

补偿反射面天线交叉极化的一体化设计方法

洪家才

(装备指挥技术学院测量控制系, 北京怀柔, 101416)

摘 要 分析了馈源交叉极化补偿反射面天线的交叉极化的一种方法, 即在馈源前加载介质层, 用介质层产生的交叉极化补偿反射面产生的交叉极化。分析和设计方法是用双反射面天线的部分赋形理论, 把介质层作为单偏置抛物面天线的另一个面, 构成双面天线系统, 通过对这个介质面的赋形和天线的布局调整, 降低天线的交叉极化。在这个过程中推广了均匀介质中两个金属反射面上赋形方程的独立性, 证明了这样的双面天线系统中, 介质-介质交界面上的折射定理、天线反射面上的反射定理以及电波传播的等光程方程三者之间只有两个是独立的, 从而可以推出方程确定介质层的形状, 而且该设计方程不需要微分方程的运算, 计算过程简单。

关键词 反射面天线 交叉极化 赋形天线 介质透镜

1 简介

单偏置反射面天线由于具有结构简单、加工成本低、口面利用系数高、馈源遮挡小、副瓣电平低等优点在卫星地面站中得到广泛的使用。但是该天线的交叉极化较高。反射面天线的交叉极化由三个方面形成: 馈源的交叉极化、反射面产生的交叉极化和边缘绕射产生的交叉极化。偏置单反射面天线由于其在几何结构上的非对称性, 反射面产生的交叉极化不能抵消, 因此, 即使馈源的交叉极化为零, 整个天线也存在交叉极化。交叉极化电平高是单偏置反射面天线的固有特征。交叉极化过高, 不利于传输信号的极化复用, 也容易引入更多噪声。单偏置反射面天线的交叉极化电平一般为-22.4dB, 离国际卫星通信组织要求的不高于-27dB 的要求还有一定的差距, 不能入网。

偏置双反射面天线或多反射面天线可以通过适当的反射面布局使几个反射面的交叉极化分量相互补偿, 从而整个天线的交叉极化电平较低甚至为零。也可对天线的各反射面的赋形达到较低的交叉极化电平。

但是, 对单反射面天线也不能通过布局对交叉极化进行补偿。降低单偏置反射面天线交叉极化最简单的方法是增加天线的焦距, 减小天线的非对称性。但焦距过长, 给馈源安装定位增加难度, 也增加了天线的纵向尺寸。

单偏置抛物面天线的补偿交叉极化, 必须从馈源方面作文章, 通过馈源的极化调整来补偿反射面产生的交叉极化。根据单偏置抛物面天线的焦平面场的特性分析, 要补偿反射面产生的交叉极化, 馈源的辐射场必须和焦平面的场分布实现共轭匹配。例如, 由 Rudge 等曾经提出在光壁圆波导馈源中产生高次模, 并通过选择合适的幅度和相位关系, 与焦平面场实现最佳共轭匹配。但实现起来是异常困难的, 而且频带相当窄。也可以采用在馈源

前加极化栅的方法,利用极化栅可以提高极化鉴别率的特性,人为产生馈源的交叉极化分量,补偿反射面产生的交叉极化^[1~3]。但极化栅的最大缺点是由于不同极化的电磁波,极化栅的形状是不同的,这一点对实际使用是非常不方便的。因此,在实际收发天线中很少采用。

我们提出在馈源前加介质层,通过介质层透镜的表面形状和厚度,产生馈源的交叉极化,补偿反射面产生的交叉极化的方法。这种研究方法,是把透镜面当成反射面天线的另一个面,与原来的反射面构成类双反射面天线,用双反射面天线的赋形方法对反射面和透镜面的赋形,降低天线的交叉极化。这种对反射面和馈源进行综合设计的方法称为馈源的一体化设计。本文的研究目的是在反射面的形状已经确定的情况下,应用一体化设计方法补偿交叉极化的具体过程。

2 偏置赋形双反射面天线设计的基本原理

赋形反射面天线,又叫改进型反射面天线,主要是通过改变单个或多个反射面的形状来获得良好的天线口径场分布和低交叉极化电平,提高天线的效率,改善副瓣电平。

如只对主面或副面赋形,一般叫部分赋形或部分整形(对应的,一般把非部分赋形的叫着自由赋形)。同一般的反射面天线设计一样,赋形反射面天线一般采用两类方法进行综合设计,一类是几何光学法,一类是绕射法。常常是以几何光学法作为主要的设计方法,然后再依据设计要求,在非赋形频率上进行绕射优化。

1962年 Kinber 在《Radio Technika and Engineering》刊物上发表的一篇文章定义了双反射面天线几何光学综合的基本问题,Bjϕntegard 等人^[4]进行了详细的阐述。偏置赋形双反射面天线的设计就是根据上述的等光程方程、能量守恒方程和反射定律方程等几个方程综合反射面的形状。

对双反射面天线来说,反射面上的反射定律应该包括主面和副面的两个方程。反射面赋形初期的做法一般是放弃主面 Snell 定理。起初的理由是认为主要的 Snell 定理与副面的 Snell 定理及等光程条件相比较不太重要。后来,Mitra 等人把 Levi-civita 定理用到赋形双反射面天线的设计上,认为在副面 Snell 定理和等光程条件满足的情况下,主面 Snell 定理就自动满足。章贤钟^[5]证明了这个结论。

1985年,章日荣等人^[6~7]导出了偏置赋形双反射面天线口径场交叉极化的代数表达式,以及确定映象函数的一阶偏微分方程(或相应的二阶非线性椭圆方程),并利用迭代法把映象函数的解化一阶常微分方程的求解,得到了一种较好的近似解法。

在考虑输出面的交叉极化电平作为目标函数时,除了需要上述几个方程外,还要单独加上交叉极化的约束条件。这是因为,虽然赋形的基础是在对称转换条件下的双偏置反射面天线,但是,对称转换条件的前提是主、副面有一个固定的共同焦点。赋形时,主面口径场按照预定的目标函数进行控制,使主、副面不再存在一个固定的焦点而呈现散焦状态^[8],这就破坏了主、副面有一个共同固定焦点的条件,也就破坏了对称转换原则,因而,控制交叉极化为零的措施失效,因此,在赋形约束条件中必须加入控制交叉极化的条件。交叉极化为零的约束条件,会使口面的形状呈肾状或变成两个分支,无法在工程上实现^[8]。

因此, 对于偏置赋形反射面天线可以对交叉极化进行约束, 但不能施加交叉极化为零的约束。在实际设计过程中, 一般只有靠布局优选来得到低交叉极化。

上述对反射面天线赋形的一般理论, 也可以应用到部分赋形的天线设计中^[9-10]。

反射面天线的赋形理论不仅可用于金属反射面天线, 也可用于有介质面的天线的赋形, 但需要作相应的修改。Lier^[11]等人对介质透镜馈源的单反射面天线进行了赋形设计, 章日荣^[12-13]也对含有介质的反射面天线的赋形进行了理论上的探讨。

在某些特殊情况下, 主面和副面的轮廓已经先行确定, 设计者只能对一个反射面进行赋形, 争取获得较好的性能。这时只能用部分赋形法通过改变参量进行优选计算, 力求达到设计要求。

3 由加载介质透镜的馈源馈电的偏置单反射面天线的赋形

由加载介质透镜的馈源馈电的偏置单反射面天线的赋形, 是把介质透镜看作是反射面天线的另一个面, 相当于双反射面天线的副面, 而把金属反射面看成双反射面的主面, 可以用双反射面天线的赋形方法进行综合和设计, 对介质透镜面和金属反射面赋形, 以期达到预定的目标, 如图 1。只不过这个介质副面利用的是折射波而不是反射波。由于这点不同, 一般的反射面天线赋形方法需要进行适当修改。一般需要进行以下修改:

修改 1: 等相位条件变为:

$$\sqrt{\epsilon_r} s_1 + s_2 - z_m - F(\theta)/k = \text{const} \quad (1)$$

其中, ϵ_r 是介质透镜的相对介电常数。

修改 2: Snell 定理的法线表示式变为:

$$n_1 = -\frac{s_1 \sqrt{\epsilon_r}}{s_1} + \frac{s_2}{s_2} \quad (2)$$

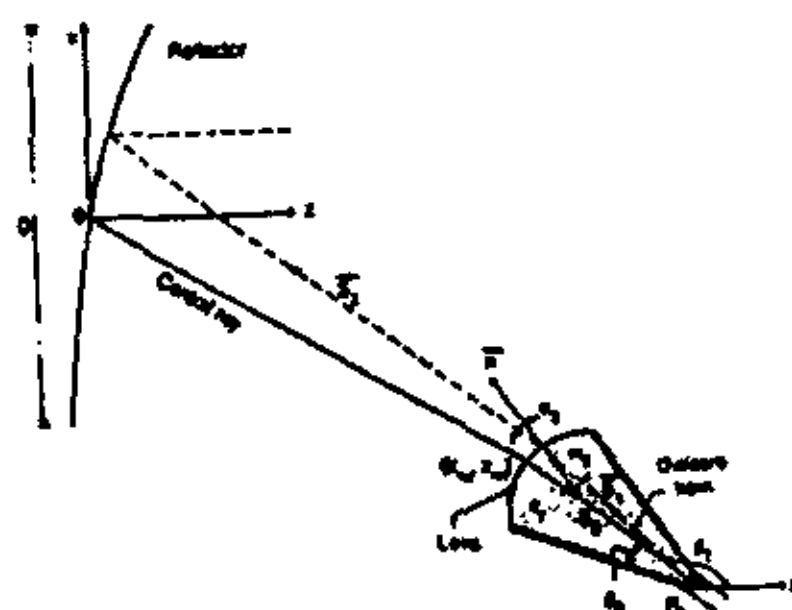


图 1 介质透镜馈源的单反射面示意图

Lier 等人在上述修改的基础上以降低交叉极化为目的对反射面和介质透镜进行了赋形设计计算。他们的成果是把金属反射面的赋形推广到了介质透镜面的赋形, 但是, 没有证明在有介质透镜的情况下, 金属面上的反射定律、介质面上的折射定律以及等光程方程三者之间的相互关系, 只是仿造双反射面赋形的一般过程, 选择采用副面方程 (介质面折射定律) 而不采用主面方程。得到的只是计算结果而没有测量数据。

我们证明了在有介质透镜作为副反射面的情况下, 金属面主面上的反射定律、介质透镜副面上的折射定律以及等光程方程三者之间只有两个是独立的, 其余的一个方程可以推导出来^[14]。在此基础上对在单反射面已经确定的情况下, 介质透镜面部分赋形的理论和方法进行了探讨。

3.1 赋形各方程的建立

如图 2 所示的介质-空气交界面, 其中 n 是交界面的法线方向, a_{si} 是入射波方向的单位矢量, a_{st} 是折射波方向的单位矢量。折射定律可表示为:

$$\frac{1}{h_{ui}} \frac{\partial s_i}{\partial u_i} = - \frac{(n \cdot a_{ui})}{(n \cdot a_{si})} = \frac{(a_{ui} \cdot a_{st})}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - (a_{si} \cdot a_{st})} \quad (3)$$

$$\frac{1}{h_{vi}} \frac{\partial s_i}{\partial v_i} = - \frac{(n \cdot a_{vi})}{(n \cdot a_{si})} = - \frac{(a_{vi} \cdot a_{st})}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - (a_{si} \cdot a_{st})} \quad (4)$$

如果交界面是空气与理想导体, 其中 n 是交界面的法线方向, a_{si} 是入射波方向的单位矢量, a_{sr} 是反射波方向的单位矢量。反射定律可表示为:

$$\frac{1}{h_{ur}} \frac{\partial s_r}{\partial u_r} = - \frac{(n \cdot a_{ur})}{(n \cdot a_{sr})} = \frac{(a_{ur} \cdot a_{si})}{1 - (a_{si} \cdot a_{sr})} \quad (5)$$

$$\frac{1}{h_{vr}} \frac{\partial s_r}{\partial v_r} = - \frac{(n \cdot a_{vr})}{(n \cdot a_{sr})} = \frac{(a_{vr} \cdot a_{si})}{1 - (a_{si} \cdot a_{sr})} \quad (6)$$

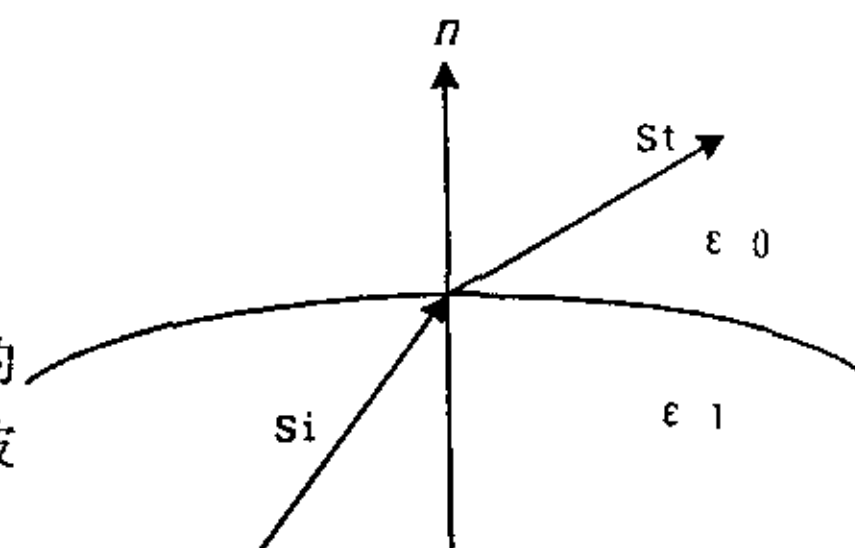


图 2 介质-空气的交界面

在如图 3 所示的介质加载馈源的单反射面系统中, 介质折射面是在馈源前面的加载介质面, 可以看成是双反射面天线的副面, 一般用球坐标系表示, 这时, $(s_i, u_i, v_i) = (r, \theta, \phi)$ 因此, $h_{ui} = r, h_{vi} = r \sin \theta$, $a_{si} = a_{s2}$, a_{s2} 是射线 s_2 方向的单位矢量, 因此, 折射定律的表达式式 (3)、(4) 变成:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial \theta} = \frac{(a_\theta \cdot a_{s2})}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - (a_r \cdot a_{s2})} \quad (7)$$

$$\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial r}{\partial \phi} = \frac{(a_\phi \cdot a_{s2})}{\sqrt{\epsilon_{r1}} - (a_r \cdot a_{s2})} \quad (8)$$

反射面的反射线应该与 z 轴平行, 反射面坐标系采用直角坐标系, 这时 (s_r, u_r, v_r) 表示为 (z_m, x_m, y_m) , $(a_{xm}, a_{ym}, a_{zm}) = (a_x, a_y, a_z)$, $h_{ur} = h_{vr} = 1$, $a_{si} = a_{s2}$, 因此, 反射定律的表达式 (5)、(6) 变成:

$$\frac{\partial z_m}{\partial x_m} = \frac{(a_x \cdot a_{s2})}{1 - (a_{s2} \cdot a_z)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial z_m}{\partial y_m} = \frac{(a_y \cdot a_{s2})}{1 - (a_{s2} \cdot a_z)} \quad (10)$$

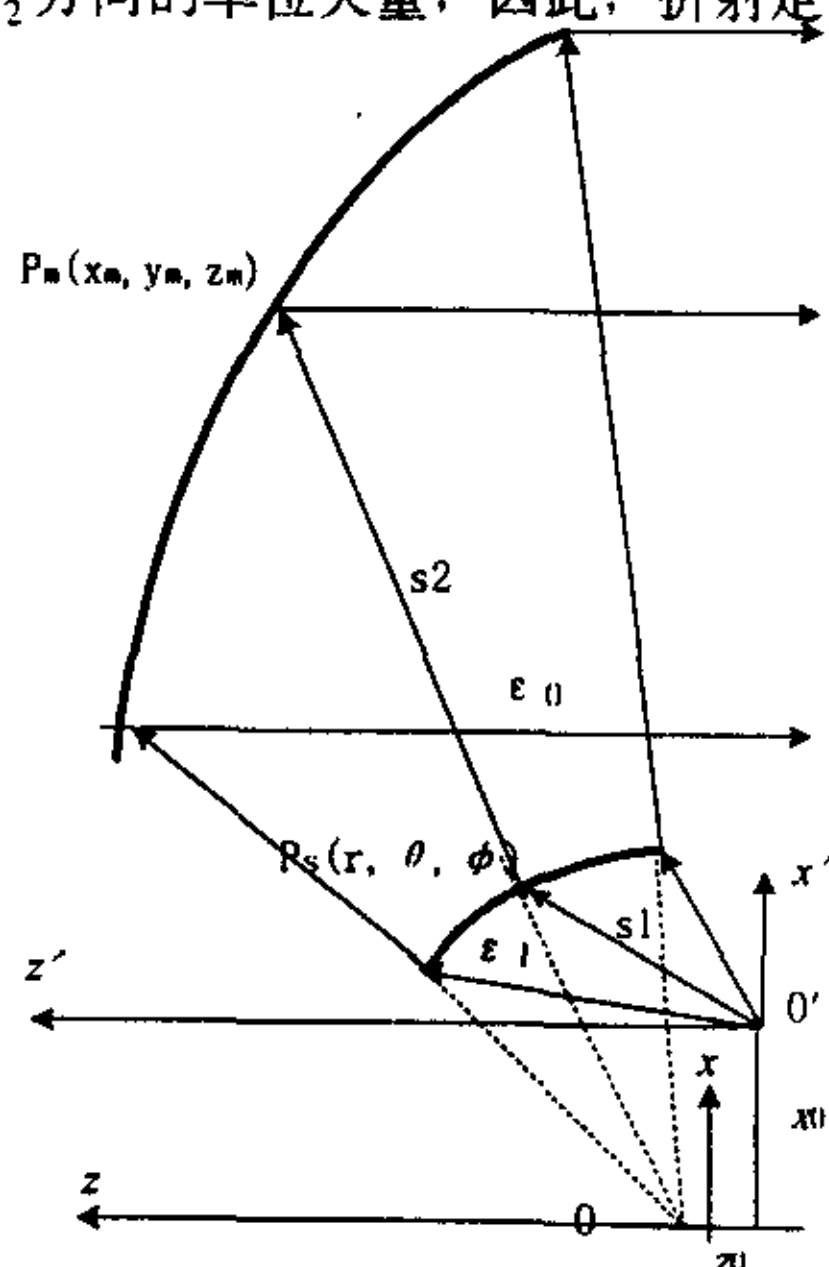


图 3 介质加载馈源的单反射面天线的布局

考虑到天线口面发出的射线是沿 z 方向的, 根据几何光学的等光程定律, 介质加载馈

源的单反射面天线系统中各射线的光程是相等的，光程 R 可以表示为：

$$R = \sqrt{\epsilon_{r1}} s_1 + s_2 - z_m = \sqrt{\epsilon_{r1}} r + s_2 - z_m = c \quad (11)$$

3.2 反射面形状确定情况下介质透镜的赋形

反射面形状已经确定的情况下，单偏置反射面的赋形变成只对介质透镜表面赋形的部分赋形的研究，具体地说，是在主面已知的情况下对介质副面的部分赋形。这个方面的研究，我们没有查到相关的报道。

由于部分赋形只是对介质透镜的表面进行，可调整的参变量比自由赋形少了一个，赋形后的不一定能达到优化目标，只能通过调整馈源和反射面之间的相对关系来优化，使尽量接近目标函数。如图 3 所示。其中，馈源不在反射面天线的焦点 O 上，而是位于点 O' 上，该点与 O 在 x 和 z 方位上偏离了一定的距离。

根据部分赋形的理论，在天线的反射面已经确定的情况下，反射面表面的反射定律就确定了，因此，在赋形时反射面表面的反射方程必须使用，而介质面上的折射方程等光程两个方程只有一个独立的，一般选用等光程方程，因为它的表达式相对简单一些。

在以 O 点为原点的 xyz 坐标系中，反射面的方程可表示为：

$$x^2 + y^2 = 4f(f - z) \quad \text{或者} \quad z_m = f - \frac{x_m^2 + y_m^2}{4f} \quad (12)$$

因此，
$$\frac{\partial z_m}{\partial x_m} = -\frac{2x_m}{4f} = -\frac{x_m}{2f} \quad \frac{\partial z_m}{\partial y_m} = -\frac{2y_m}{4f} = -\frac{y_m}{2f} \quad (13)$$

$$s_2 = \sqrt{[x_m - r(\sin \psi_0 \cos \psi + \sin \psi \cos \psi_0 \cos \xi) - x_0]^2 + (y_m - r \sin \psi \sin \xi)^2 + [z_m - r(\cos \psi_0 \cos \psi - \sin \psi_0 \sin \psi \cos \xi) + z_0]^2} \quad (14)$$

$$-\frac{x_m}{2f} = \frac{x_m - r(\sin \psi_0 \cos \psi + \sin \psi \cos \psi_0 \cos \xi) - x_0}{s_2 - [z_m - r(\cos \psi_0 \cos \psi - \sin \psi_0 \sin \psi \cos \xi) + z_0]} \quad (15)$$

$$-\frac{y_m}{2f} = \frac{y_m - r \sin \psi \sin \xi}{s_2 - [z_m - r(\cos \psi_0 \cos \psi - \sin \psi_0 \sin \psi \cos \xi) + z_0]} \quad (16)$$

考虑到消除交叉极化的圆对称转换原则的关系式，可以得到馈源介质面上点的 ψ 坐标和反射面上点的 R 坐标之间的关系。根据式 (11)、(15)、(16) 和式 (13)、(14) 在介质介电常数已知的情况下，可以确定出馈源加载介质面的形状函数，通过调整 x_0 、 z_0 和 ψ_0 优化赋形后天线的交叉极化特性，使交叉极化最优。求解过程只用进行二次方程组的计算，没有微分方程的计算，计算过程比较简单。

4 结 论

根据双反射面天线的部分赋形理论补偿反射面产生的交叉极化。具体方法是在馈源前加载介质层，把介质层作为单偏置抛物面天线的另一个面，构成双面天线系统，通过对这个介质面的赋形和布局调整，降低天线的交叉极化。在这个一体化设计过程中，主要解决

了几个问题：一是根据金属双反射面天线部分赋形的概念，提出了对介质面赋形补偿单偏置抛物面天线交叉极化天线的一体化馈源设计的理论和方法；二是推广了均匀介质中两个金属反射面上赋形方程的独立性，证明了在有介质存在的情况下，介质-介质交界面上的折射定理、天线反射面上的反射定理以及电波传播的等光程方程三者之间只有两个是独立的，从而可以根据馈源和反射面的布局列出方程确定介质层的形状；三是计算的过程没有微分方程的运算，计算过程简单。

参考文献

- [1] C. Dragone, "Method and apparatus for substantially reducing cross polarized radiation in offset reflector antennas", US patent 4144535, 1979.
- [2] K. Nakamura and M. Ando, "A full-wave analysis of offset reflector antennas with polarization grids", IEEE T-AP v 36, n2, 1988.2, pp164-170.
- [3] M. A. J. Van de Griendt and V. J. Vokurka, "Polarization grids for application in compact antenna test ranges", Proceedings of 15th AMTA conference, 1993, 10.
- [4] G. Bjøntegaard and T. Pettersen, "An Offset Dual-Reflector Antenna Shaped from Near-field Measurements of the Feed Horn: Theoretical Calculations and Measurements", IEEE T-AP, 1983, v31, n6 p973-977.
- [5] 章贤钟, "双反射面天线部分整形的新技术", 博士学位论文, 清华大学, 1990.
- [6] 章日荣, "消除交叉极化的偏置双镜天线", 无线电通信技术, 1985, p21-47.
- [7] 章日荣等, "圆口径低交叉极化改进型偏置双镜天线", 中国科学, 1986, n1.
- [8] 杨可忠, 杨智友, 章日荣, "现代面天线新技术", 北京, 人民邮电出版社, 1993
- [9] 瞿福贞, 裴文科, "仅修正副反射面的卡塞格伦天线的设计", 跟踪雷达, 1983, v2, p1-7
- [10] 李红卫, "改善天线旁瓣的副面再次赋形设计", 无线通信技术, 1998, n3.
- [11] Erik Lier and S. A. Skyttemyr, "A shaped Single Reflector Offset Antenna with Low Cross-Polarization Fed by a Lens Horn", IEEE T-AP, 1994, v42, n4, p478-483.
- [12] 章日荣, "介质透镜和副镜双赋形的环焦反射镜天线", 无线电通信技术, 1991, v17, n1, p28-40.
- [13] 章日荣, "锐波束环焦反射镜天线通论", 无线电通信技术, 1991, v17, n2, p71-79.
- [14] 洪家才, "有关馈源几个问题的研究", 博士学位论文, 北京航空航天大学, 2002.6.

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>