

文章编号 1005-0388(2003)01-0086-05

一种多波束面阵天线的分析与设计^①

肖开奇¹ 聂在平²

(1. 电子科技集团公司 29 所, 四川 成都 610036; 2. 电子科技大学, 四川 成都 610054)

摘要 介绍了二维多波束天线的特点和实现二维多波束的几种方法, 针对空馈的 Rotman 透镜推导出了由它馈电的平面天线阵的相位计算公式及设计方法, 在此基础上成功地实现了空馈透镜的平面天线阵样机, 并给出了相应的测试结果。

关键词 多波束, 透镜, 面阵

中图分类号 TN823.27 文献标识码 B

Analyses and design of a multi-beam planar array antennas

XIAO Kai-qi¹ NEI Zai-ping²

(1. 29th Institute of the Electronic science and Technology group company of china,
Chengdu Sichuan 610036, China;

2. University of Electronic Science and Technology of china, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract In this paper, the two-dimension multi-beam antennas and its implementation methods are introduced. The phase computing formula and designing way for the air three-dimensional Rotman lenses are presented. A sample of the planar antenna array of air three-dimensional Rotman lenses is designed, and its measured results are given.

Key words multi-beam, lenses, planar array

1 引言

随着电磁环境日趋复杂, 电磁信号越来越密集, 威胁目标种类越来越多样化, 以常规的单波束天线组成的系统越来越难于适应现代战争的需要。而二维多波束面阵天线在一定的方位面、俯仰面内形成同时多方向的波束簇, 在宽频带范围内, 能快速地对应于不同方位不同俯仰方向上的各种目标, 实现频率和方向的双重瞄准, 且具有空间功率的合成能力。如果在每个天线单元后接入中等功率的行波管, 就能以大的等效辐射功率去干扰多个目标。波束控制方便, 波束指向恒定, 结构紧凑, 可靠性高。空间波束是通过空馈透镜的幅相变换形成的, 具有最佳的效费比, 它形成的系统能有效地减小干扰盲区。同时, 倾收时具有单站定位的功能, 有更大的灵活性, 容易实现最佳干扰, 在电子战中有很大的应用

潜力。

二维多波束面阵是由波束口曲面, 阵列口曲面, 平面阵以及连接电缆组成, 而波束口曲面和阵列口曲面组成馈电的透镜, 它是许多微波移相器、耦合器和功率分配器组成的复杂网络变换的集成化。透镜在所要求的工作频带范围内, 保持其良好的聚焦特性, 目前在工程上有几种方式如 Ruze、Rotman 和 R-KR 透镜等, 采用一定的扩展得到二维波束。如果平面天线阵的每一行都由一个的水平面透镜馈电, 而它则依次由一系列垂直的透镜馈电。波束扫描也可通过一约束透镜加入二极管开关来完成, 正如由多层排列的许多二极管组成的 Radant 透镜一样。在柱形透镜加入移相器的形成二维多波束, 如图 1 所示在每个平面阵列单元天线接入一个移相器, 柱形透镜的中心是空气或介质, 它是相控阵和多波束的组合使用。方位面形成多波束, 俯仰面是移相器聚

焦形成波束,工作方式灵活,但成本高,系统的反应时间长,调试工作量大。而移相器是有源器件,尤其在宽带情况下,控制系统复杂化。龙伯透镜是另一类波束形成器,它属于介质型透镜,整个透镜是一个球体,在介质球的左球面放置了多个天线单元,由于在球内介质的介电常数是球对称性的,且随着球半径的变小,介质常数 ϵ_r 变大。在介质球面上, $\epsilon_r = 1$,通过非均匀介质的作用,使得波束口单元发出的射线,经介质球后都与此束口单元穿过球心的那条射线平行,形成一平面波,如果龙伯球作为接收用,介质球对波束口单元起压窄波束,提高天线增益的作用,且同时供所有的波束口单元复用,因此是全聚集的。空域的覆盖面大,波束均匀,容易实现宽带工作。作为发射阵使用时,就会造成效率降低或波束畸变,实际工种中实现渐变的 ϵ_r ,困难极大。如果用分层渐变的介质层逼近连续变化的介质层,制作和加工会产生难以控制的误差,代价大,且介质球有附加的能量损耗,它一般在无源干扰中作为RCS增强器使用。第三种方法是用多个二维透镜组合形成二维多波束。它是立体透镜的平面化,用多个这种透镜组合起来可以比较容易地实现二维多波束,如图2所示,右边是一个平面天线阵列,左边采用一组方位波束形成器(阵的每一行有一个二维透镜),后面接有一组俯仰面波束形成器。从理论上看,天线阵列在方位、俯仰都有良好的聚焦特性。但实际工程中,因为透镜数目的增多,增大了系统的损耗。同时,连接电缆和连接头的增加,引起附加的反射,造成一种新的相位不平衡,使累加的相差变大,加重波束的畸变。而且,馈电部分的体积变得很大。另一方面,当平面阵列单元天线呈三角或其它形式的排布,波束口的波束位置在空间交错出现时,二维透镜的种类增多,相互连接变得复杂。综上所述,从工程的实际和应用出发,开展了宽带空馈三维透镜及二维平面阵列天线的研制工作。该透镜形成的二维多波束天线,主要由三部分组成,即三维透镜,连接电缆和平面阵天线。通过特定的透镜曲面,实现空间的幅相变换。而Rotman透镜与其它几种透镜相比,有一个显著特点,其波束口曲面是一个球面,扫描角度宽,所有的尺寸都是对偏轴焦距归一化,非常适合于三维处理,与此同时平面阵与阵列口之间的各对应端口用相位特性好的电缆线连接。在宽带频率范围内,通过各扫描角的相关通道的相位控制,有效解决了曲面型阵列口面的Rotman空馈方式的三维透镜给平面阵天线馈电技术,其工程样机已投入使用。

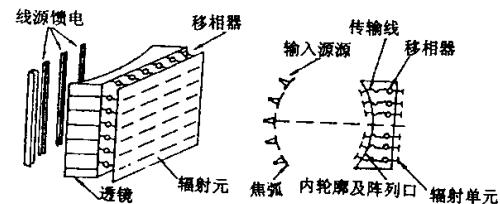


图1 加移相器的柱形透镜

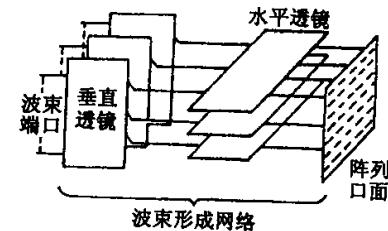


图2 组合透镜二多波束

2 空馈 Rotman 透镜的面阵天线分析

由电磁理论知道,在空间产生单个聚集的波束,只需一个焦点,典型的例子是抛物面天线。要使多波束的线阵聚集,采用的二维透镜至少要有2或3个焦点,形成一条聚焦的曲线。当然三焦点的曲线其波束质量更好。要产生二维的空间波束簇,波束口所在面为一个曲面,其上至少有4个焦点。整个透镜的坐标如图3所示,如果阵列天线是共形曲面天线阵,那透镜就必定有5个焦点。图中是在平面天线阵情况分析透镜的坐标系统,四个焦点可以任意设置,但数学上处理起来比较复杂,且与焦点对称分布相比不会带来相位误差有大的变化。这样,选择一个焦点 G_1 位于透镜轴上,其它三个焦点 F_1 、 F_2 和 F_3 对称地位于一个正三角形的三个顶点上。假定波束通过这四个焦点的球面上,焦面的曲率半径是由 G 和 F 的比值 g ($g = G/F$)控制的,夹角 $F_1OG_1 = \alpha$ 是可变的,因此可以通过 g 和 α 来限制焦点位置的变化。

参看图3,焦点由下列方程来定义:

$$\overline{F_1P} + W(M, N) + D_1 = \overline{F_1O} + W(0, 0)$$

$$\overline{F_2P} + W(M, N) + D_2 = \overline{F_2O} + W(0, 0)$$

$$\overline{F_3P} + W(M, N) + D_3 = \overline{F_3O} + W(0, 0)$$

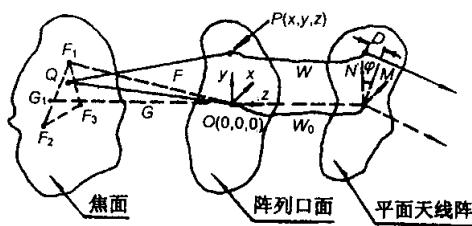


图 3 透镜坐标图

$$\overline{G_1 P} + W(M, N) = \overline{G_1 O} + W(0, 0) \quad (1)$$

式中 (M, N) 为平面天线阵列的单元笛卡尔坐标。 (M, N) 点的单元天线与其相应的阵列曲面端口之间的传输线长度为 $W(M, N)$, $D_1 \sim D_3$ 为对应于焦点 $F_1 \sim F_3$ 相应的波束指向通道差。

假定透镜的内夹角 $\theta \neq \Psi$ (Ψ 为平面阵扫描角), 即 $S_2 \neq 1$, 可以获得很大的灵活性。设:

$$x = X/F, y = Y/F, z = Z/F$$

$$w = (W - W_0)/F, m = M/F, n = N/F \quad (2)$$

通过推导得下列式子:

$$\begin{aligned} x &= A + Bw \\ y &= -C + Dw \\ z &= E + Fw \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $A = [m + (m + nS_1/2)] \cdot S_2$

$$B = -m \cdot S_2$$

$$C = [n + (m^2 - n^2)S_1/4]$$

$$D = -nS_2$$

$$E = m^2 S_1^2/4(c_0 - g) + m^2 S_1^2/4$$

$$F = (g - 1)(c_0 - g)$$

$$S_1 = \sin\beta \quad c_0 = \cos\alpha$$

$$S_2 = \sin\Psi/\sin\theta \quad (4)$$

α 为焦点上的源的内张角, β 为相应的波束指向角, 归一化的传输线长度由下列公式给出:

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (5)$$

式中 $\alpha = B^2 + D^2 + F^2 - 1$

$$b = 2AB + 2CD + 2EF + 2gF + 2g$$

$$c = A^2 + C^2 + E^2 + 2gE \quad (5a)$$

如果 g, α, S_2 参数给定, 可以用上述方程来观察焦面上任一点的源随各种归一化 m, n 通道误差 σ_e 的变化情况。 $\alpha = 30^\circ$, 当 $g = 0.87 \sim 1.30$ 时, 焦面从近似的平面变到近似的球面, 而 σ_e 的变化非常小, 不到 10%。考虑到 $g = 1, S_2 = 1$ 情况, 取 $\alpha = 30^\circ$, 这样焦平面的中心和阵列曲面的中心相同, 从而求出它们的相位误差, 公式为:

$$\sigma_e = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} -$$

$$\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} + D(m, n) + w - w_0 \quad (6)$$

式中 x, y, z 为阵列口的坐标, x_1, y_1, z_1 为波束口坐标, $D(m, n)$ 为在产生空间聚焦对应阵列口曲面上的天线阵面坐标点相应于阵面中心处所要求的空间相对路径差:

$$D(m, n) = m \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi + n \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi \quad (7)$$

w 为 m, n 点到阵列曲面上 x, y, z 之间的连接电缆长度, w_0 为阵口径中心单元到 $x = y = 0$ 的阵列曲面中心处之间的电缆长度, 归一化的路径差计算结果见图 4 所示。 α 参数是一个隐含的变化, 定义 $S_0 = \sin\beta_0/\sin\Psi_0$ 为焦点的收敛度, 当 $g = 1, S_2 = 1$ 时, S_0 从 1 变到 0 (所有四个焦点靠在一起)。在 $m, n < 0.5$ 范围内, 减小最大的 σ_e , σ_e 在两个主平面仍是二次项起重要作用, 通过 F_1, F_2 和 F_3 引入类似的尺寸误差来改变最大的通道误差。但 $S_2 = \sin\theta/\sin\Psi$ 的变化对归一化通道误差影响小。对于二维 Rotman 透镜, 在阵列口中心附近的阵列口间距约为 $S_2 \times$ 阵间距, 对于波导馈电的透镜, 要求 S_2 大于 1, 以避免较低频率的波导截止。这对三维 Rotman 透镜也适用, 随着 S_2 增加, 与阵相应的阵列口表面尺寸也增加, 如果 y (或 z) 远大于 0.5, 所需要阵列口面畸变, 实际难以实现。如果 $S_2 = 5/3$ 要求 m (或 n) < 0.3。对于特定的阵列, 可以确定最小的 F 值, 选择 S_2 适合于阵列口的值的要求。

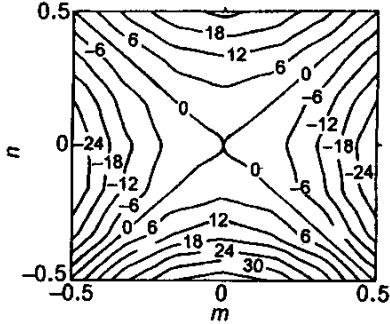


图 4 归一化通道误差 ($\sigma_e \times 10^3$)

$$F \geq S_2 \cdot P\lambda_0$$

($P\lambda_0$ 为阵列的最大尺寸)

最大的相差设为 $\lambda_0/16$, 当 $m \leq 0.5$, 最大的归一化通道误差 σ_m 为 1.8×10^{-2} , 对于二次项变化占主要成分的 σ :

$$\sigma_m \approx 7 \times 10^{-2} \cdot m^2$$

$$\text{则 } F \geq 0.3P^2\lambda_0 \quad (8)$$

根据最大的扫描角、阵列尺寸等可以确定偏轴焦距

F ,设计中只要确定了焦距 F ,根据给定的指标要求就可以确定天线阵面和透镜的具体物理尺寸。如要知道最后的波束分布质量,还需要在上述参数情况下,计算每个阵元口的幅度分布。

3 设计与实测结果

从上述给出的设计公式出发,结合工程需求,研制了一种三维 Rotman 透镜馈电的平面阵二维多波束。它的平面阵列天线呈三角形排列。共 32 个阵元,分 8 列,每列 4 个单元,水平极化方式放置,每列单元在俯仰面错位半个阵元口径间距,整个天线阵列口面是一个矩形口形式尺寸为 $120\text{mm} \times 115\text{mm}$,既要保持单个阵元天线有较高的增益,又要使栅瓣不出现在可见区域内,取透镜焦距 $F = 300\text{mm}$ 。一般情况下透镜本身的两个口径面都是曲面,阵列口曲面却是一般的二次曲面。除了理论上的设计要保证通道相差小且有较好的幅度分布外,从两个曲面内提取电磁能量是一大工程难点。而且,要保证理论设计在现有条件下得以实现,在允许的误差范围内,采用规则曲面逐次逼近的办法,将所有的从透镜阵列口到面阵上的连接电缆取为等电长度,综合考虑取透镜阵列口面为球面,最大的相差控制在 10° 左右,保证工程的可实现性,透镜内所有提取能量的单元为脊喇叭天线,采用特殊馈电形式的后馈式喇叭馈源形式,既解决了射频信息的转接,又巧妙地完成了单元的定位和固定,从电气和结构两方面创造性地解决了透镜体单元的实现问题,实物图见图 5 所示。为了有效地抑制透镜腔体内的杂散波,在腔体内壁上加入相应的小尖劈吸波材料。波束口波束分布见图 6 所示。

该二维多波束天线面阵达到的指标如下:

频率范围 $8 \sim 12\text{GHz}$

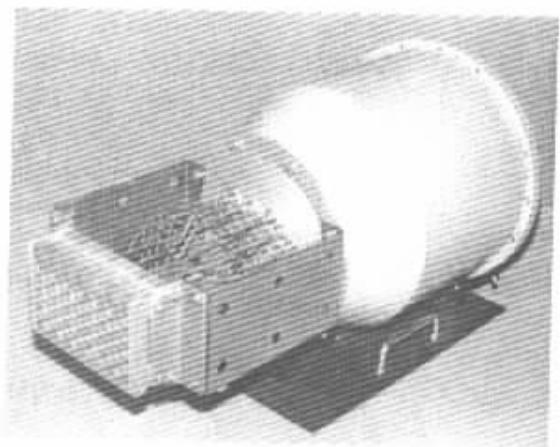


图 5 二维多波束天线阵实物

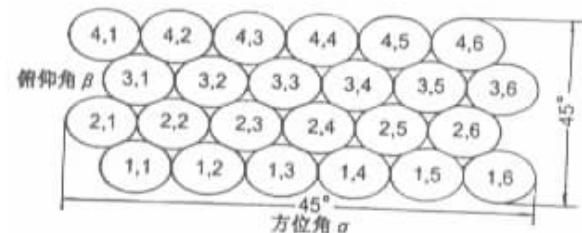


图 6 波束分布图

波束数目 24 个(交错分布)

阵元天线数目 32 个

瞬时空域覆盖 $45^\circ \times 45^\circ$

波束口驻波: < 2.5

透镜插损: 28dB

波束口增益: > 13dB

波束宽度: $10^\circ \sim 17^\circ$ (方位面), $14^\circ \sim 22^\circ$ (俯仰面)

极化形式: 水平线极化

接口形式 SMA 座

图 7 给出了波束口的辐射方向图(方位面和俯仰面) 其中图 7(a) 为图 6 中最上一层方位面波束 ,

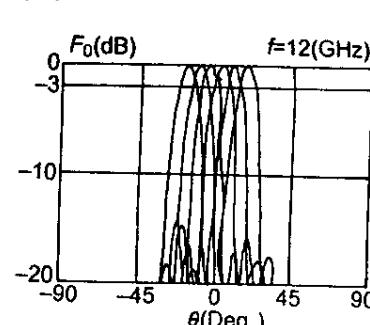
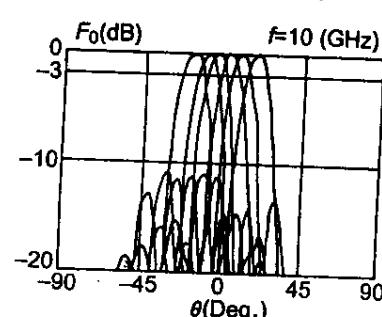
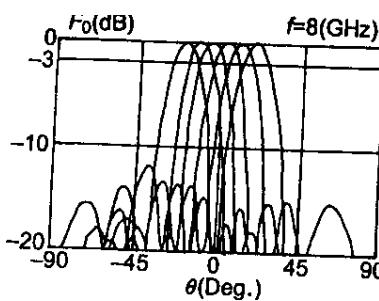


图 7(a) 方位面辐射波束

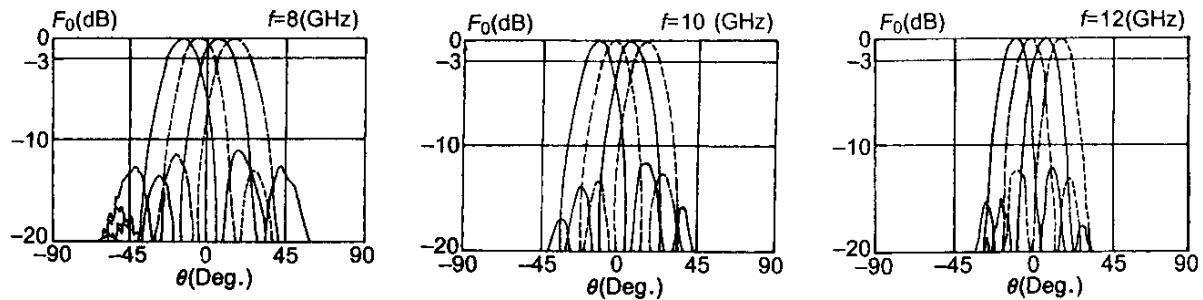


图 7(b) 仰面辐射波束

它与第二层波束指向分布类似,它的仰面扫描角更大,图 7(b)为图 6 中第二、四层的第一列仰面方向图(实线)和第一、三层的第一列仰面方向图(虚线),图中所示的波束图为边缘波束图形,由于波束口的照射单元口径比较小,照射到阵列单元的幅度相对均匀以致对应的平面阵列上得到的幅度相差相对均匀,结果波束付瓣电平均在 10dB 以下,方向图的最大指向比较恒定。测向应用时相互间的波束可以互相切附办,再加上专门的切附办天线完全满足使用,而作为发射时,重点考虑的是阵元天线的增益和合成效率。

4 结论

由空馈透镜馈电的宽带面阵天线,由于采用时延移相体制,实际上天线阵还可以工作在超过上述频段,且波束数目增加,空域覆盖范围进一步增大;同时,天线面阵的性能、体积和重量可以根据要求进行完善和提高;另外针对一些特殊用途,透镜曲面可用平面实现或者平面阵列变为曲面阵等。二维多波束面阵天线可以单独使用形成系统,既可以作发射,又可以作为接收;也可以与大口径的抛物面天线复用,产生高增益,多个波束同时空域覆盖、结合大范围扫描机械和电扫的快速反应灵活性产生多功能。天线阵采用三角排布的椭圆口径,将是最佳的阵列排列选择。该天线可用于机载、舰载、地对空干扰系统中。而且,在卫星通信中也有着较大的应用前景,如一星多用或一站多星卫星地面站系统中。

参考文献

- [1] 徐静松. 改进型 Bootlace 对称透镜 WS84-3 [J]. 29 所内部资料, 1984 年 6 月.
- [2] J B L Rao. Multi-focal three-dimensional Bootlace lenses [J]. IEEE AP 1982, 30(9):1050~1056.
- [3] C Rappaport and A. Zaghloul optimized three-dimensional lenses for two-dimension scanning [J]. IEEE, AP-S, 1982, 2: 608~610.
- [4] R Ttansen. Design trades for rotman lenses [J]. IEEE AP April, 1991, 39(4):64~72.
- [5] 肖开奇. 二维多波束面阵天线方案报告[WS93-6]. 29 所内部资料, 1993.



肖开奇 (1962-), 男, 四川人, 电子科技大学在职博士, 中国电子学会高级会员, 现从事宽带天线阵列和系统的研究工作。



聂在平 (1946-), 男, 西安人。教授, 博士生导师, 电子科技大学副校长。长期致力于电磁辐射、散射与逆散射研究, 先后完成国家自然科学基金项目和国家 863 高科技研究项目近 20 项科研课题, 获省、部级科技进步奖 5 项, 在国内外学术刊物和会议上发表学术论文 170 余篇。

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>