

# L型探针馈电的微带天线的仿真研究与设计<sup>\*</sup>

王渊博,宋 铮,吴 伟

(电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室,合肥 230037)

**摘要:**采用矩量法对L型探针馈电的微带天线进行仿真研究,对比分析了L型探针的2种传统等效方式,得出细带和立方柱体不能用于等效L型探针馈电,文中采用直接剖分对L型探针进行建模。通过对L型探针馈电矩形微带天线进行参量分析,得出当空气介质厚度大于 $0.8\lambda_0$ 时,采用L型探针馈电可以使天线相对带宽达到30%以上( $S_{11} < -10\text{dB}$ )。分析了L型探针高度和臂长对天线带宽的影响,通过判断电抗的容感性,调节L型探针的高度和臂长,可以有效改善天线带宽。最后设计了一副频率覆盖通信卫星下行传输信号频段 $3.2 \sim 4.4\text{GHz}$ 的微带天线。

**关键词:**L型探针;容感性;MOM

中图分类号:TN82 文献标志码:A

## The Study and Design of Micro-strip Antenna with L-shaped Probe Feed

WANG Yuanbo, SONG Zheng, WU Wei

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The L-shaped probe feed was studied by the way of MOM. In this paper, the L-shaped probe was meshed directly as thin strip and cube mold can not be used to analyze the L-shaped probe. A parametric study on the rectangular patch antenna with L-shaped probe feed was presented. It was found that the antenna attained above 30% impedance bandwidth( $S_{11} < -10\text{dB}$ ) when the air substrate was thicker than  $0.8\lambda_0$ ; the effect on the impedance bandwidth made by the height and the arm of L-shaped probe was analyzed. The method of bandwidth enhancement was presented, the reactance being capacity or not which determined how to adjust the height and the arm of L-shaped probe. At last, a micro-strip antenna was designed to operate over the range of  $3.2\text{GHz} \sim 4.4\text{GHz}$  that can be used for broadcast television and VSAT applications.

**Keywords:** L-shaped probe; capacity; MOM

## 0 引言

微带天线经过30多年的不断发展,已经在卫星通信、雷达、遥感、导弹遥控、电子对抗、医用设备等领域得到了广泛应用。但如何提高微带天线的性能依然是研究者们不断追求的目标。馈电方式是影响微带天线性能的一个重要方面。微带天线常见的馈电方式主要有探针馈电、微带线馈电还有孔缝耦合馈电等。其中探针馈电在微带天线中是用的比较多的一种馈电方式。对于介质层比较厚的微带天线采用探针馈电,由于探针比较长,导致天线输入阻抗的电感性加强,影响天线的带宽。为了克服这一缺点,可以采用脊型地板技术<sup>[1]</sup>,另外采用L型探针馈电也可以有效的克服这一影响<sup>[2]</sup>。与其他展宽频带技术相比,

采用L型探针馈电通常介质层是空气层或为与空气介电常数差不多的泡沫,因此具有重量轻、方便、易于制作、成本低等优点。目前L型探针馈电已经应用于微带天线的设计中<sup>[3-5]</sup>。

文中主要是采用矩量法对L型探针馈电进行研究,目的是想要得到它对基本微带结构性能的影响具有那几方面的因数,以期对L型探针馈电微带天线的设计提供一些指导。并最后设计一副频率覆盖通信卫星下行传输信号频段 $3.2 \sim 4.4\text{GHz}$ 的带有介质层的L型探针馈电的微带天线。

## 1 天线基本模型

对于介质厚度为 $h$ ,天线工作频率为 $f$ 的矩形微

\* 收稿日期:2010-11-02

基金项目:安徽省自然科学基金(090412067)资助

作者简介:王渊博(1986-),男,河北怀安人,硕士研究生,研究方向:微带天线理论、数值分析及微带天线的优化设计。

带天线,根据文献[6]计算矩形贴片的宽度和长度的经验公式为:

$$W = \frac{c}{2f} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (2)$$

式(1)、式(2)中:c 为光速,  $\epsilon_r$  为等效介电常数且有:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_r + 1)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (3)$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

根据式(1)~式(4),设计天线的基本模型如图 1 所示,金属地板的大小为  $G_w \times G_l = 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ,金属贴片的大小为  $W \times L = 30\text{mm} \times 24\text{mm}$ ,介质层为空气,金属贴片

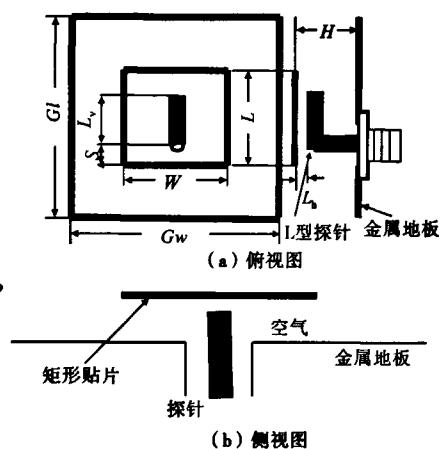


图 1 天线的基本模型

用泡沫板固定,泡沫板的介电常数与空气的差不多为  $\epsilon_r = 1.06$ ,探针半径为  $r = 0.5\text{mm}$ ,距贴片边的距离  $S = 2\text{mm}$ 。天线的工作频率为  $f_0 = 5\text{GHz}$ ,相应的波长  $\lambda_0 = 0.06\text{m}$ 。

## 2 天线的 MOM 分析

根据等效原理建立求解天线的电场积分方程为:

$$\hat{n} \times (ZL(\mathbf{J}) + \mathbf{E}') = 0 \quad (5)$$

其中: $\mathbf{J}$  为等效电流, $\mathbf{E}'$  为激励源产生的电场,且:

$$\begin{cases} L(\mathbf{X}) = -jk \int \left[ \mathbf{X} + \frac{1}{k^2} \nabla (\nabla' \mathbf{X}) \right] G d\tau' \\ Z = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \end{cases} \quad (6)$$

将等效电流利用 RWG 函数<sup>[7]</sup>展开:

$$\mathbf{J} = \sum_{n=1}^N I_n f_n(r) \quad (7)$$

采用伽辽金法对方程进行离散有:

$$\langle -ZL(\mathbf{J}), f_m(r) \rangle = \langle \mathbf{E}', f_m(r) \rangle \quad (8)$$

金属地板以及金属贴片采用平面三角形进行剖分建模,而对于探针的建模通常有两种方式:细带等效<sup>[8]</sup> 和立方柱体等效<sup>[9]</sup>,如图 2 所示。

细带与金属底板的公共边对应 3 对三角面对,即

三角形 m 与三角形 p、三角形 m 与三角形 n、三角形 p 与三角形 n,具体计算过程中为了避免重复需要去

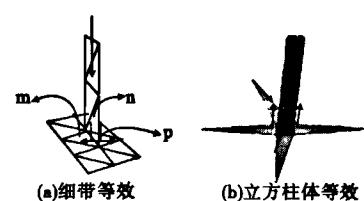


图 2 探针等效

掉三角形 m 与三角形 p 面对,对剩余的两个面对公共边施以  $\delta$  函数发生器。同样立方柱体底端 4 条边每条边均对应 3 对三角面对,由于电流仅分布于柱体表面,故柱体底面与其侧面所形成的面对应去掉。 $\delta$  电压源则加在柱体与金属底板构成 4 条公共边上,为了保证电流的流向符合实际馈电情况,规定位于金属底板上的三角形为正三角形,柱体表面的为负三角形。

下面就以上两种等效方法对 L 型探针进行等效,计算图 1 所设计的天线取  $L_v = 9\text{mm}$ ,  $L_h = 0.7\text{mm}$ ,  $H = 6\text{mm}$ ( $0.1\lambda_0$ ),并与 HFSS、FEKO 仿真软件仿真结果进行比较,如图 3 所示,从中可以看出无论是细带等效还是立方柱体等效与 HFSS、FEKO 仿真软件仿真结果均相差很多,这是由于 L 型探针馈电是通过耦合作用与金属贴片,细带和立方柱体不能用于等效 L 型探针馈电,不能够准确描述探针和金属贴片之间的耦合作用。至于 HFSS 与 FEKO 的结果存在差异是由两者的计算方法不同且馈电的处理不同引起的。

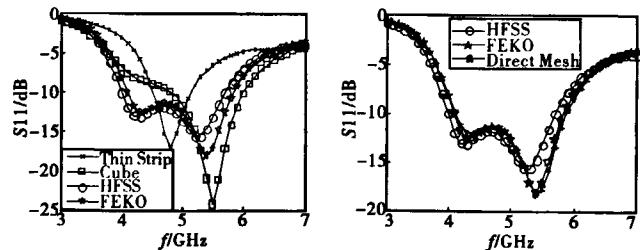


图 3 细带及立方柱体等效结果与 HFSS、FEKO 结果的比较

图 4 直接剖分结果与 HFSS、FEKO 结果的比较

为了准确模拟探针和金属贴片之间的耦合作用,需要保持探针的结构不能改变,故将圆柱形探针的外表面直接用三角形剖分建模。探针与金属底板接触处的馈电处理和立方柱体的处理方法相同。仿真计算结果如图 4 所示,通过与 HFSS 以及 FEKO 对比,可以看到三者结果吻合得较好,尤其是同 FEKO 仿真结果的吻合,这说明了文中计算程序是正确的。

## 3 天线参数分析

在天线基本结构不变的情况下,即地板大小、贴片大小、馈电点位置以及所采用的介质相同,L 型探针馈电的微带天线与普通探针馈电的微带天线相比,

导致性能上的差异主要来自受  $H$ 、 $L_v$ 、 $L_h$  取值的影响。下面对  $H$ 、 $L_v$ 、 $L_h$  的取值做具体分析。

### 3.1 H 的取值影响

采用 L 型探针馈电目的就是抵消普通探针馈电由于介质层较厚所产生的较大电感,使天线达到较大带宽。取  $L_v = 9\text{mm}$ ,  $L_h = 0.7\text{mm}$ , 对  $H$  取不同的值分别对两种天线进行仿真对比,仿真结果如表 1 所示。

表 1 H 的取值影响

$H/\text{mm}$	高频点 /		低频点 /		绝对带宽 /		相对带宽 /	
	GHz		GHz		GHz		GHz	
	L型	普通	L型	普通	L型	普通	L型	普通
6 ( $0.1\lambda_0$ )	5.7	/	4.0	/	1.7	0	35%	0
5.4 ( $0.09\lambda_0$ )	5.6	/	4.1	/	1.5	0	31%	0
4.8 ( $0.08\lambda_0$ )	4.9	5.4	4.3	5.1	0.6	0.3	13%	6%
4.2 ( $0.07\lambda_0$ )	4.9	5.6	4.5	5.2	0.4	0.4	9%	7%
3.6 ( $0.06\lambda_0$ )	5.0	5.7	4.7	5.2	0.3	0.5	6%	9%
3 ( $0.05\lambda_0$ )	5.1	5.8	4.9	5.3	0.2	0.5	4%	9%
2.4 ( $0.04\lambda_0$ )	/	5.8	/	5.5	/	0.3	0	5%

从表 1 仿真结果来看,不是在  $H$  取任何值 L 型探针馈电的微带天线都优于普通探针馈电的微带天线,在  $L_v$ 、 $L_h$  一定的情况下,当  $H \leq 0.07\lambda_0$  时,采用 L 型探针馈电对微带天线的带宽改善不大,而且天线的工作频率也不同,L 型探针馈电天线的工作频率较低;当  $H \geq 0.08\lambda_0$  时,采用 L 型探针馈电对微带天线的带宽有明显的改善。这也说明了只有当  $H$  取值较大时,从试验来看当  $H \geq 0.08\lambda_0$  时,采用 L 型探针馈电对改善天线的性能具有较大帮助。尤其是当由于介质层太厚采用普通探针馈电导致天线根本无法匹配的情况下,采用 L 型探针馈电可以极大改善天线的工作带宽,如果要求  $S11 < -10\text{dB}$ , 相对带宽可以达到 30% 以上。这也符合文献[2]的试验结果。

### 3.2 $L_v$ 、 $L_h$ 的取值影响

由于抵消电容的大小同时与  $L_v$ 、 $L_h$  有关,下面同时考虑  $L_v$ 、 $L_h$  的变化对采用 L 型探针馈电的微带天线的影响。取  $H = 6\text{mm}$  ( $0.1\lambda_0$ )。 $L_v$ 、 $L_h$  的单位为 mm, 带宽 BW 用  $(f_{\min}, f_{\max})x\%$  表示, 其中  $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为低频点和高频点, 单位为 GHz,  $x\%$  为相对带宽。计算结果如表 2 所示, 从中可以得到以下结论:

1) 由于抵消电容的大小与  $L_v$  成正比, 与  $L_h$  成反比, 故天线带宽与  $L_v$ 、 $L_h$  的取值密切相关。天线带宽的高频端  $f_{\max}$  主要受  $L_v$  的影响,  $f_{\max}$  随  $L_v$  增大而减小; 天线带宽的低频端  $f_{\min}$  主要受  $L_h$  的影响,  $f_{\min}$  随  $L_h$  增大而增大; 由于  $H$  一定, 当  $L_v$  变大时, 为使天线带宽达到最大,  $L_h$  取值也较大, 这样就使天线的最大带宽随着  $L_v$ 、 $L_h$  的增大而减小。而从 MOM 计算结果来看,  $L_v$ 、 $L_h$  也不能取值过小, 这样会使天线的最大带宽被分割。

表 2  $L_v$ 、 $L_h$  的取值影响

$L_h$	$L_v$					
	7.2	7.8	8.4	9	9.6	10.2
0.3	(4.8, 5.7)	(4.8, 5.7)	(4.8, 5.6)	(4.8, 5.5)	(4.8, 5.5)	(4.8, 5.4)
0.5	17%	17%	15%	14%	14%	12%
0.7	(4.0, 5.9)	(4.0, 5.8)	(4.0, 5.7)	(4.6, 5.6)	(4.6, 5.5)	(4.7, 5.5)
0.9	38%	37%	35%	20%	18%	16%
1.1	(4.0, 4.7)	(4.0, 4.8)	(4.0, 5.8)	(4.1, 5.9)	(4.1, 5.6)	(4.5, 5.6)
1.3	(5.5, 6.0)	(5.0, 5.9)	37%	36%	31%	22%
1.5	(4.2, 4.6)	(4.1, 4.6)	(4.0, 4.8)	(4.1, 5.7)	(4.0, 5.6)	(4.1, 5.6)
1.7	9%	11%	(5.3, 5.8)	33%	33%	31%
1.9	(4.3, 4.5)	(4.2, 4.6)	(4.2, 4.7)	(4.1, 4.8)	(4.1, 5.6)	(4.1, 5.6)
2.1	5%	9%	11%	16%	31%	31%
2.3	/	(4.3, 4.5)	(4.3, 4.6)	(4.2, 4.7)	(4.2, 4.9)	(4.1, 5.3)
2.5	5%	7%	11%	15%	26%	
2.7	(4.4, 4.5)	(4.3, 4.6)	(4.2, 4.7)	(4.2, 4.8)		
2.9	/	2%	7%	11%	13%	

2) 图 5 所示为当  $L_v = 9\text{mm}$ ,  $L_h$  分别取 1.5mm, 0.7mm, 0.3mm 时的电抗特性曲线。从图中可以看到, 当  $L_h = 1.5\text{mm}$  时, 天线工作在 4.3 ~ 4.6GHz, 位于电抗的前上升段, 电抗呈现容性; 当  $L_h = 0.3\text{mm}$  时, 天线工作在 4.8 ~ 5.5GHz, 位于电抗的后上升段, 电抗呈现感性; 而当  $L_h = 0.7\text{mm}$  时, 天线工作在 4.0 ~ 5.7GHz, 位于电抗的中间段, 电抗特性随着频率的升高由感性向容性变化。由此可以得到, 当 L 型探针馈电微带天线的带宽由于容抗偏大而限制天线带宽时, 可以增加探针的高度即减小  $L_h$ , 使感抗增加, 从而增大天线带宽; 相反当 L 型探针馈电微带天线的带宽由于感抗偏大而限制天线带宽时, 可以减小探针的高度即增加  $L_h$ , 使感抗减小, 从而增大天线带宽。

3) 图 6 所示为当  $L_h = 0.9\text{mm}$ ,  $L_v$  分别取 7.2mm、9mm、13mm 时的电抗特性曲线, 其中当  $L_v = 13\text{mm}$  时, 天线工作在 4.6 ~ 5.2GHz。从中可以得到和 2) 中相似的结论: 当 L 型探针馈电微带天线的带宽由于容抗偏大而限制天线带宽时, 可以增加探针的臂长即增加  $L_v$ , 使容抗减小, 从而增大天线带宽; 相反

当 L 型探针馈电微带天线的带宽由于感抗偏大而限制天线带宽时,可以减小探针的臂长即减小  $L_v$ ,使容抗增加,从而增大天线带宽。

4) 当  $L_v$  一定时,如图 5 所示,电抗随着  $L_h$  的增大而整体减小,这是由于  $L_h$  增大,探针高度变低,引起的感抗减小,同时 L 型探针与贴片产生的抵消电容减小,引起的容抗变大,导致电抗曲线随  $L_h$  的增大而下移;当  $L_h$  一定时,如图 6 所示,电抗会随着  $L_v$  的增大而整体增大,这是由于  $L_v$  增大,使 L 型探针与贴片产生的抵消电容增大,引起的容抗变小,导致电抗曲线随  $L_v$  的增大而上移。

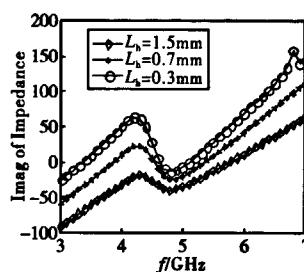


图 5  $L_v = 9\text{mm}$  电抗特性曲线

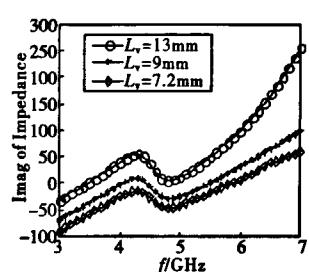


图 6  $L_h = 0.9\text{mm}$  电抗特性曲线

#### 4 带有介质层的 L 型探针馈电的微带天线设计

通过以上对 L 型探针的结构参数分析,可以看到对于厚介质的微带天线采用 L 型探针馈电可以有效的增加天线的带宽,影响天线匹配的主要参数是 L 型探针的高度以及其弯折臂的长度,通过合理的调节其高度及其臂长就能使天线达到匹配从而增加天线带宽。在以上只有空气层的基础上,在金属贴片下面加一厚度为  $h$  的介质层,且为了方便 L 型探针弯折部分采用金属片结构,其宽度为 2mm,设计天线尺寸为  $G_w \times G_l = 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ,  $W \times L = 22\text{mm} \times 22\text{mm}$ ,  $H = 10\text{mm}$ ,  $h = 2\text{mm}$ ,  $L_h = 1.5\text{mm}$ ,  $L_v = 10\text{mm}$  的带有介质层的 L 型探针馈电的微带天线。利用 MOM 对其进行仿真计算并与 HFSS 软件结果进行对比如图 7 所示,可以看到通过采用 L 型探针馈电,天线带宽得到了很好改善,能够覆盖  $3.2 \sim 4.4\text{GHz}$  频段,可作为通信卫星的下行传输信号频段,而如果采用直接探针馈电则很难使天线达到匹配。

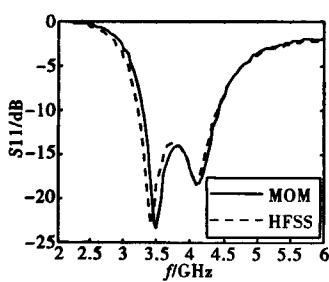


图 7 带介质层的 L 型探针馈电的微带天线仿真结果

#### 5 结束语

文中采用矩量法,对不同介质厚度的微带天线进行了仿真分析,得到当介质厚度大于  $0.8\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为天线的中心工作频率对应波长) 时,采用 L 型探针馈电可以有效增加天线带宽,如果要求  $S_{11} < -10\text{dB}$ ,相对带宽可以达到 30% 以上。可见 L 型探针馈电是一种有效的馈电方式,有利于提高厚介质微带天线的带宽。文中同时分析了 L 型探针高度和臂长对天线性能的影响,得出可以通过判断天线阻抗的容感性,适当调整  $L_v$ 、 $L_h$  就使天线达到匹配,增加带宽。在文中最后设计了一副频率覆盖  $3.2 \sim 4.4\text{GHz}$  的带有介质层的 L 型探针馈电的微带天线,可作为通信卫星的下行传输信号频段。

#### 参考文献:

- [1] 邵远,车仁信,韩雪. 金属脊和 H 形谐振枝节对微带天线的频带影响分析[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(5): 224—226.
- [2] Mak C L, Lak K M, Lee K F, et al. Experimental study of a microstrip patch antenna with an L-shaped probe [J]. IEEE on Antennas and Propagation, 2000, 48(5): 777—783.
- [3] Park J, Hyung-gi N, Seung-hun. Design of a modified L-probe feed microstrip patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3(1): 117—119.
- [4] K L Lau, K M Luk . A novel wide-Band circularly polarized patch antenna based on L-probe and aperture-coupling techniques [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1): 577—582.
- [5] P Li, K M Luk, K L Lau . A dual-feed dual-band L-probe patch antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(7): 2321—2323.
- [6] I. J. 鲍尔 P. 布哈蒂亚. 微带天线[M]. 北京:电子工业出版社,1984.
- [7] Rao S M, Wilton D R, and Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Trans. A. P., 1982, 30(3): 409—418
- [8] Makarov S N. Antenna and EM modeling with MATLAB[M]. 许献国,译. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [9] S N Makarov, S D Kulkarni, A G Marut, et al. Method of moment solution for a printed patch/slot antenna on a thin finite dielectric substrate using the volume integral equation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1174—1184.

## 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>