

一种基于移相插值方法的相控阵列天线波束形成网络^①

崔 蕾,王五兔

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:文章提出了一种移相插值网络方法,可以有效降低大型相控阵列天线馈电网络的复杂性;然后基于该方法设计了一种相控阵列天线的波束形成网络;最后对13单元的一维线性阵列和19单元的面阵进行了仿真,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词:相控阵天线;移相插值方法;波束形成网络

0 引言

相控阵天线由于其机动灵活和响应快速的特点,在航天器的应用中受到广泛关注。一般来说,相控阵天线的波束控制是通过连接在阵列中每个辐射单元的移相器和衰减器实现的,这是一种有效的波束控制方式。但随着辐射单元的增多,整个系统将变得复杂,成本将会提高,因此,人们提出了很多方法降低大规模相控阵天线的复杂性和成本。比较常见的方法有以下几种:(1)子阵方法,这种方法是用一个移相器控制一行(列)辐射单元,或者一个子阵,但这种方法的缺点是不能单独修正平面相控阵天线中每一个单元通道的幅度与相位误差,因而难以实现低副瓣电平的相控阵天线;(2)Butler matrix,采用Butler矩阵形成的波束也是存在副瓣电平较高的缺点。以上两种方法对移相器数量的减少也不明显。

文章介绍了一种基于移相插值网络的波束形成方法,该方法利用数量较少的移相器,通过插值网络实现符合特定波束指向的相位分布。这种移相插值网络是通过功分器和合成器按一定规律级联形成。

1 移相插值网络原理

1.1 一维线阵原理

如图1所示,传统的直射型相控阵天线性能相对较好,实现相对容易,但是对于大阵,移相器的个数与辐射单元数相等,这样,需要大量移相器,增加

了质量和成本。

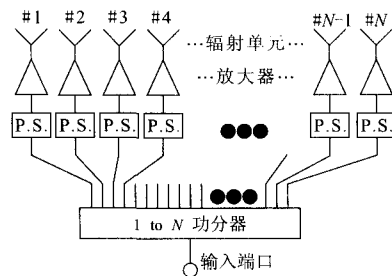


图1 全单元控制类型

图2所示为子阵控制类型,可以通过划分子阵^[1]的方法来减少移相器数目;但由于相邻子阵的相位不同,使产生的相位分布与要求的等相位面相差较大,而且随着这种相位差错的增大,天线波束指向精度将会降低,这在后面的仿真结果中可以看到。

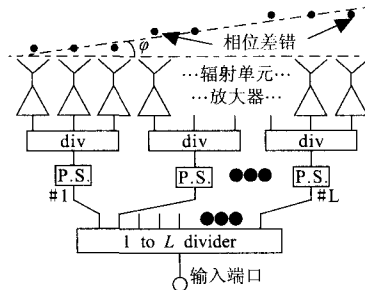


图2 子阵控制类型

为了减少相位控制单元个数同时又不引起大的性能恶化,可以通过增加移相插值网络,将相位控制单元之间的单元的相位插值出来,使得辐射口面的

^① 收稿日期:2010-12-29;修回日期:2011-03-01。

相位分布基本连续并满足波束指向要求,同时实现了移相控制单元的有效减少。对于波束扫描天线,天线波束指向对应于天线阵面相位分布的斜率(或梯度),这样,只要根据已有辐射相位分布便可插值出其他的辐射相位,插值出的辐射相位符合特定波束指向所要求的辐射相位分布。

在电扫描相控阵天线应用插值网络,对于线阵,其原理拓扑图如图 3 所示^[2]。它包括复权值控制部分、插值网络、放大器及辐射单元。复权值控制部分包括幅度衰减器和移相器,用来控制输入信号的幅度和相位。插值网络部分包括 M 个功分器和 N 个合成器,每个合成器的输出是 2 个输入信号的合成向量。如果复权值控制部分产生一个相位分布,则通过插值网络后产生同样的相位分布。

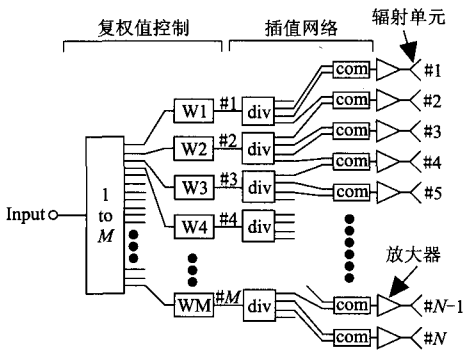


图 3 基于插值网络的线性相控阵结构图

每个辐射单元的激励按下式给出:

$$w_i = A_i \cdot w_{(i+1)/2} \quad i = 1,3,5,\cdots \quad (1)$$

$$w_i = A_i \cdot \left(\frac{w_{i/2} + w_{(i+2)/2}}{2} \right) \quad i = 2,4,6,\cdots (2)$$

$$w_i = a_i \exp(j\varphi_i)$$

式中, w_i 是辐射单元的激励系数, A_i 是放大器的增益常量, w_i 是由权值控制部分给出的复权值, a_i 和 φ_i 分别是幅度和相位。

奇数位辐射单元的相位为移相器输出相位,偶数位辐射单元的相位为插值所得相位。

对于一个有 m 个输入端口、 n 个辐射单元的一维线性阵列($m < n$),插值网络在数学上可以用一个 $m * n$ 矩阵来表示,一般表达式为:

$$AB = I$$

式中, I 为辐射单元的激励矩阵, A 为输入端口的激励矩阵, B 为插值矩阵。

插值矩阵 B 是由插值网络的拓扑结构来决定, I

由给定波束指向得到。

$$[w_1, w_2, w_3 \cdots w_m] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = [w'_1, w'_2, w'_3 \cdots w'_n] \quad (3)$$

其中, w_i 是控制单元提供的复权值, w'_i 是经过插值网络之后产生的辐射单元的激励系数。根据插值规律,推导得出了辐射单元和所需控制单元的一般关系,如表 1 所示。

表 1 辐射单元和控制单元的一般关系

辐射单元	控制单元
3	2
(4)5	3
(6)7	4
(8)9	5
$2n-1$	n

1.2 面阵原理

对于面阵,插值网络部分将采用 1-8 功分器,合成器与线阵中一样采用 2-1 合成器,辐射单元将采用六边形^[3]排列,它是由不同半径的六边形同心圆环构成,拓扑结构如图 4 所示。

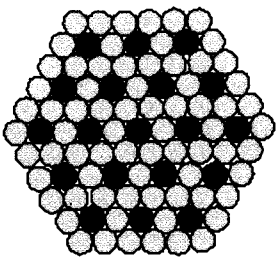


图 4 面阵单元的六边形排列

图 4 中,黑色圆圈代表该辐射单元后面接移相控制单元,其他辐射单元的相位都是通过相邻 2 个黑色单元的相位插值得到的。为了与一维的拓扑结构一致,该六边形结构最外圈的辐射单元将会连接匹配负载。图 5 是插值网络与辐射单元的连接关系。图中小圈代表功分器,它与移相控制单元的数量一致,功分器将功率等分为 8 份之后,每 2 份再通过合成器合成输出给辐射单元。

如图 4 所示,第 n 个同心六边形环阵是由半径不同且均匀分布的同心单元圆环阵组成,一个具有

n 个同心六边形环阵的六边形平面天线阵单元总数由下式确定:

$$M = 6 \sum_{m=1}^n m + 1 = 3n(n+1) + 1 = 3n^2 + 3n + 1$$

当移相器的六边形环数为 n , 控制单元的个数为 $3n^2 + 3n + 1$, 则对应辐射单元的环数为 $2n$, 将 $2n$ 代入 $3n^2 + 3n + 1$ 中, 得到辐射单元总数为 $12n^2 + 6n + 1$ 。

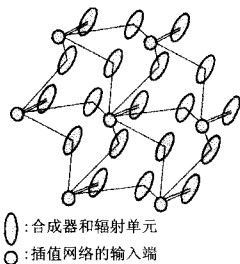


图 5 插值网络与辐射单元的连接关系

这样就得到了单元采用六边形排布时的辐射单元与控制单元的关系, 如表 2 所示。

表 2 六边形排布时辐射单元与控制单元的关系

辐射单元	控制单元
19	7
61	19
127	37
217	61
331	91
$12n^2 + 6n + 1$	$3n^2 + 3n + 1$

2 仿真结果

2.1 13 单元一维线阵

下面设计了一个 13 单元的一维线性阵列。根据表 1 可知, 13 个辐射单元需要 7 个控制单元, 这样, 根据式(1)和式(2)可得到 7×13 的插值矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

当输入端的激励为 A , 如下式:

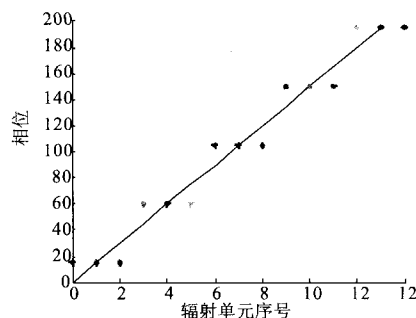
$$A = [1 < 0^\circ \quad 1 < 30^\circ \quad 1 < 60^\circ \quad 1 < 90^\circ \quad 1 <$$

$$120^\circ \quad 1 < 150^\circ \quad 1 < 180^\circ]$$

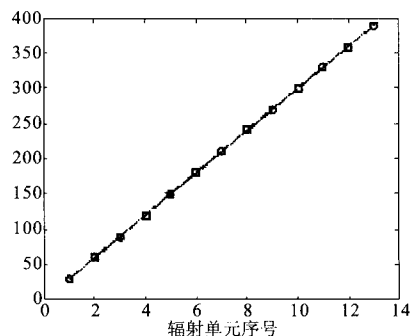
根据式(3)矩阵相乘 $I = AB$ 可得到 13 个辐射单元的激励矩阵 I , 如下式:

$$I = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.8660 + 0.5000i & 0.8660 + 0.5000i & 1.3660 + 1.3660i & 0.5000 + 0.8660i & 0.5000 + 1.8660i & 0 + 1.0000i & -0.5000 + 1.8660i & -0.5000 + 0.8660i & -1.3660 + 1.3660i & -0.8660 + 0.5000i & -1.8660 + 0.5000i & -1.0000 \end{bmatrix}$$

图 6、图 7 是通过 Matlab 编程得到的 13 单元的激励相位与辐射方向图。



(a) 子阵方法的相位逼近



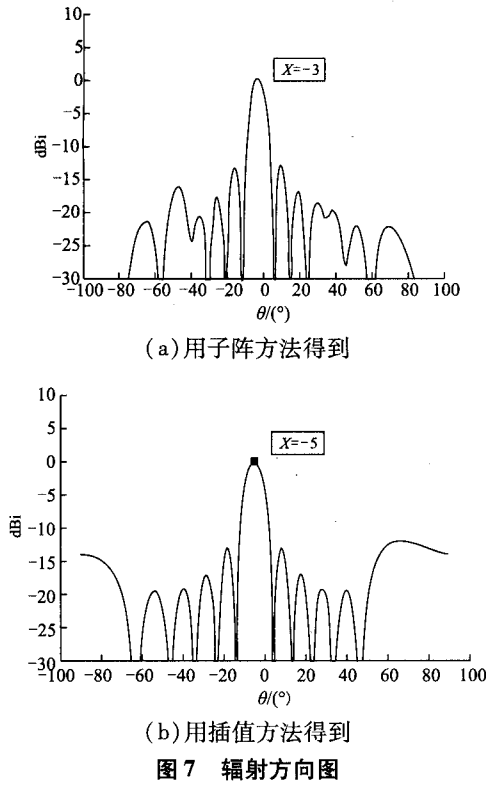
(b) 插值方法的相位分布

图 6 激励相位

由图 6 可以看出, 采用子阵方法所得到的相位逼近使得相邻子阵的相位误差较大, 这样会影响波束指向。图 6 中圆圈代表控制单元提供的相位分布, 矩形是通过插值得到的相位, 这样得到的相位分布基本符合所要求的相位分布。所以, 该插值方法在不影响相位分布的情况下, 有效减少了控制单元的个数。

当辐射单元的激励相位差 $\Delta\phi = 15^\circ$ 时, 根据公式 $\sin\theta = \frac{\Delta\phi}{kd}$, 可以求出波束指向 $\theta = 4.7^\circ$, 式中 $k = \frac{3\pi}{\lambda}$, $d = 0.5\lambda$ 。从图 7 可以看出, 用子阵方法得到的

波束指向为 -3° , 与要求指向相比存在误差; 而用插值方法得到的波束指向为 -5° , 基本接近理论值, 验证了该方法的正确性。



2.2 19 单元面阵

由图4可以看出六边形平面天线阵是由一个位于中心的单元被若干个同心的六边形环阵环绕所组成, 而每一个六边形环阵又是由若干个半径不同的单元均匀分布的同心六单元圆环阵组成。由阵列天线理论可知, 位于 xy 平面、半径为 r 的圆环天线阵的阵因子可以表示为:

$$E_N(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[kr \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n) + \alpha_n]} \quad (4)$$

其中, N 为组成圆环天线阵的单元总数; θ 和 φ 为空间球坐标变量; I_n 为圆环天线阵中位于 $\varphi = \varphi_n$ 处第 n 个单元的激励电流幅度; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; α_n 为圆环天线阵中位于 $\varphi = \varphi_n$ 处第 n 个单元的激励电流相位, 对于常规的同相位激励有

$$\alpha_n = -kr \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n)$$

根据式(4), 由 M 个半径不同的同心六单元圆环阵组成的六边形环阵的阵因子可以表示为:

$$E_M(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^6 I_{mn} e^{j[kr_{lm} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_{lmn}) + \alpha_{lmn}]} \quad (5)$$

其中, r_m 为第 m 个同心六单元圆环阵的半径。

对于由一个位于中心的单元被若干个同心的六边形环阵环绕所组成的六边形平面天线阵, 天线阵结构分析表明, 它的第 l 个同心六边形环阵是由 l 个半径不同的单元均匀分布的同心六单元圆环阵组成, 因此, 六边形平面天线阵的阵因子可以表示为:

$$E_L(\theta, \varphi) = I_0 + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^l \sum_{n=1}^6 I_{lmn} e^{j[kr_{lm} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_{lmn}) + \alpha_{lmn}]} \quad (6)$$

其中, I_0 是中心单元的激励电流幅度, 对于常规的同相位激励有 $\alpha_0 = 0$; L 是六边形平面天线阵中六边形环阵的总数, 对于单元间距为 d 的六边形平面天线阵有

$$r_{lm} = d \sqrt{l^2 + (m-1)^2 - l(m-1)} \quad (7)$$

$$\varphi_{lmn} = \cos^{-1} \left[\frac{r_{lm}^2 + d^2 l^2 - d^2 (m-1)^2}{2dlr_{lm}} \right] + \frac{(n-1)\pi}{3} \quad (8)$$

$$\alpha_{lmn} = -kr_{lm} \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_{lmn}) \quad (9)$$

图8示出插值前后单元排序。图8(a)中, 黑色单元激励由馈电网络提供, 其他单元的激励通过插值得到。

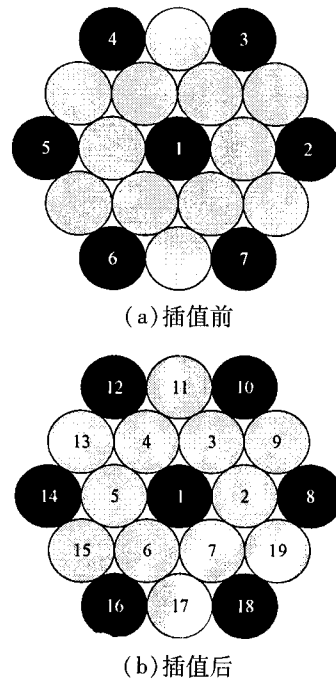


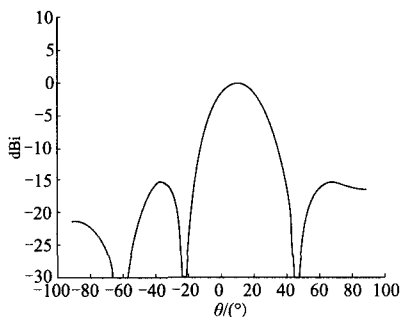
图8 激励单元排序

图8中的7个单元激励电流幅度为1,中心单元的激励相位 $\alpha_0=0$,其余激励相位通过对式(7)~式(9)编程得到,这样得到7个单元的激励相位 A ,最后19个单元的激励相位矩阵 I 通过插值矩阵 B 得到,即 $I=A*B$ 。

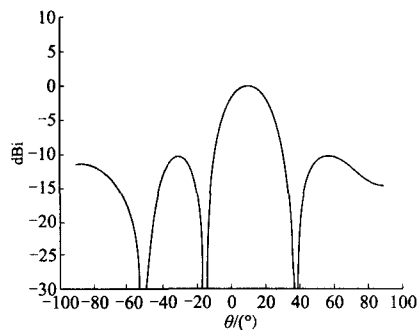
插值矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过 Matlab 编程^[4]得到19单元的辐射方向图,如图9所示,波束指向为 $(\theta, \varphi) = (10, 0)$ 。其中,图9(a)为插值方法所得辐射方向图;图9(b)为直射阵的辐射方向图。



(a) 插值方法所得辐射方向图



(b) 直射阵辐射方向图

图9 19单元的辐射方向图

从图9中可以看出,插值方法与直射阵相比,在减少移相器的前提下,其波束指向满足要求;同时,

插值方法降低了副瓣电平,验证了该方法的有效性。

3 结论

随着相控阵天线趋于大型化发展,简化移相控制电路、降低天线设计成本,已成为一个重要课题。文章在子阵方法的基础上提出了移相插值方法,对该方法进行了理论分析,通过数学推导得到了一般的插值矩阵;设计了基于该方法的13单元线阵和19单元面阵的波束形成网络,通过 Matlab 编程得到了子阵方法和插值方法的相位分布与辐射方向图,对两种方法进行了对比;仿真结果表明,子阵方法对波束指向精度有较大影响,插值方法得到的相位分布与辐射方向图接近理论值,而且降低了副瓣电平,验证了该方法的有效性。因此,该方法对减少大型相控阵列移相器个数、降低成本有着实际意义。

参考文献:

- [1] Suzuki Y, et al. An Excitation Weight Determination Method for Onboard Phased Array Antennas with Weight Interpolation Network [C]. IEEE Int. Symp. on Phased Array Systems and Technology, 2003: 517 ~ 522, Oct. 2003, Boston, MA.
- [2] Suzuki Y, Imaizumi Y, Kawakami Y, et al. Beam Forming for Large-Scale Phased Array Antennas [C]. 20th AIAA ICSSC, AIAA2002-1987, May, 2002, Montreal, Canada.
- [3] 李东风, 龚中麟. 六边形平面天线阵优化稀疏布阵研究 [J]. 电子学报, 2002, 30(3): 376 ~ 380.
- [4] 陈天禄, 郭燕红. 阵列天线方向图的 Matlab 实现 [J]. 西藏大学学报, 2010, 25(1): 103 ~ 107.

作者简介:

崔蕾 1986年生,中国空间技术研究院西安分院在读硕士研究生。主要研究方向为航天器天线技术。

王五兔 1964年生,研究员,硕士生导师。主要从事航天器天线技术的研制工作。

(下转第65页)

Research on Sampling Locked Phase DRO Source

ZHANG Rui-qi, CHEN Yan, HE Xin-yang, YU Hong-xi

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

Abstract: The principle and key technology of sampling locked phase DRO source are introduced in the paper. Then sampling locked phase circuit and DRO oscillator are designed and tested. And the design example has found its actual applications.

Key words: Sampling locked phase; Oscillator; DRO

(上接第 42 页)

A Beam Forming Network to Feed Phased Array Antenna Based on Phase Shifter Interpolation Method

CUI Lei, WANG Wu-tu

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

Abstract: A phase shifter interpolation method is presented in this paper, which could reduce the complexity of the beam forming network to feed phased array antenna. Then a beam forming network to feed phased array antenna based on this method is designed. Finally, one dimension linear array with 13 elements and a plane array with 19 elements were simulated. The results validated this method.

Key words: Phased array antenna; Phase shifter interpolation method; Beamforming network

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),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>