

# 一种可控多点波束星载天线

谭 萍 漆兰芬

华中科技大学电子与信息工程系  
武汉，430074

## 摘要：

随着卫星通信的发展，由于点波束具有较高的等效全向辐射功率（EIRP），同时又可以实现频率复用等优点，点波束的天线越来越多的得到应用，为了灵活地覆盖更多区域，点波束天线往往是多波束天线，并具有可调指向能力。本文论述了一种可调指向的多点波束星载天线的基本原理，并给出了模拟的计算结果，最后对有关参数的影响进行了讨论。

## 一、前言

按波束形状的不同，星载天线可分为全球波束、半球波束、区域波束和点波束天线四种。相对其它形状的波束而言，点波束天线在地球表面上形成的覆盖区域较小，可以产生较强的信号功率，因此具有较高的 EIRP，可以大大简化用户设备。

随可形成点波束能力而产生的另一项技术是频率复用，这就意味着需要多点波束。星载天线实现多波束形成的基本途径有两种：一种是相控阵天线（又称直接辐射多波束阵列天线）；另一种是多波束天线（又称焦平面/馈源阵列多波束天线）。目前星载天线大多采用平面相控阵天线产生多个点波束。

多点波束天线除了可使覆盖区内的 EIRP 增加外，还可以用于空分多址通信，这些点波束可迅速切换，以固定顺序为覆盖较大的面积进行扫描，或根据容量要求指向给定区域，这样可最佳利用空域资源，也减小了对覆盖区外其他通信系统的干扰。此外，还适宜用于特殊通信，如根据实际需要控制星上发射天线指向，使其波束覆盖范围作相应变化，这样既可降低信号被敌截获的概率，又可有效利用星上功率。采用的多点波束天线，一般都具有可调指向能力，可以灵活地调整波束的覆盖区域。

因此随着卫星通信的发展，可控多点波束的采用将是卫星通信重要的发展之一。

## 二、波束可控的基本方法及原理

波束的方向调整有机械调整、电控调整及光控调整方式。电控的方式又有相位扫描、频率扫描、馈源开关扫描等方法。其中相位扫描（即相控阵方式）较常用，它将带有相移器的阵列单元，按一定规律排列成阵列天线，主波束是由各辐射元件波束在所需指向的方向上同相相加而成。控制各个元件的激励相位，使主波束的指向都与馈电网络中每次的相移变化量相对应，这样只需通过计算机适当地控制每个馈电网络中的移相器的相移量，即可调节控制每个波束的指向，具有独特的波束捷变能力。

我们采用圆形阵天线，N 个天线辐射单元等间隔地安排在以旋转轴为中心，半径为 R 的圆周上，如图 1 所示。

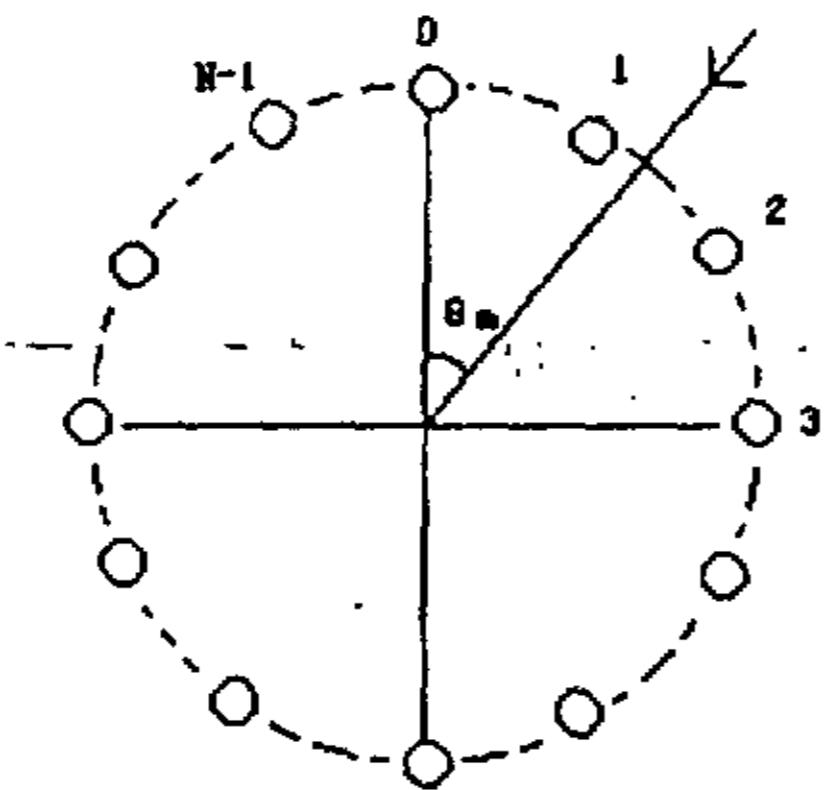


图1 圆形天线阵

设信号方向与0号单元天线的夹角为 $\theta_m$ , 以圆心O为相位参考基准, 则可求出第n根天线与圆心之间的相位差为:

$$\phi_{nm} = \frac{2\pi R}{\lambda_m} \cos\left(\frac{2\pi n}{N} - \theta_m\right) \quad (1)$$

所以归一化方向图函数为:  $F_m(\theta) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi R}{\lambda_m} [\cos\left(\frac{2\pi n}{N} - \theta_m\right) - \cos(\theta)]} \right|^2 \quad (2)$

显然, 当 $\theta = \theta_m$ 时,  $F_m(\theta) = 1$  取得最大值, 所以 $\theta_m$ 即为所需的波束指向。

从系统构成来看, 多波束形成就是通过对N根天线的输出信号进行不同的加权处理, 得到M个不同指向的窄波束, 所使用的复加权系数为:

$$W_{nm} = e^{-j\varphi_{nm}} = e^{-j\frac{2\pi R}{\lambda_m} \cos\left(\frac{2\pi n}{N} - \theta_m\right)} \quad (3)$$

改变复加权系数, 可以在 $360^\circ$ 范围内形成任意方向的波束。

复加权可以简单地用模拟移相器来实现, 对第n根天线的移相值为 $\Phi_m$ 。但是如果使用模拟移相器, 相控阵天线所需的移相器数目为 $M \times N$ 个, 系统成本以及实现的复杂度可想而知。实际上采用数字波束形成(DBF)的实现方法, 只需要在处理器上完成如式(4)所示的矩阵运算即可。

$$\begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{(M-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \cdots & x_{(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{00} & W_{01} & \cdots & W_{0(M-1)} \\ W_{10} & W_{11} & \cdots & W_{1(M-1)} \\ W_{20} & W_{21} & \cdots & W_{2(M-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{(N-1)0} & W_{(N-1)1} & \cdots & W_{(N-1)(M-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $[y_0 \ y_1 \ \dots \ y_{(M-1)}]$  为合成输出的 M 个波束,  $[x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{(N-1)}]$  为 N 个复输入序列,  $W_m$  ( $m=0, 1, \dots, M-1; n=0, 1, \dots, N-1$ ) 为复加权系数。采用多片 DSP 并行运算来实现上述矩阵运算, 每片 DSP 负责计算一个波束, 这时每片 DSP 相当于按式 (5) 进行计算:

$$[y_m] = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{(N-1)}] [W_{0m} \ W_{1m} \ W_{2m} \ \dots \ W_{(N-1)m}]^T \quad (5)$$

这样在一个采样周期内只需完成 N 次复乘, 相当于 4N 次实乘。设采样频率为  $f_s=1\text{MHz}$ ,  $N=32$  时, 计算量为 128MIPS, 一般的 DSP 就能满足此要求。所以在采样率不是很高的情况下, 是完全可以用多片 DSP 并行运算来实现多点波束的控制。

### 三、模拟结果

我们采用圆形阵列, 阵元数  $N=16$ , 圆阵半径  $R=0.5\lambda_m$ ,  $\theta_m$  分别取  $0^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $-120^\circ$ , 由计算机模拟计算得到有三个不同波束指向的天线方向图如图 2 所示。因此根据所需的某个波束指向  $\theta_m$ , 可得到相应的 N 个复加权矢量  $W_{nm}$ , 对输入信号加权便可得到不同指向的波束。

如果取圆形阵半径  $R=0.5\lambda_m$ ,  $\theta_m=180^\circ$ , 改变 N 的大小, 保持其它参数不变, 模拟所得的波束方向图如图 3 所示。由图 3 可知, 随着 N 变化, 主瓣基本不变; 但随着 N 的增加, 旁瓣可以得到一定程度的抑制。但 N 大于 16 后, 进一步增大 N, 旁瓣基本不变。因此在旁瓣减小到正常值的情况下, 为了减小天线阵元的复杂度, N 取 16。

如果取阵元数  $N=16$ ,  $\theta_m=0^\circ$  保持其它参数不变, 仅改变 R 的值, 模拟所得的波束方向图如图 4 所示。由图 4 分析可知, 随着 R 增大, 波束宽度将变窄, 但是旁瓣有所增加。

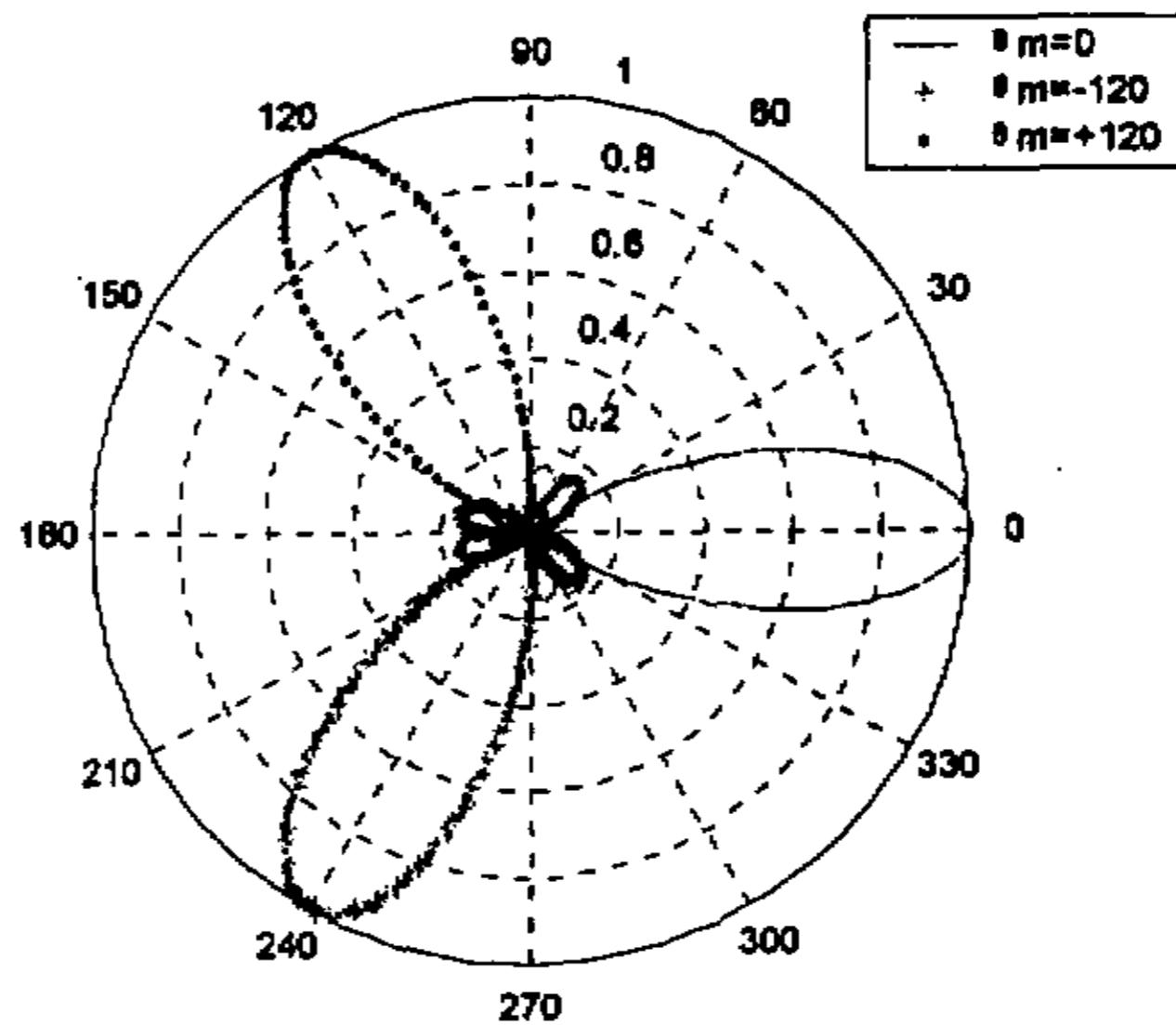


图 2  $\theta_m$  分别取  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $-120^\circ$  时所得的方向图

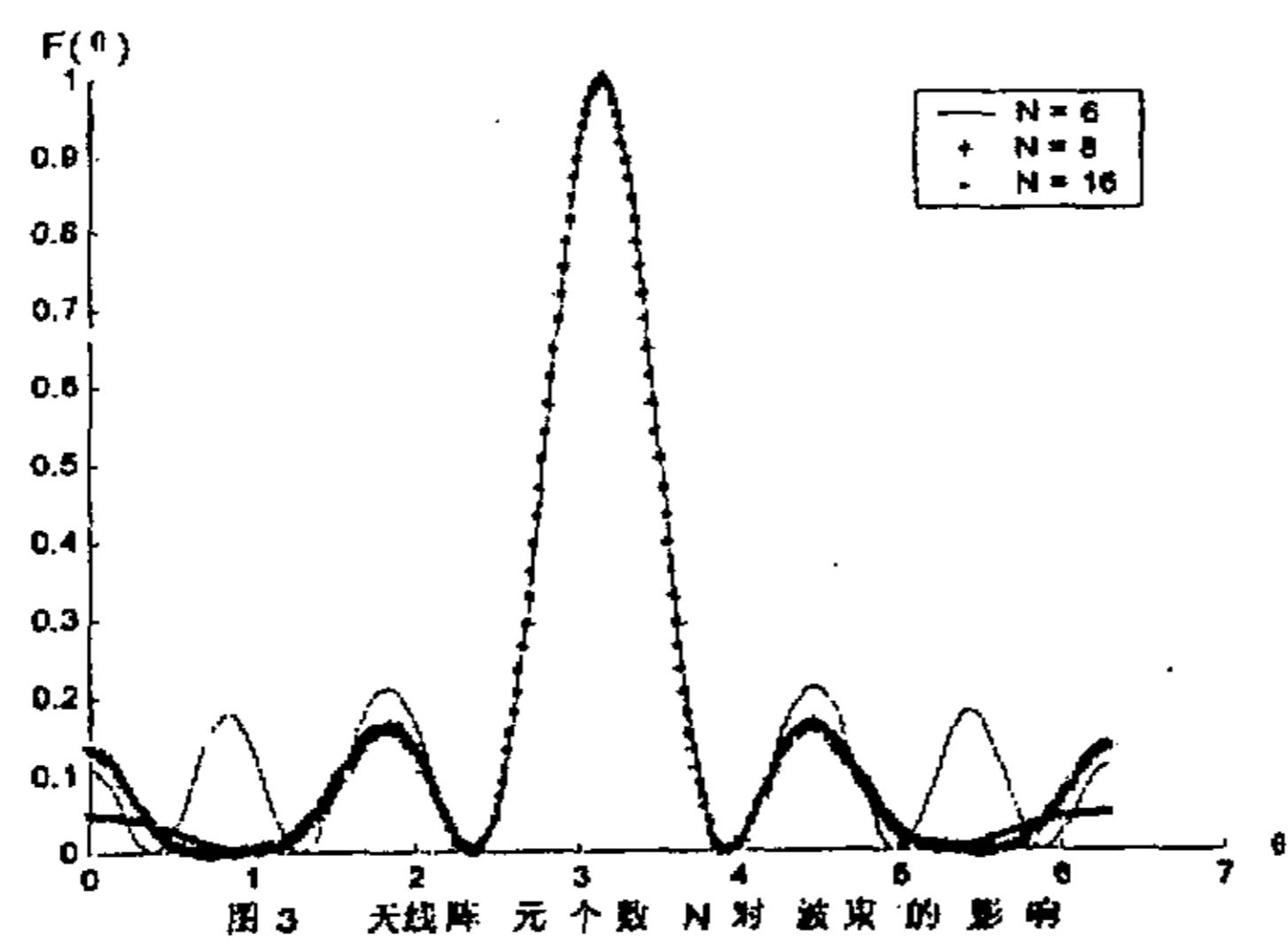


图3 天线阵元个数N对波束的影响

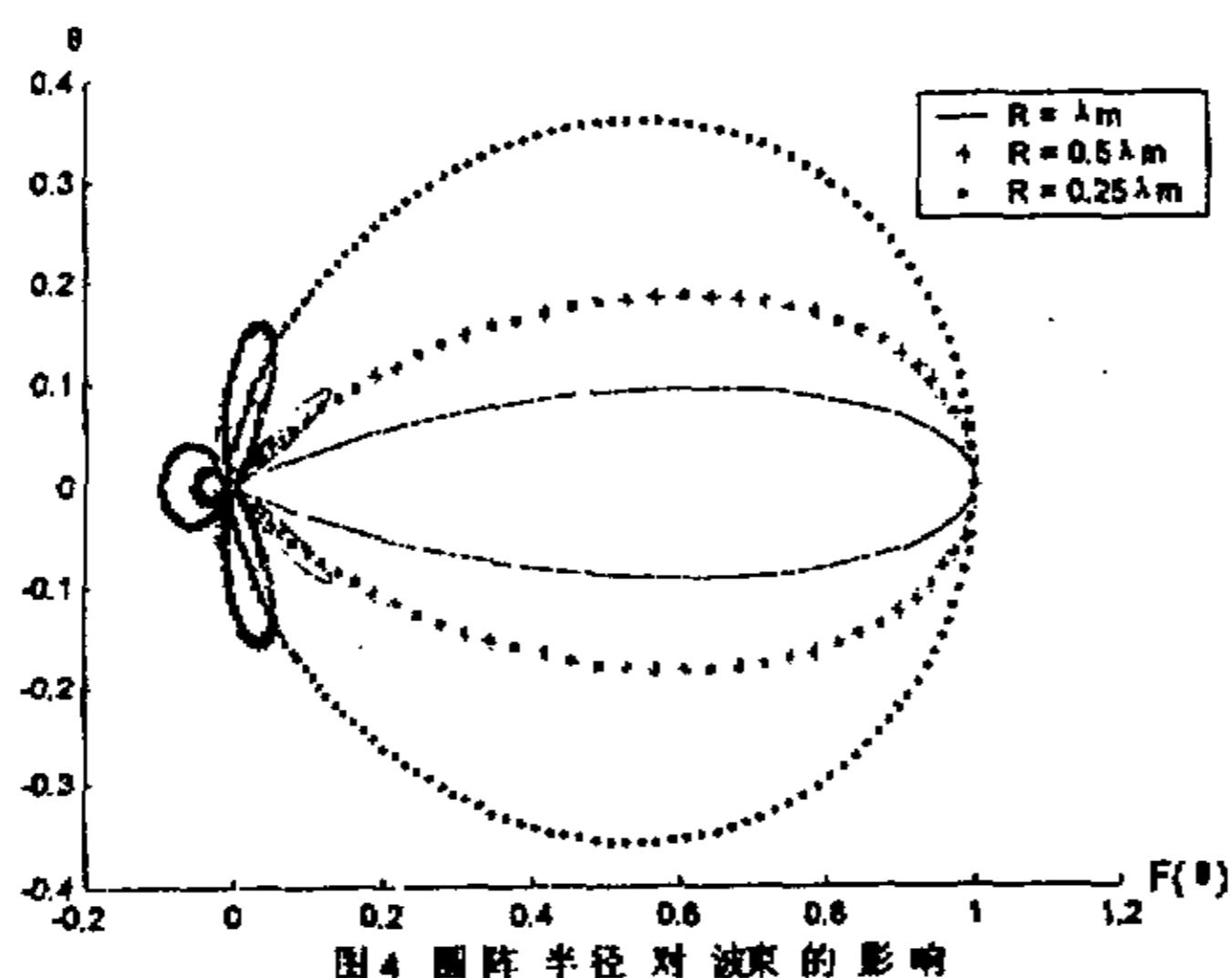


图4 围阵半径对波束的影响

### 参考文献:

1. T. Kitsuregawa, Advanced Technology in Satellite Communication Antennas, Boston:Artech, 1990, pp. 177-188, sec. 2.6: "steerable beam antenna"
2. Ming-yi & kai Chang, "Novel low-cost beam-steering Techniques using in microstrip patch antenna arrays fed by Dielectric Image lines", IEEE-F AP, 1999, NO. 3, PP. 453-457

## 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>