

一种高效率五焦点抛物反射面天线的设计

周兰兰 李正军

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要 文章介绍了一种基本抛物面轴向 δ_i 指向 -20° 、 -10° 、 0° 、 $+10^\circ$ 和 $+20^\circ$ 的五焦点抛物反射面天线的设计, 波束指向分别为 -17.2° 、 -8.67° 、 0° 、 8.67° 、 17.2° 。通过优化基本反射面的加权系数进行反射面的赋形, 使每个波束的增益趋于均匀。对于标准偏置偏焦抛物面天线, 波束指向 $\pm 17.2^\circ$ 、 $\pm 8.67^\circ$ 和 0° 时的增益分别为 34.87dBi 、 38.67dBi 和 40.15dBi , 边缘波束与中心波束的增益差值分别为 5.28dBi 和 1.48dBi 。用文中提出的方法得出对应波束的增益分别为 36.10dBi 、 38.48dBi 和 39.14dBi , 边缘波束与中心波束的增益差为 3.03dBi 和 0.66dBi , 与标准抛物面相比减小了 2.24dBi 和 0.82dBi 。

关键词 五焦点 反射面天线 赋形反射面 优化

0 引言

为了满足卫星不断增加的通信容量需求, 以及减少通信卫星用户费用, 通信卫星设计者采取了诸多措施。多波束天线(Multiple Beam Antenna)由于能够以高增益来覆盖较大的地面区域, 而且又能根据需要调整波束形状, 因而受到了各国的广泛重视^[1]。

对于成形反射面的设计, 早在 1975 年, 日本学者就提出了一种成形反射面的设计方法, 即波前分析方法; 随后, 北美和欧洲的研究人员在此基础上, 根据几何光学(GO)、物理光学(PO)、几何绕射理论(GTD)和物理绕射理论(PTD)等方法, 提出了成形反射面的直接和间接综合方法; 国内少有涉及这方面的研究。直接方法的优化对象是反射面本身的形状, 用各种函数展开式表示反射面, 通过优化函数的系数进行反射面综合。间接方法的优化对象是成形反射面天线的一些特性参数, 如波前、口面场分布等, 通过优化这些参数来满足赋形要求, 进而确定

反射面的形状^[2,3]。

综合国内外的多波束天线设计方法可知, 要设计单反射面的高增益多波束天线, 有两种基本的方法: 一种是圆环反射面天线, 另一种是多焦点抛物反射面天线^[4]。前者在不同的波束方向产生相同相位, 但是它的孔径效率很低。后者有较高的孔径效率, 但是孔径效率随着焦点数目的增加而下降, 因为焦点排列的设计灵活性有限。多焦点抛物面天线的设计方法可以用一个简单的结构进行宽角扫描。这种设计方法通过控制焦点的位置来决定天线的方向图和天线结构。文章综合了阵馈抛物反射面天线和单馈成形反射面天线的优点, 以国外学者关于多焦点抛物反射面天线的设计思想为依据, 通过使用反射面天线的成形设计方法, 设计了一种高效率的五焦点抛物反射面天线, 使覆盖区内每个波束满足波束宽度和低旁瓣的要求。

1 设计思想

对于一个多焦点反射面天线, 它由两个或更多的抛物面的加权平均值组成, 每个抛物面称为一个基本的抛物面。这些基本抛物面均相切于 M_0 点,

收稿日期: 2008-12-31; 修回日期: 2009-02-25

每个基本抛物面的轴向不同。这里考虑的抛物面是由抛物线旋转得来,这些抛物线在球坐标系中的 y 坐标恒定不变,即 $y = y_c$ 。现在考虑焦点的长度,若选择焦点长度相同,如图1所示(以三焦点的为例),其中 f 为焦距, $F_1 \sim F_3$ 为3个焦点, $\rho_1 \sim \rho_3$ 为在 M_0 点处的曲率半径, $Z_1 \sim Z_3$ 为3个基本抛物面, Z 为三焦点抛物面。由于焦点的长度被限制在这个相同的值上,远离抛物面顶点部份的曲率半径比抛物面顶点处的曲率半径要好,因为曲率半径的表达式是 $2f[1 + (x/2f)^2]^{1/2}$,其中 f 是焦点的长度。因为使用了具有不同曲率的曲线,很难在各不同波束方向获得高效率,而且反射面质量会随着孔径尺寸或焦距增加而下降,使天线增益下降,旁瓣电平升高。

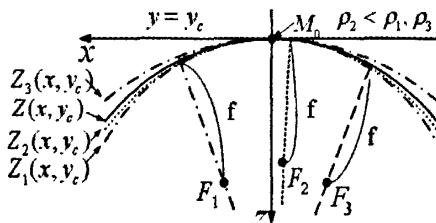


图1 三焦点抛物反射面

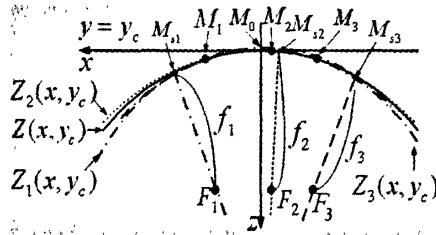


图2 修正的三焦点抛物反射面

要改善反射面的性能(或是设计准确性),基本抛物面的焦距必须随着抛物面的轴向改变。另外,当孔径尺寸增大时,引起孔径效率恶化的另一个因素是交点受点(M_0)的限制。因此,用两个设计方法来提高孔径效率:每个基本抛物面有它自己的焦点长度;每个基本抛物面的交点可以不止一个。图2是修正三焦点抛物反射面的一个交叉区段($y = y_c$),它表示了修正多焦点抛物反射面的设计思想。其中 f_1, f_2, f_3 为焦距, F_1, F_2, F_3 为3个焦点,分布在距坐标原点 f 且平行于 z 轴的直线上, M_1, M_2, M_3 为交点, M_{11}, M_{21}, M_{31} 为基本抛物面与环形表面的交点,

这些参数的确定均与基本抛物面对称轴的方向有关, Z_1, Z_2, Z_3 为3个基本抛物面,为修正的三焦点抛物反射面。

这种反射面天线的设计步骤如下:

(1)用一个焦距为 f_0 的环形表面来近似要设计的反射面。

(2)参照抛物面对称轴的方向 δ_i 来定义基本抛物面的焦距(k_1 取0.5)。

$$f_i = f_0 + k_1(f_0 \cos \delta_i - f_0) \quad (1)$$

(3)定义交点($M_0(0, y_c)$ 和 $M_i(i=1, 2, 3)$) y 分量的值 y_c 。通过点 $M_0(0, y_c)$ 和 $M_{ii}(M_{ii}, y_c)$ 的定比来定义点 M_i 的坐标。

$$M_{ii} = (2f_0 - y_c^2/4f_0) \sin \delta_i \quad (2)$$

$$M_i = (1 - k_2)M_0 + k_2M_{ii} \quad (3)$$

其中, k_2 取0.5,点 M_{ii} 的值由抛物面的几何关系得到。这样就可以清楚地定义基本抛物面的位置了。

$$Z_i(x, y) = (x_i^2 + y_i^2)/4f_i \quad (4)$$

上式是在各基本抛物面坐标系下的表达式,要通过坐标轴的平移旋转把它们转化到参考坐标系(x, y, z)下才能进行加权求修正多焦点抛物反射面的表达式。

焦点的坐标为($F_{ii}, 0, f$),其中

$$F_{ii} = M_{ii} - f_i * \sin \delta_i \quad (5)$$

(4)被修正的多焦点抛物反射面 $Z(x, y)$ 由这些基本抛物面 $Z_i(x, y)$ 加权得到。

$$Z(x, y) = \sum \omega_i Z_i(x, y) / \sum \omega_i \quad (6)$$

其中 ω_i 是加权系数。

得出抛物反射面的数学表达式后,通过选择初始加权系数 ω_i ,分析天线的辐射方向图,找到增益最小的波束,设定为优化目标。基本抛物面的加权系数 ω_i 为优化变量,优化变量系数,使优化目标数值得到提高,最终达到覆盖区内波束增益起伏较小。波束增益趋于均匀时的优化变量系数作为最佳系数,将这一系数代入反射面的表面方程得到多焦点抛物反射面的表达式,最后用Grasp仿真该反射面天线的方向图,验证设计的正确性。

2 五焦点抛物反射面天线的设计仿真

在设计五焦点抛物反射面天线时,取天线口径

(矩形口径) $D = 210\text{mm} \times 297\text{mm}$; 频率为 40GHz, 偿源的边缘照射电平取 -15dB 。原始模型采用的抛物面参数为: 焦距 $f = 260\text{mm}$, 偏置量 $D' = 70\text{mm}$, 计算出其偏置角 $\theta_f = 37.2001318^\circ$, 半张角 $\theta^* = 20.6339515^\circ$ 。

5 个基本抛物面采用的参数为: $f_0 = 258\text{mm}$, $y_c = 0\text{mm}$, 轴向角分别为 $\delta_1 = -20^\circ$, $\delta_2 = -10^\circ$, $\delta_3 = 0^\circ$, $\delta_4 = 10^\circ$ 和 $\delta_5 = 20^\circ$ 。由公式(1)~(5)求得它们的焦距分别为 $f_1 = f_5 = 250.220348\text{mm}$, $f_2 = f_4 = 256.0402\text{mm}$ 和 $f_3 = 258\text{mm}$ 。基本抛物面与环形抛物面的交点坐标分别为 $M_{ix} = M_{oy} = M_{iy} = y_c = 0\text{mm}$, $M_{sx} = -176.482394\text{mm}$, $M_{dx} = -89.60246\text{mm}$, $M_{ox} = 0$, $M_{ay} = 89.60246\text{mm}$, $M_{sy} = 176.482394\text{mm}$ 。5 个焦点的 X 向分量分别为 90.90mm , 45.14mm , 0mm , -45.14mm , -90.90mm 。

经过坐标转换关系得到了 5 个基本抛物面在标准坐标系下的表达式, 加权后得到五焦点反射面天线的表面方程。为了改善最大扫描角时的辐射特性, 反射面的边缘依照 20° 扫描时的孔径相位等高线分布来确定, 将初始加权系数 ω_i 定义为:

$$\omega_i = 1 - k_3 \{1 - (\delta_i/20^\circ)^2\} \quad (7)$$

其中 k_3 为 0.5。

使用 Matlab 得出反射面的表面图形和坐标点, 选取了 2414 个离散点来描述表面形状, 用于 Grasp 仿真中表面形状的输入。

用 Grasp 分别对 5 个偿源进行仿真, 仿真时, 将其偿源激励系数(幅度和相位系数)设为 1, 其他偿源的激励系数均设为 0。得到其辐射方向图分别如图 3~图 7 所示。

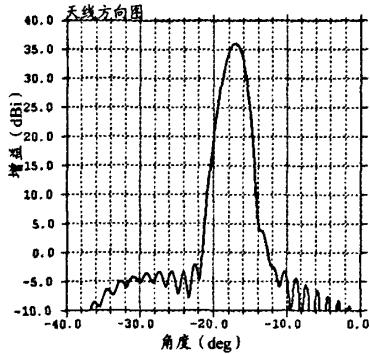


图 3 第一个偿源对应的方向图

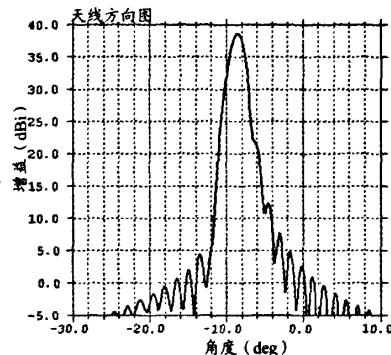


图 4 第二个偿源对应的方向图

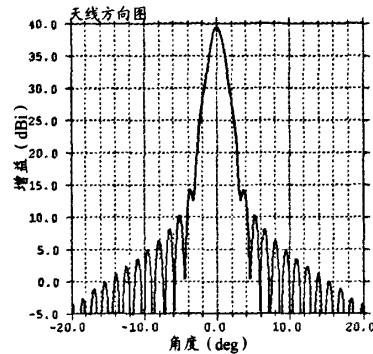


图 5 第三个偿源对应的方向图

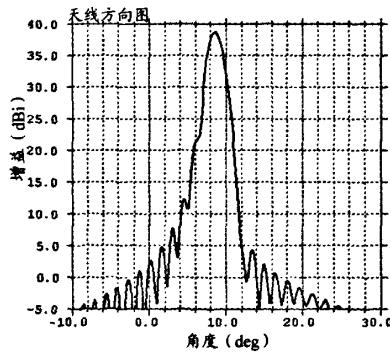


图 6 第四个偿源对应的方向图

对于抛物面轴向 δ_i 分别为 $\pm 20^\circ$ 的两个基本抛物面, 由于偿源的位置与 Z 轴对称, 反射面的形状也是与原点对称的, 所以, 偿源作用于反射面后的方向图也是对称的。天线的增益、旁瓣和 3dB 波束宽度相同, 增益为 36.01dBi , 旁瓣为 3.78dBi , 归一化旁瓣为 -32.23dB , 3dB 波束宽度为 2.27° , 波束指向为 $\pm 17.2^\circ$ 。同理, 抛物面轴向 δ_i 分别为 $\pm 10^\circ$ 的两个基本

抛物面,馈源作用于反射面后的方向图也是对称的:增益为38.57dBi,旁瓣为12.34dBi,归一化旁瓣为-26.23dB,3dB波束宽度为1.84°,波束指向为±8.67°。中间馈源作用于反射面后的增益为39.43dBi,旁瓣为14.24dBi,归一化旁瓣为-25.19dB,3dB波束宽度为1.78°,波束指向为0°。波束指向±17.2°的波束与中心波束相比,波束展宽了,增益相差3.42dBi,波束指向±8.67°的波束与中心波束相比增益相差0.86dB。将 $\delta = \pm 20^\circ$ 的两个基本抛物面的增益设定为优化目标,其对应的加权系数为优化变量,将加权系数增大,通过提高边缘波束的增益和降低中心波束的增益来减小各波束的增益差值。

初始选定的加权系数由公式(7)得出,通过不断的优化、仿真验证,最后得到当加权系数为 $\omega = [1.15, 0.7, 0.05, 0.7, 1.15]$ 时,天线各波束的方向图最理想,分别如图8~图10所示(第四、五个波束的方向图与第二、三个波束的方向图对称,这里不再给出)。

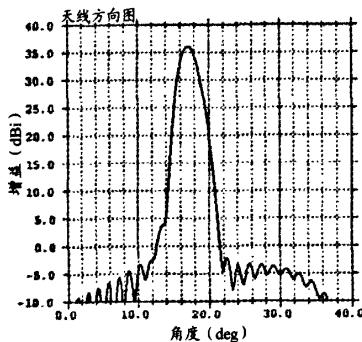


图7 第五个馈源对应的方向图

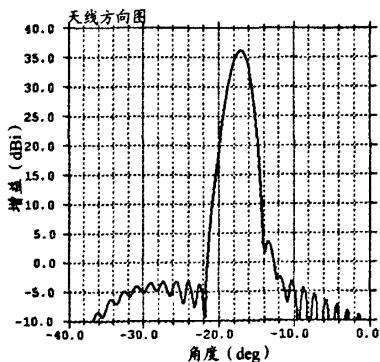


图8 优化系数后第一个波束的方向图

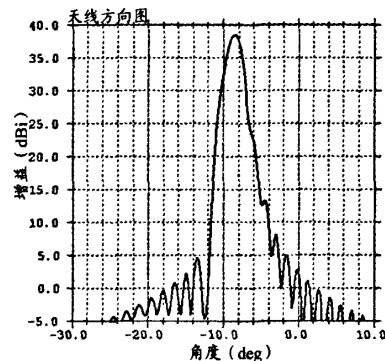


图9 优化系数后第二个波束的方向图

优化系数后,波束指向为±17.2°的波束增益为36.10dB,旁瓣为3.40dB,归一化旁瓣为-32.70dB,3dB波束宽度为2.27°;波束指向为±8.67°的波束增益为38.48dB,旁瓣为13.2dB,归一化旁瓣为-25.37dB,3dB波束宽度为1.84°;波束指向为0°的波束增益为39.14dB,旁瓣为15.57dB,归一化旁瓣为-23.57dB,3dB波束宽度为1.84°。波束指向为±17.2°的波束与中心波束相比增益差为3.04dB,波束指向为±8.67°的波束与中心波束相比增益相差0.66dB。

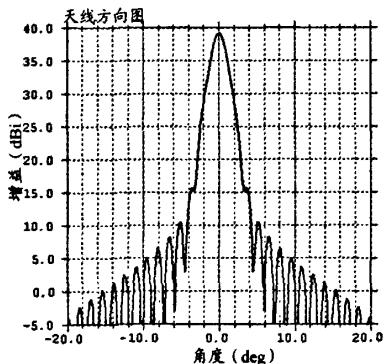


图10 优化系数后第三个波束的方向图

对于单反射面天线,馈源横向偏焦使其二次方向图最大指向发生偏离。对其他辐射特性产生影响的规律为:增益随波束扫描角增大而下降;波瓣随扫描角增大而变宽;波束偏离使偏离一侧的旁瓣电平抬高(Coma瓣),第一旁瓣常包容于主瓣之中,引起波瓣不对称展宽。而在波束偏离对侧旁瓣电平有所降低,扫描过程中随着馈源横偏的增加,泄漏损失也会增加。仿真标准偏置抛物反射面天线馈源偏焦时

的天线方向图,画出其增益与归一化旁瓣随馈源坐标 x_f 的变化图(间距是 8mm),并将文中修正五焦点

抛物反射面天线中的增益和归一化旁瓣值画在同一个图中,得出它们的结果对比图如图 11 所示。

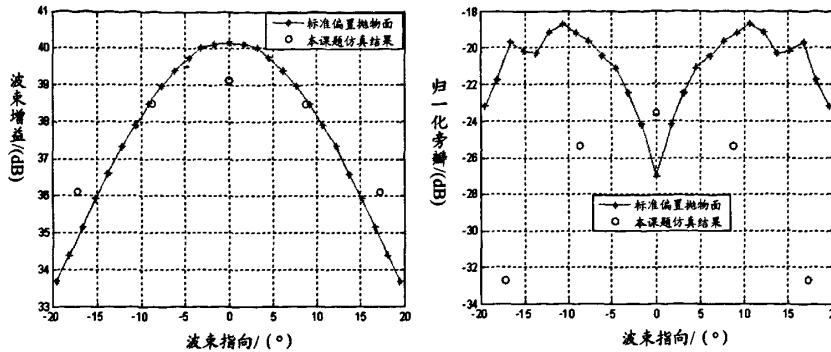


图 11 五焦点反射面与标准偏置抛物面偏焦时的比较结果图

由图可知,对于标准偏置抛物面天线,波束指向为 $\pm 17.2^\circ$ 、 $\pm 8.67^\circ$ 和 0° 时的增益分别为 34.87dBi、38.67dBi 和 40.15dBi,归一化旁瓣分别为 -22.13dB、-19.39dB 和 -27.00dB,边缘波束与中心波束的增益差分别为 5.28dBi 和 1.48dBi。由上文可知,用文章中所提出的方法得出的对应波束的增益分别为 36.10dBi、38.48dBi 和 39.14dBi,归一化旁瓣分别为 -32.70dB、-25.37dB 和 -23.57dB,边缘波束与中心波束的增益差为 3.04dBi 和 0.66dBi,与标准抛物面的相比增益差减小了 2.24dBi 和 0.82dBi。边缘波束的增益比相同指向的标准抛物面的增益要高, $\pm 17.2^\circ$ 波束的增益与标准抛物面相比提高了 1.23dBi,但中心波束的增益要比标准抛物面的低,利用降低中心波束的增益来提高边缘波束的增益。中心波束的归一化旁瓣与标准抛物面的相比高 3.43dB,而边缘波束的归一化旁瓣远比相应的标准抛物面的小,且两者的归一化旁瓣均在 -20dB 以下,达到了低旁瓣的要求。

3 结论

文章以偏置单反射面天线为研究对象,设计了一种高效率的五焦点反射面天线,通过优化加权系数来实现反射面的赋形,得到高增益、低旁瓣的多波

束天线。仿真结果及与标准偏置抛物面偏焦的对比结果表明优化工作提高了边缘波束的增益,降低了其边缘波束的旁瓣电平,增强了扫描过程中反射面天线的聚束能力,提高了天线的效率。

参考文献

- [1] 胡红芬,白晓红.多波束天线的应用及发展[J].现代雷达,2002,24(4):69~75
- [2] 夏文,王华芝.星载成形反射面天线的设计方法[J].电讯快报,1998(6):6~8
- [3] 夏文,王华芝,马文华.卫星成形反射面天线波束赋形的研究[J].中国空间科学技术,1999(2):21~26
- [4] Kira F, Honma N, Cho K, et al. Modified multi-focal paraboloid design for high aperture efficiency multibeam reflector antenna [C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1: 662 ~ 665, 2002

作者简介

周兰兰 1983 年生,中国空间技术研究院西安分院在学研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术的地球站与卫星天线。

李正军 1964 年生,研究员。主要研究方向为电磁场与微波技术的地球站与卫星天线。

(下转第 89 页)

社,2003

- [3] Suh S Y . A comprehensive investigation of new planar wideband antennas. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2002
- [4] 杨鸿生,谢凤玲,钱志方,曹爱军. 同轴探针激励圆波导输入阻抗的研究[J]. 微波学报. 2004(01)

作者简介

李栋 1983年生,2006年毕业于西北工业大学电子信息学院,现于北京航空航天大学电子信息工程学院攻读硕士研究生。研究方向为天线及微波器件的设计等。

全绍辉 1971年生,北京航空航天大学电子信息工程学院副教授,博士。研究方向:微波测量理论和技术、天线理论和工程、电波传播和散射。

Design of a Balanced Feeding Dual-Polarized Feed Operating in 3GHz~4GHz for CATR

Li Dong Quan Shaohui

(College of Electronic Information Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract This paper presents the design of dual-polarized feed used in Compact Antenna Test Range (CATR). Four-slot corrugated horn is selected as the radiation part, while the feeding part uses balanced feeding technology to realize dual-polarization of the feed. In addition, a new probe structure is proposed to improve the impedance matching and cross-polarization characteristics. Measurements of the feed with 180 degree hybrid are also conducted. Promising performances are obtained, including consistent radiation patterns, low amplitude and phase taper in the quiet zone, low cross-polarization level, low side and back lobe. It could be used as high performance feed in the test circumstance of high demand.

Key words Balanced feed CATR Dual-polarization Corrugated horn

(上接第75页)

Five-focal Paraboloid Design for High Efficiency Reflector Antenna

Zhou Lanlan Li Zhengjun

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract A five-focal paraboloid reflector antenna with the orientation of the paraboloid axes δ_i of each fundamental paraboloid are $-20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, +10^\circ, +20^\circ$ is designed. The beams direction at $-17.2^\circ, -8.67^\circ, 0^\circ, 8.67^\circ, 17.2^\circ$. By optimizing the weighting coefficients of the fundamental paraboloids, the gain of each beam of the shaped reflector are nearly equal. From the results of simulation for standard offset parabolic reflector antenna, the gain of beams at $\pm 17.2^\circ, \pm 8.67^\circ$ and 0° are 34.87dBi, 38.67dBi and 40.15dBi. The gain differences between edge beams and focus beam are 5.28dBi and 1.48dBi. From the results of simulation for five-focal paraboloid reflector antenna, the gain are 36.10dBi for beams at $\pm 17.2^\circ, 38.48$ dBi beams at $\pm 8.67^\circ$ and 39.14dBi beam at 0° . The gain differences are 3.04dBi and 0.66dBi, which are 2.24dBi and 0.82dBi smaller than that of standard parabolic.

Key words Five-focal Reflector antenna Shaped reflector Optimize

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)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)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)，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>