

星载多波束相控阵天线设计与综合优化技术研究*

尚 勇^{1,2}, 梁 广^{1,2}, 余金培^{1,2}, 龚文斌²

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

2 上海微小卫星工程中心 上海 200050)

摘要:针对采用CDMA协议的低轨通信卫星,设计一个19阵元7波束的六边形平面阵天线,克服了卫星波束大角度扫描带来的“边缘问题”和“远近效应”。采用粒子群优化算法分别对正六边形天线阵列进行综合优化,优化过程采用基于空间分裂的优化策略,极大地简化了波束赋形的参量数目。数值仿真结果表明,方向图各项指标均符合设计要求,有效地验证了天线设计和算法的正确性。

关键词:多波束天线; 天线综合; 粒子群算法(PSO)

中图分类号: TN821.8

文献标识码:A

文章编号:CN11-1780(2012)04-0037-05

引 言

低轨卫星通信具有不同于其它轨道卫星通信的特点,如传输距离短、传输损耗和时延较小、地球覆盖张角较大等^[1],因此需要特定覆盖形状的天线方向图,特别需要注意由于大的覆盖张角所引起的“边缘问题”和“远近效应”。采用一般的线阵或平面阵单波束天线很难解决上述问题,因此需要采用多波束技术。星载多波束天线技术是低轨卫星通信系统的关键技术之一,对于我国低轨卫星星座系统的建设也具有非常重要的意义。

本文首先根据低轨卫星通信的需求和特点,分析理想方向图的要求。针对卫星波束大角度扫描所带来的“边缘问题”和“远近效应”,本文提出并设计一种7波束空间覆盖方案,用天线产生的波束增益来补偿卫星到地面的传输损耗差异,天线模型采用19阵元三角形栅格排列的正六边形阵^[2,3]。为了得到满足系统要求的天线方向图,通常采用切比雪夫、泰勒、伍德福德等经典的线性天线综合方法,但是这些方法已经很难解决六边形天线阵的综合优化问题。近年来,智能算法因其简单高效的特点,在解决大规模非线性优化问题方面得到了大量应用,本文采用粒子群优化算法对上述天线阵进行综合优化。优化过程采用基于空间分裂的优化策略,极大地简化了波束赋形的参量数目。数值仿真结果表明,方向图各项指标均符合设计要求,有效地验证了天线设计和算法的正确性。

1 多波束相控阵天线设计

1.1 理想方向图分析

对于低地球轨道卫星,由于波束扫描角很大,因此星下各扫描方向的路径传输损耗差很大。星地通信环路信道环境主要为莱斯信道^[4],路径损耗主要为自由空间路径损耗,且路径损耗随扫描角 θ 的增大而增大。假设卫星高度为900km,可以得到图1所示的天线扫描角度与附加路径损耗的关系曲线。

本文涉及的相控阵天线最大扫描角度达55°,从图1可以看出波束边缘点和星下点的路径传输损耗差约6.5dB。这些传输损耗差异会给卫星通信链路带来较强的“边缘问题”和“远近效应”,给卫星有效载荷功率控制增加了很大的难度。为了降低载荷设计的复杂度,提高系统容量,要求天线产生的波束增益必须能够补偿从卫星到地面的传输损耗差异,实现在地球表面“等通量”覆盖。此点采用传统天线难以实

* 基金项目:中科院创新基金项目(No. CXJJ-11-S107);上海市自然科学基金(No. 11ZR1435000)

收稿日期:2012-01-11 收修改稿日期:2012-02-27

现,只能考虑采用多波束天线来实现。此外,若卫星天线采用多波束覆盖,对系统其它性能也有重要作用,如实现频率复用、增加容量、提高EIRP(等效全向辐射功率)等^[5]。

1.2 多波束空间规划

为解决低轨卫星大角度扫描所带来的“边缘问题”和“远近效应”问题,对波束空间进行如图2所示的空间分裂规划,将天线整个覆盖区域分为7个波束、两层空间覆盖。内层为中心波束(波束1),要求主瓣半功率宽度-25°~25°,增益≥10dB,旁瓣水平≤-10dB。外层分为6个波束,按照中心60°对称依次排列。以波束2为例,波束要求为半功率宽度25°~55°,主瓣增益≥12dB,旁瓣水平≤-10dB。

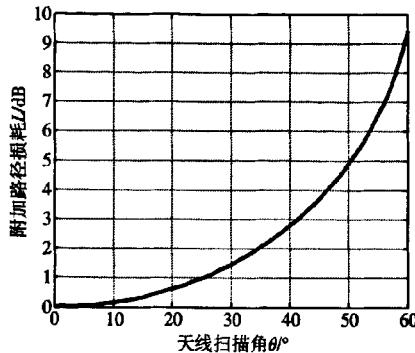


图1 扫描角度与附加路径损耗的关系曲线

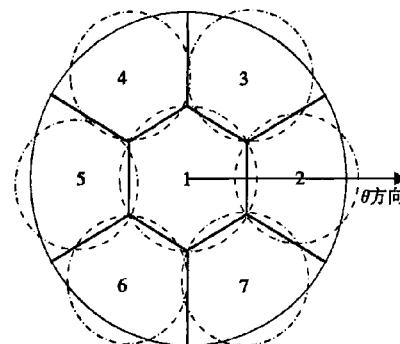


图2 天线多波束空间规划示意图(θ方向)

1.3 天线阵设计与模型分析

天线综合技术一般包含天线选型、天线基本单元设计、阵列天线单元分布和阵列单元幅相参数的确定等。图3为实际设计的多波束平面阵天线模型,19个阵元按照三角形栅格排列方式依次排列成一个正六边形。文献[6]中有证明,对于大型相控阵天线来说,在大致相同的辐射特性下,这种组合排列方式可比正方形栅格排列节省辐射元器件约13.3%。

阵列的辐射特性由阵元的辐射特性和阵因子的辐射特性共同决定。因此设计阵列天线时,首先要对辐射单元进行设计和优化。由于卫星重量与安装面受限,本文采用双馈点微带天线。微带天线由于体积小、重量轻、成本低、结构简单、可靠性高、易与飞行器表面共形等特点,更适合在卫星上使用,而且微带天线较易满足圆极化性能要求。

对阵列天线理想辐射方向图进行建模,以天线辐射中心为坐标原点建立坐标系,x、y分别代表阵元的x轴和y轴坐标,I、α分别代表阵元的幅度和相位。如图3所示,设第*i*个天线单元坐标为(x_{*i*},y_{*i*}),其幅度、相位激励权重因子为I_{*i*}·exp(α_{*i*}),则阵列天线方向图函数为

$$S(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N I_i \exp[jk \sin \theta (x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) + j\alpha_i] \cdot F_e(\theta, \varphi) \quad (1)$$

其中,N是天线单元总数,k=2π/λ,λ为工作波长,S(θ,φ)是阵因子方向图函数,F_e(θ,φ)是拟合后的阵元方向图函数,a₁~a₆为拟合系数,有

$$F_e(\theta, \varphi) = a_1 \cdot \theta^5 + a_2 \cdot \theta^4 + a_3 \cdot \theta^3 + a_4 \cdot \theta^2 + a_5 \cdot \theta + a_6 \quad (2)$$

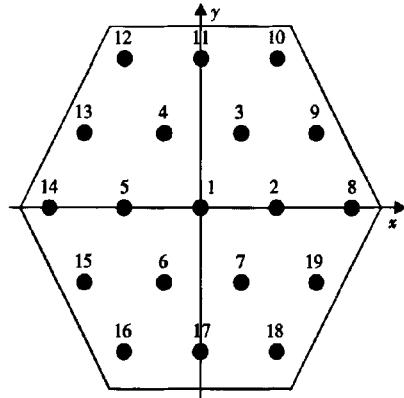


图3 六边形平面阵列天线模型

拟合后的天线阵元X-Z平面方向图

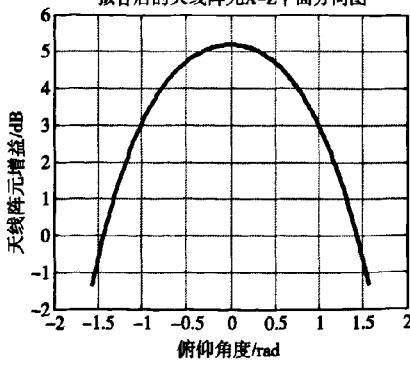


图4 天线单元切面拟合方向图

图4为式(2)所描述的阵元方向图曲线。整个六边形阵方向性系数 D 可用式(3)求得^[6]。

$$D = \frac{|S(\theta, \varphi)|^2}{\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} |S(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (3)$$

2 基于粒子群优化算法的天线综合

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是一种基于群体的迭代式优化工具, 具有启发式的高效、并行、全局搜索能力。它的主要特点是:①粒子按照一个随机速度在整个解空间内运动;②所有粒子都有记忆功能;③粒子间既有合作, 也有竞争^[7,8]。

粒子群优化算法的核心是粒子群运动方程^[9]。

$$\nu(n) = \omega \cdot \nu(n-1) + c_1 \cdot \text{rand}(p_{\text{best}} - x(n-1)) + c_2 \cdot \text{rand}(g_{\text{best}} - x(n-1)) \quad (4)$$

$$x(n) = x(n-1) + \nu(n) \quad (5)$$

其中, ω 为惯性权重, c_1, c_2 为学习因子, $\text{rand}(\cdot)$ 为在 $[0, 1]$ 之间随机变化的函数, $\nu(n)$ 为粒子速度, $x(n)$ 为粒子位置, p_{best} 为粒子最佳位置, g_{best} 为粒子群最佳位置。粒子群运动方程的物理意义可用图5来解释, 图中三个空心箭头为实际矢量合成后速度。

星载相控阵接收天线波束形成的数学模型是这样^[10], 接入单元 7 个波束信号以矢量表示为 $(\vec{B}_1, \vec{B}_2, \dots, \vec{B}_7)$, 相控阵天线共有 19 个阵元, 每个阵元通道的信号矢量为 $(\vec{T}_1, \vec{T}_2, \dots, \vec{T}_{19})$, 波束形成部分的成形矩阵 $C_{7,19}$ 为

$$C_{7,19} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & c_{1,19} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{7,1} & c_{7,2} & \cdots & c_{7,19} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中, 矩阵元 $c_{i,j}$ 代表第 j 路射频通道中第 i 路波束信号的激励权重和延时, 也就是要综合得到的幅度、相位因子, 即 $I_j \cdot \exp(j\alpha_j)$, 则第 j 路阵元通道信号为

$$\vec{T}_j = \sum_{i=1}^7 \vec{B}_i \cdot c_{i,j} \quad (7)$$

可见, 要形成 7 个波束, 需要得到 7 个波束各 19 组(共 133 组)的幅度、相位权重因子。为了将粒子群算法应用到上述天线综合问题, 需要将每个波束 19 组幅度和相位作为基本的粒子进行实数编码, 结构为

$$x = [I_1, I_2, \dots, I_{19}, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{19}] \quad (8)$$

幅度取归一化值, 考虑到工程实际情况, 限制在 0.1~2 之间, 相位取 $[0, 2\pi]$ 。

适应度函数的设计是粒子群优化算法的关键之一。由于是多目标综合优化, 因此适应度函数设计为

$$\text{Fitness} = w_1 \cdot \sum_i^n (G - G_0)^2 + w_2 \cdot ((\theta_{\text{HPBW}} - \theta_{\text{HPBWdes}})/\pi)^2 + w_3 \cdot (SLL_{\max} - SLL_{\text{des}})^2 \quad (9)$$

其中, n 为方向图抽样点数, G 和 G_0 分别为主瓣实际增益和目标增益, θ_{HPBW} 和 θ_{HPBWdes} 分别是主瓣实际半功率宽度和目标宽度, SLL_{\max} 和 SLL_{des} 分别是实际最大旁瓣电平和目标旁瓣电平, w_i 为各目标权重系数, 满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

粒子群优化算法基本过程为:①对种群粒子进行编码, 初始化得到初始种群;②计算每个粒子的适应度值, 更新每个粒子的最佳位置 p_{best} , 更新全局最佳位置 g_{best} ;③分别根据式(4)、式(5)更新每个粒子速度和空间位置;④进行迭代停止条件判断。若为否, 则继续循环, 重复上面的粒子更新过程;若为是, 则退出循环过程, 得到最终的最优粒子群。

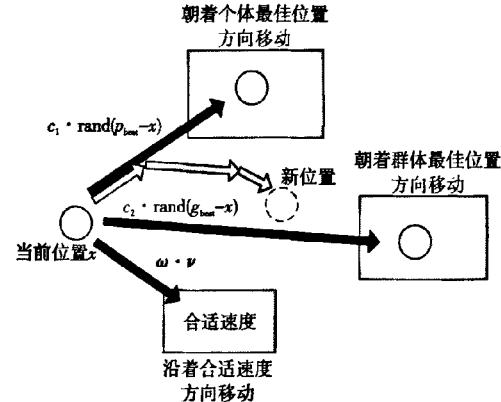


图 5 粒子群运动方程的物理意义

3 基于空间分裂的优化策略

基于空间分裂的优化策略即是利用波束和天线阵的对称性,对阵元空间进行分割,以达到减少综合优化参数、缩短算法时间的目的。如图2所示的整个空间波束覆盖方案,因为波束和天线具有一定的旋转对称性,从阵元空间来看,各射频通道的成形因子也满足一定的对称关系。

对于中心波束,根据对称性可以将19个阵元空间分割为4组,具体分组情况如表1所示。这样在对中心波束进行综合时,优化参数一下子从19组缩减到4组,算法复杂度大大降低,节省了大量的算法运行时间。

表1 中心波束阵元分组情况

分组情况	阵元编号					
第一组	1					
第二组	2	3	4	5	6	7
第三组	8	10	12	14	16	18
第四组	9	11	13	15	17	19

对于外层每个波束,也可以按照中心波束的分割策略分为12组,不过参数优化不是很明显,但是由于外层的6个波束关于中心60°对称,因此在对外层波束天线综合时,只需要对一个波束进行赋形即可,然后通过旋转映射,即可得到外层其它5个波束的幅相值,同样也大大减少了工作量。

当然采用上述阵元空间分裂策略,可能会带来粒子群算法粒子寻优空间缩小的问题。为了解决上述问题,可以对每个波束进行两次优化,首先采用空间分裂策略对各个波束进行综合优化,然后将得到的最优解作为下次综合优化的初始值,但是第二次综合优化过程不结合空间分裂策略,这样可以保证第二次综合优化能够在更短的时间内找到更优解。

4 综合优化结果

按照基于空间分裂策略的粒子群优化算法基本过程,首先对中心波束进行综合优化。阵元间距 $d = 0.545\lambda$, 工作频率 $f = 1.5\text{GHz}$, 种群数设定为40, 第一次进化代数为2000代, 第二次为500代。此外, 权重 ω 在每次迭代过程中都取[0,1]之间的随机数, 以便扩大全局搜索能力。 $c_1 = c_2 = 2$ 。得到如表2(a)所示的19个阵元的幅度和相位。

图6为表2中心波束19个阵元幅度和相位所对应的平面方向图。由图6可以看出, 主瓣增益12.97dB, 主瓣宽度 $-23^\circ \sim 24^\circ$, 旁瓣水平 $\leq -10\text{dB}$ 。

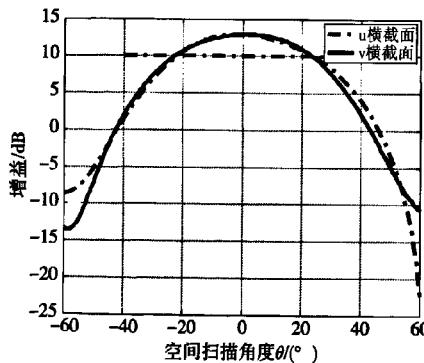


图6 粒子群优化算法中心波束剖面图

表2 19个阵元的幅度和相位

(a) 中心波束			(b) 外层波束2		
序号	幅度	相位(°)	序号	幅度	相位(°)
1	2.000	42.3	1	2.000	231.0
2	0.100	53.0	2	1.658	114.2
3	1.489	43.8	3	1.548	175.4
4	2.000	35.6	4	1.947	294.6
5	2.000	39.7	5	1.504	14.0
6	0.969	10.4	6	2.000	295.1
7	0.265	0	7	1.906	171.7
8	0.112	136.9	8	0.759	0
9	0.298	155.7	9	0.987	50.8
10	0.226	146.4	10	0.886	121.8
11	0.983	41.9	11	1.002	243.6
12	1.043	31.3	12	0.639	13.1
13	1.913	34.8	13	0.955	69.0
14	0.709	71.1	14	0.581	164.5
15	0.424	76.8	15	1.059	66.4
16	0.294	173.4	16	0.546	0
17	0.144	208.8	17	1.084	235.7
18	0.329	214.2	18	0.905	113.3
19	0.124	205.9	19	1.262	36.3

同理,对外层第一个波束(波束2)进行遗传算法综合,其它设置不变,得到表2(b)所示的19个阵元的幅度和相位,图7为波束2的平面方向图。由图7可以看出,主瓣最大增益14.92dB,主瓣宽度 $25^\circ \sim 60^\circ$,旁瓣水平 ≤ -10 dB。

按照中心 60° 对称关系,可以很容易得到外层其它5个波束对应的每个阵元的幅相值,最终得到图8所示的7个波束的综合方向图。图9为其X-Z平面方向图。

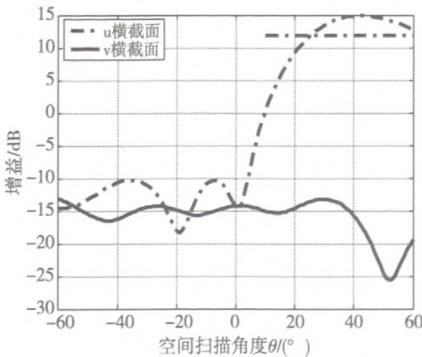


图7 波束2平面方向图与目标方向图

另外,考虑到工程实际情况,若表2中数据只取到小数点后1位有效数字,经计算,整个波束方向图平均增益值误差在 10^{-2} 数量级,中心波束主瓣最大增益升高了约0.07dB,外层波束主瓣最大增益下降了约0.02dB,可见对方向图的整体影响较小。

5 结论

采用多波束空间覆盖方案,以天线产生的波束增益来补偿卫星到地面的传输损耗差异,可以有效克服低轨卫星因波束大角度扫描所带来的“边缘问题”和“远近效应”问题。粒子群优化算法简单高效,收敛速度快,对于大规模复杂非线性优化问题非常适用。本文采用粒子群优化算法和空间分裂策略相结合的方式,对19阵元7波束的六边形相控阵天线进行综合优化,不但简化了综合优化的复杂度,而且仿真结果也都基本符合天线设计要求,有效地验证了天线设计和算法的正确性。

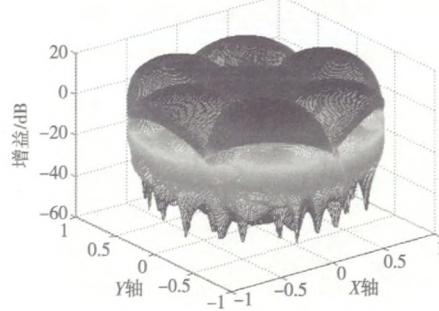


图8 7波束综合方向图

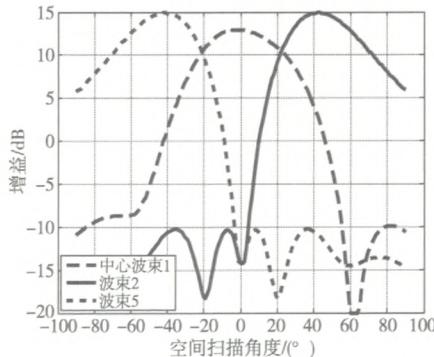


图9 7波束综合方向图X-Z平面方向图

参考文献

- [1] 余金培,杨根庆,梁旭文.现代小卫星技术与应用[M].上海:上海科学普及出版社,2004.
- [2] Liang Guang, Yu Jinpei et al. Development of 61-channel Digital Beamforming (DBF) Transmitter Array for Mobile Satellite Communication[J]. Progress In Electromagnetics Research (PIER), 97, 2009: 177~195.
- [3] Liang Guang, Yu Jinpei et al. A Semi-Physical Simulation System For DBF Transmitter Array on LEO Satellite[J]. Progress In Electromagnetics Research (PIER), 97, 2009: 197~215.
- [4] 甘仲民,张更新等.毫米波通信技术与系统[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 梁广,贾铂奇,龚文斌.星载多波束相控阵天线等通量覆盖设计[J].电波科学学报,2010,25(2):248~252.
- [6] 薛正辉,李伟明,任武.阵列天线分析与综合[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [7] 焦永昌,杨科,陈胜兵等.粒子群优化算法用于阵列天线方向图综合设计[J].电波科学学报,2006,21(1):16~25.
- [8] 陈腾博,焦永昌,张福顺.基于改进型粒子群算法的阵列天线综合[J].微波学报,2006,22:39~43.

(下转第45页)

A Ka Band Waveguide Three-way Power Divider

Cai Bo, Li Pengcheng, Liu Dexi, Zhu Dalong

Abstract: A millimeter-wave three-way power divider is designed by cascading a two-way equal power divider and two dual-way unequal power dividers, which all possess waveguide E-T structures. A prototype of the power divider is fabricated according to the simulation results. Experimental results show that its insertion loss is better than 0.33 dB and return loss is less than -18dB from 34GHz to 36GHz.

Key words: Waveguide; Ka band; Three-way; Power divider

[作者简介]

才 博 1987 年生,硕士研究生,主要从事微波、毫米波功率合成技术的研究。

李鹏程 1964 年生,博士,研究员,主要从事微波、毫米波天线应用系统的研发。

刘德喜 1973 年生,硕士,研究员,主要从事微波、毫米波工程应用系统的研发。

祝大龙 1980 年生,博士,高级工程师,主要从事微波、毫米波放大器、T/R 组件及 LTCC 技术的研发。

(上接第 41 页)

[9] Maurice Clerc. Particle Swarm Optimization[M]. ISTE Ltd,2006.

[10] 龚文斌. 星载 DBF 多波束发射有源阵列天线[J]. 电子学报,2010,12(38):2904 ~ 2909.

Research on Multi-beam Phased Array Antenna

Design and Synthesis for LEO Satellite

Shang Yong, Liang Guang, Yu Jinpei, Gong Wenbin

Abstract: This paper presents a hexagonal phased array antenna with 19 elements and 7 beams for the LEO satellite with CDMA standard, which can reduce the effect of “corner problem” and “near and far problem”. The particle swarm optimization algorithm is adopted to realize the synthesis of hexagonal antenna. Based on the element-space partition, the algorithm can reduce the number of beam-forming coefficients. The mathematical simulation results show that the antenna patterns meet the designed goal, which efficiently verifies the accuracy of antenna and algorithm.

Key words: Multi-beam antenna; Antenna synthesis; Particle Swarm Optimization(PSO)

[作者简介]

尚 勇 1987 年生,硕士研究生,主要研究方向为相控阵天线设计与综合优化技术。

梁 广 1983 年生,博士,主要研究方向为相控阵天线技术、卫星通信技术。

余金培 1965 年生,研究员,博导,主要研究方向为小卫星通信技术。

龚文斌 1975 年生,研究员,主要研究方向为相控阵天线技术、卫星通信技术、卫星导航技术。

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>