响的分析和实践在文献[6]进行了详细的讨论。

根据 Elliott 的设计方法,天线阵的每一个辐射裂缝阵元都可以通过孤立裂缝导纳和裂缝等效导纳建立等效的网络模型。

孤立辐射缝导纳的计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{Y_n^{self}}{G_0} = \frac{-2s_{11}}{1 + s_{11}} \tag{4}$$

通过矩量法求解孤立辐射缝等效网络的  $s_{11}$  参数,即

$$s_{11} = \frac{A_{10}\pi}{j\sqrt{2}a} \left[ \sin \frac{\pi \left( x_n + \frac{w}{2} \right)}{a} - \sin \frac{\pi \left( x_n - \frac{w}{2} \right)}{a} \right] \cdot \sum_{s=1}^N a_s \frac{\frac{s\pi}{l_n}}{\left( \frac{s\pi}{l_n} \right)^2 - \beta_g^2} \begin{cases} 2\cos\beta_g \frac{l_n}{2} (s \text{ 为奇数}) \\ 2j\sin\beta_g \frac{l_n}{2} (s \text{ 为偶数}) \end{cases} \tag{5}$$

式中: $A_{nm}, a_s$  和  $\beta_g$  的定义见文献[4]。

处在阵列中的裂缝等效导纳的计算公式为:

$$\frac{Y_n^a(x_n, l_n)}{G_0} = 2f_n^2(x_n, l_n) \cdot \left[ \frac{2f_n^2(x_n, l_n)}{\bar{Y}_n^{self}(x_n, l_n)} + j \frac{\beta_{10}}{k} \cdot \frac{k_0 b a^3}{\lambda^3} \sum_{m=1}^{N_x \cdot N_y} \frac{V_m^s}{V_n^s} g_{nm}(x_m, x_n, l_m, l_n) \right]^{-1} \tag{6}$$

式中,  $g_{mn}$  是裂缝的耦合因子。公式中计入了天线阵阵元之间的互耦影响。

各阵元等效导纳的相互关系的另一分析设计公式表示为:

$$\frac{Y_n^a(x_n, l_n)}{Y_m^a(x_m, l_m)} = \frac{f_n(x_n, l_n)}{f_m(x_m, l_m)} \cdot \frac{V_n^s}{V_m^s} \cdot \frac{V_m}{V_n} \tag{7}$$

多个裂缝的准行波裂缝天线阵的等效网络如图 2 所示。

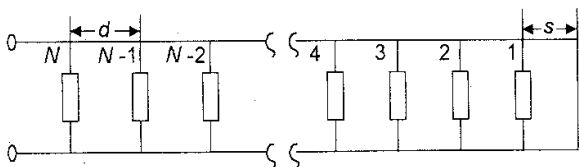


图 2 准行波低高度波导馈电阵列等效电路图

图 2 中, 天线阵终端去掉负载后, 在距离最后一个裂缝  $s$  处直接短路, 形成准行波裂缝阵列形式。选择天线阵终端等效到终端最后一个裂缝的电纳非常小的位置处。一般选择  $s$  为  $\lambda_g/4$  的奇数倍。对于由  $N$  个等间距  $d$  分布的纵向裂缝阵元组成的天线阵, 馈电波导内的主模波沿着波导从第一个裂缝阵元向后面  $N-1$  个裂缝阵元传输。每经过一个裂缝, 除了一部分能量通过裂缝向外空间辐射以外, 剩余部分继续向下一个裂缝传输, 以此下去传输到最后一个缝, 剩下的能量为终端漏泄功率。

终端漏泄功率定义为<sup>[7]</sup>:

$$P_l = \frac{V_1 \cdot V_1^*}{\sum_{n=1}^N V_n \cdot V_n^* \frac{Y_n^{a*}}{G_0}} \tag{8}$$

公式(6)、(7)和天线阵输入端的匹配条件组成了求解裂缝阵元位置  $x_i$  和裂缝长度  $l_i$  的  $2N$  个非线性方程组。求解过程采用迭代方式来完成。

在选择初始值  $x_i^0$  和  $l_i^0$  时, 为了消除天线阵终端反射的影响, 取终端漏泄功率  $P_l$  足够小, 一般取小于所要求旁瓣电平的最大值。由下列行波阵的公式<sup>[5]</sup>得:

$$C_n = \left| \frac{V_n^s}{V_1^s} \right|^2 \tag{9}$$

$$P_{nN} = \frac{1 - P_l}{\sum C_{N-m+1}} \tag{10}$$

$$g_1 = \frac{P_{nN}}{1 - P_{nN}} \tag{11}$$

$$g_n^{-1} = \frac{C_{n-1}}{C_n g_{n-1}} - 1 \tag{12}$$

式中  $g_n$  是孤立辐射缝的谐振电导。

通过孤立辐射缝的谐振曲线即可以得到求解裂缝阵元位置  $x_i$  和裂缝长度  $l_i$  的非线性方程组的初始值。

3 设计实例

按照上述的设计方法, 对毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线进行了设计。

3.1 设计目标

天线的轴向面波束指向  $\theta_0$  为  $82^\circ$ , 轴向面波束宽度为  $3^\circ$ , 副瓣要求小于等于  $-20\text{dB}$ 。

3.2 设计参数

天线结构采用薄形结构, 波导宽度与波导高度比为  $4.74:1$ 。由于是大  $\theta_0$  波束指向, 天线阵元分布采用图 1(b) 形式排列。根据波束宽度的要求取天线阵元数为 25。在紧挨终端最后一个缝位置处波导短路。计算得:  $\frac{a}{\lambda} = 0.8185$ , 阵元间距  $\frac{d}{\lambda} = 0.7676$ 。裂缝厚度取  $\frac{t}{\lambda} = 0.0575$ 。

3.3 设计结果

3.3.1 阵元位置和裂缝长度

阵元位置和裂缝长度计算结果见表 1。

表 1

$i$	$l_i/\lambda$	$x_i/\lambda$
1	0.5317	0.3084
2	0.5156	-0.1864
3	0.5041	0.1519
4	0.5018	-0.1404
5	0.4995	0.1404
6	0.5018	-0.1427
7	0.4995	0.1404
8	0.4995	-0.1358
9	0.4972	0.1277
10	0.5156	-0.1185
11	0.4903	0.1105
12	0.4880	-0.1024
13	0.4857	0.0944
14	0.4834	-0.0863
15	0.4811	0.0783
16	0.4811	-0.0714
17	0.4788	0.0633
18	0.4765	-0.0564
19	0.4765	0.0483
20	0.4742	-0.0414
21	0.4742	0.0345
22	0.4742	-0.0299
23	0.4742	0.0276
24	0.4742	-0.0253
25	0.4742	0.0253

3.3.2 方向图

天线轴向面的方向图分布用泰勒分布加权,考虑了裂缝之间的互耦后计算得到的方向图如图 3~图 8 和图 10 所示。

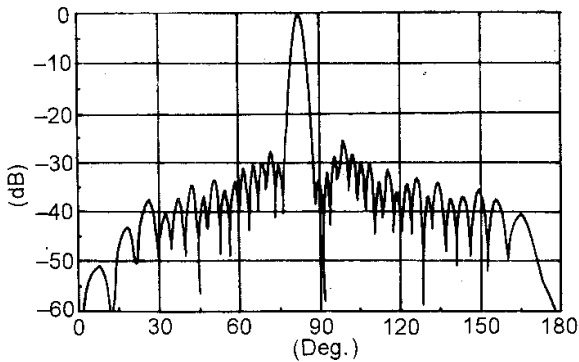


图 3 天线轴向面计算方向图(下边频  $f_0 - 0.7\text{GHz}$ )

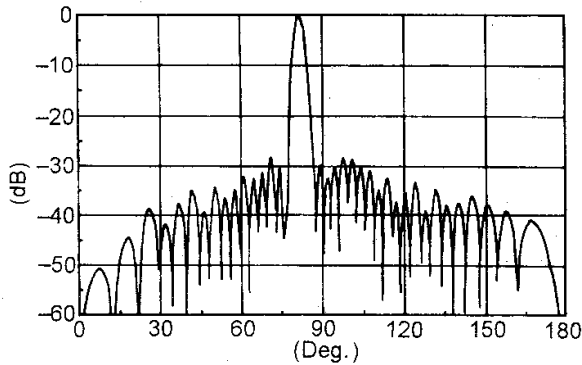


图 4 天线轴向面计算方向图(中心频率  $f_0$ )

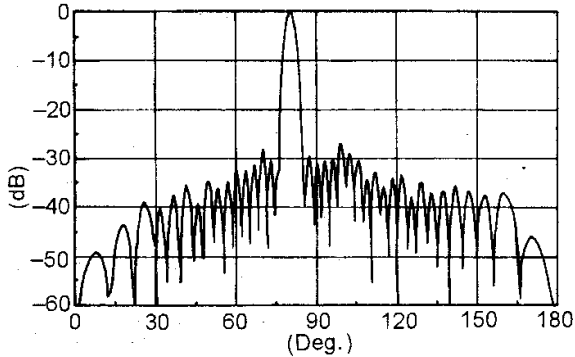


图 5 天线轴向面计算方向图(上边频率  $f_0 + 0.7\text{GHz}$ )

3.3.3 输入阻抗

计算得:

$$f_0 - 0.7\text{GHz}, Y_{in} = 1.00925 - j0.00926$$

$$f_0, Y_{in} = 1.0147 + j0.001138$$

$$f_0 + 0.7\text{GHz}, Y_{in} = 0.9929 + j0.001195$$

天线阵的终端漏泄功率分别为:

$$f_0 - 0.7\text{GHz}, P_1 = -20.3\text{dB}$$

$$f_0, P_1 = -22.6\text{dB}$$

$$f_0 + 0.7\text{GHz}, P_1 = -21.9\text{dB}$$

可见,设计得到的毫米波准行波裂缝天线阵的匹配特性是非常好的。

3.4 测试结果

其主要测试结果与性能为:

(1)工作频带宽度:1.4GHz

(2)电压驻波比: $<1.5$

(3)天线波束宽度:

天线轴向面波束宽度: $3.2^\circ$

天线滚动面波束宽度:大于  $120^\circ$

(4)波束指向: $82^\circ$

(5)天线增益: $>15\text{dB}$

(6)副瓣电平: $<-20\text{dB}$

(7)极化形式:线极化

(8)接头形式:标准 8mm 法兰

天线轴向面的方向图和输入特性(驻波比)见图 6、图 7、图 8 和图 9。理论计算和实测的方向图比较

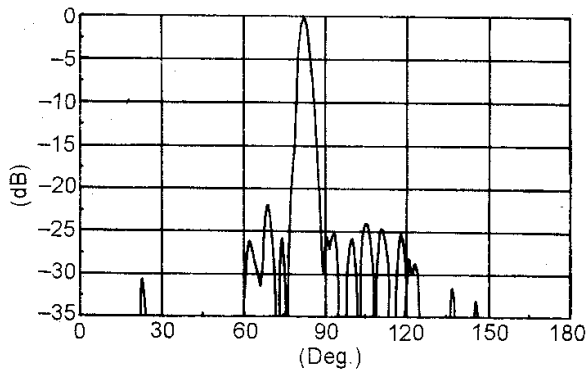


图 6 天线轴向面实测方向图(下边频  $f_0 - 0.7\text{GHz}$ )

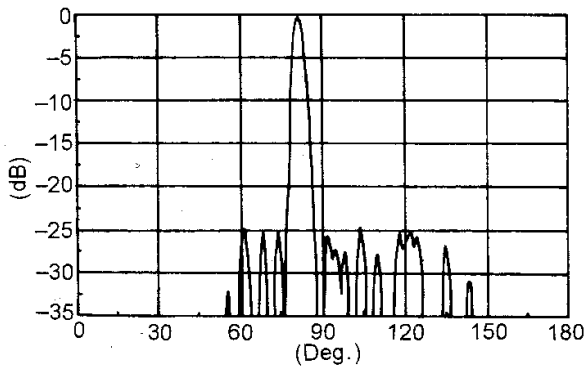


图 7 天线轴向面实测方向图(中心频率  $f_0$ )

见图 10。从两者的比较中可以看出,天线的波束(指向、宽度)测试值与理论值重合得很好,天线副瓣的最大值测试值约比理论值大 3dB。

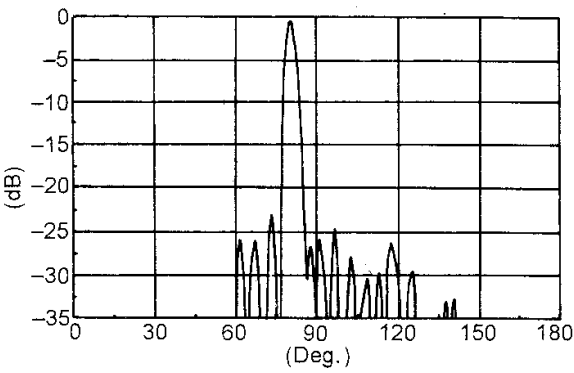


图 8 天线轴向面实测方向图  
(上边频  $f_0+0.7\text{GHz}$ )

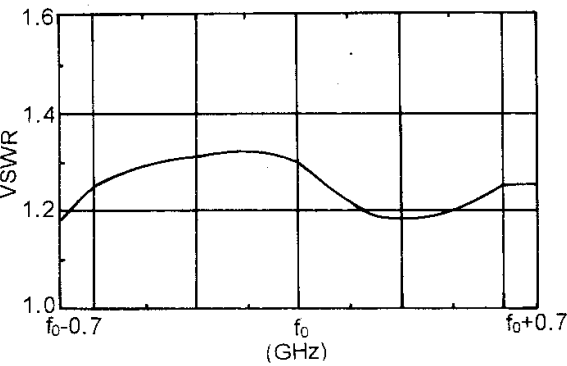


图 9 毫米波天线电压驻波比

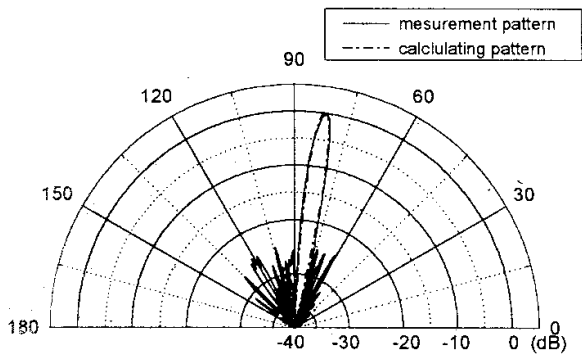


图 10 毫米波天线轴向面方向图  
理论值和实测值比较

4 结论

综上所述,根据这种方法设计得到的毫米波段斜扇形波束裂缝阵天线具有斜角扇形波束、较低副瓣、宽频带等优点,是一种性能良好的薄形波导裂缝

阵。理论结果得到实验验证是吻合的。

参考文献

[1] R. S. Elliott. An improved design procedure for small arrays of shunt slots[J]. IEEE Trans. ,1983,AP-31(1): 48~53.

[2] R. S. Elliott. On the design of traveling-wave-fed longitudinal shunt slot arrays [J]. IEEE Trans. , 1979,AP-27(5):717~720.

[3] R. S. Elliot & W. R. o'loughlin. The design of slot arrays including internal mutual coupling[J]. IEEE Trans. ,1986,AP-34(9):1149~1154.

[4] R. W. Lyon. Efficient moment method analysis of radiating slots in a thick-walled rectangular waveguide[J]. IEE PROC. ,1981,128(4):197~125.

[5] 翟孟云,严育林. 阵列天线理论导引[M]. 北京,国防工业出版社,1980,123~125

[6] 王杰,吕善伟. 裂缝行波线阵天线设计与实践[J]. 航空电子技术,1999,96(3):1~6.

[7] Mazem Hamadalla. Frequency limitations on broadband performance of shunt slot array [J]. IEEE Trans. ,on AP,1989,37(7):817~823.

王 杰 (1959-),男(汉族),浙江人,中国航天机电集团北京遥感设备研究所高级工程师,1999 年在职攻读北京航空航天大学电子工程系博士学位,主要从事微波天线与馈电、飞行器裂缝天线阵的设计与测量研究。

吕善伟 (1937-),男(汉族),大连人,北京航空航天大学电子工程系教授,博士生导师,主要从事射频、微波天线系统与通信方面的教学与科学研究。

## 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>