

网状平面抛物面天线特性分析及实验研究

郑雪飞

南京电子技术¹ 研究所, 南京 210013

Email: zxf14s@sina.com

摘要: 本文介绍了平面抛物面天线的基本特点和分析方法。采用矩量法计算了十字交叉辐射单元的散射特性, 并给出单元的移相曲线。对天线基本特点作了详细分析, 总结出该类型天线的设计方法。制作了一个 2 米口径的网状试验天线, 测试结果与计算结果基本吻合。

关键词: 平面抛物面天线 特性 散射 阵列

一、前言

平面抛物面天线是用薄平或共形的阵列反射面来代替抛物面的一种新型反射面天线。这种天线利用反射面阵列中的天线单元同时完成辐射器和固定移相器的作用, 使抛物面天线实现平面化或共形化。平面抛物面天线可以实现极化变换、极化旋转、多波束、波束扫描与波束赋形等功能。在结构上天线易于设计成可展开的和轻量化的大口径天线, 便于运输和安装。另外, 将反射面设计成网状还可以极大地降低风负荷。该形式的天线已成为军用、民用两领域的候选对象, 可广泛用于国防雷达、通信系统的各个领域。本文主要研究用十字形交叉振子作辐射单元的网状平面抛物面天线的基本特性、分析方法和设计技术。

二、辐射元幅相特性

1. 辐射元移相特性

以双层十字形交叉振子作阵中辐射元的平面抛物面天线可以在同一个面阵上实现多种极化, 如水平极化、垂直极化、左旋圆极化或右旋圆极化等。由于水平极化与垂直极化之间的极化隔离度较大, 对十字形交叉振子的散射特性只需计算水平或垂直线振子即可。

我们采用矩量法求解辐射元的散射场, 求解模型如图 1 所示, 前一根振子我们称之为激励振子, 用 L_e 表示, 后一根振子称为反射振子,

用 L_r 表示, 振子间距为 d 。两个振子平行于 Z 轴方向关于 XOY 平面对称放置, L_r 放在 Z 轴上, L_e 放在 L_r 正前方与 X 轴正半轴相交。一均匀平面波以 (θ, ϕ) 方向入射、沿 θ 方向极化照射到振子单元上, 在坐标 $(1, 0, 0)$ 处提取振子散射的幅相数据。

辐射振子取 8 种长度, 相邻编号振子之间的移相量相差 45° , 因此 8 种振子相当于 3 位移相器。

十字振子的交叉臂之间移相量相差 90° , 用来实现圆极化。各种振子臂长度根据散射特性计算结果给出, 并保证上述的移相关系。振子间距取 $\lambda/8$ 。

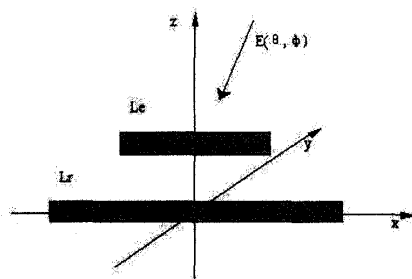


图 1 线振子辐射元计算模型

图 2 中示出了 $\phi=0^\circ$ 时, 辐射元反射波的幅相特性随平面波入射角 θ 的变化情况。从图中可以看出: 相位随激励振子长度 L_e 增加单调下降, L_e 在 $0.18\lambda \sim 0.6\lambda$ 范围内, 相位变化约

340° ;相位随 θ 变化不大, 当 θ 偏离正入射小于 45° 时, 引起的相位变化小于 20° ;幅度随 θ 变化较大, 在 θ 偏离正入射 45° 的变化范围内, 最大变化比为 2, 变化规律与半波天线单元波瓣一致。

图 3 中示出了 $\phi=60^\circ$ 时, 辐射元反射波的幅相特性随平面波入射角 θ 的变化情况。从图中可以看出:相位随 ϕ 变化较小, 幅度变化规律与半波天线单元波瓣一致。

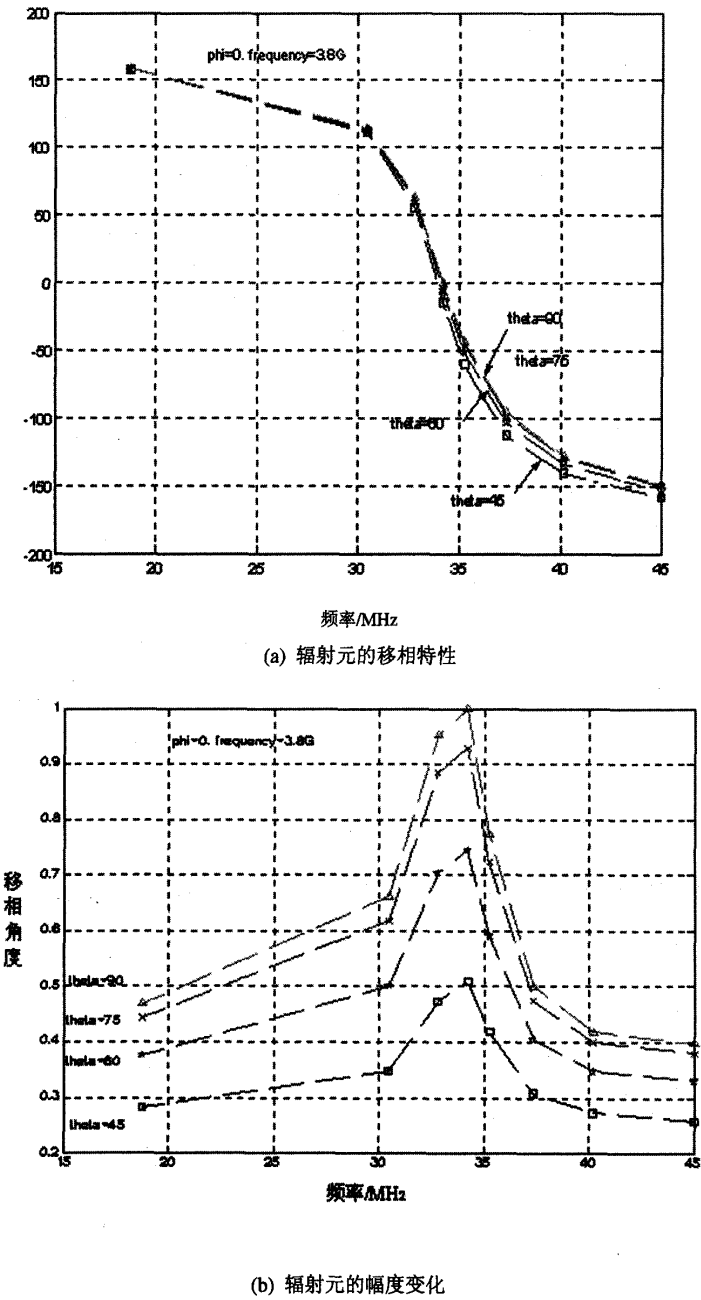
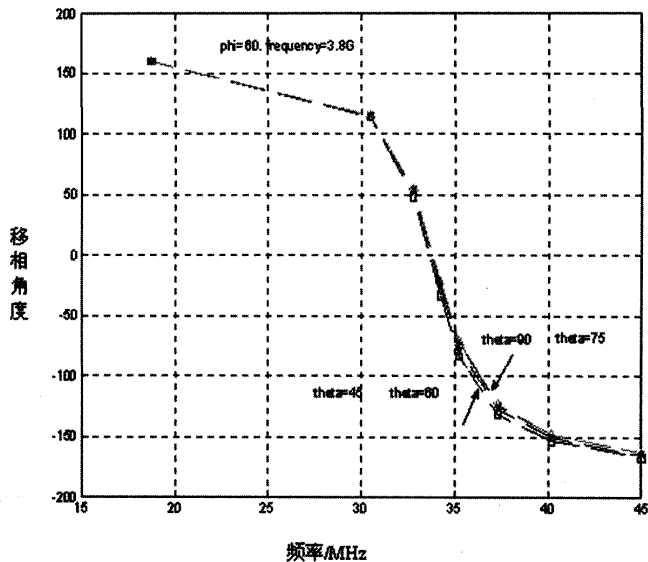
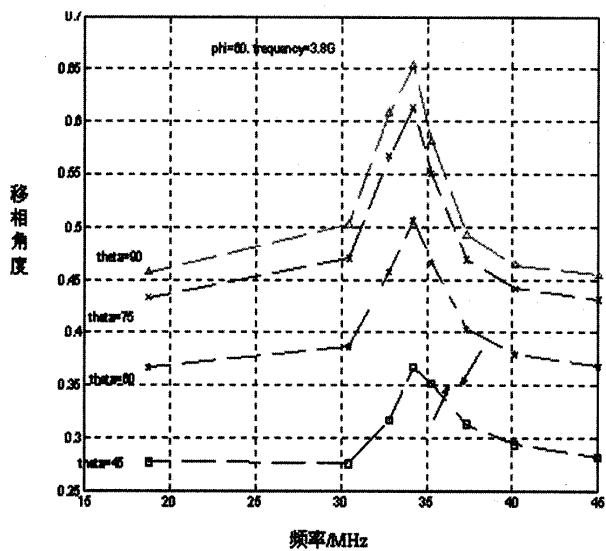


图 2 $\phi=0^\circ$ 时, 辐射元的幅相特性曲线



(a) 辐射元的移相特性



(b) 辐射元的幅度变化

图3 $\phi=60^\circ$ 时, 辐射元的幅相特性曲线

2. 互耦对辐射元散射特性的影响

对 5×5 阵列中心单元特性进行了计算。由于单元间存在互耦, 与孤立单元的特性相比, 阵中单元的移相特性有所变化。图4示出了 $\phi=0^\circ$ 时, θ 分别为 60° 和 90° 时辐射元的移相曲线, 与图2对比可见阵中辐射元的移相量随 θ 的变化在频带内出现了整体平移。 $\theta=90^\circ$ 时

移相量较 $\theta=60^\circ$ 时减小大约 30° 。幅度变化规律与孤立单元相同。

3. 辐射元的频率特性

从分析计算的结果可知, 辐射元的移相特性与频率存在特定关系。图5示出了8种尺寸的辐射元的频率响应特性曲线(以中心频率归一化)。从图中可以看出与谐振长度相近的振子

(3、4、5 号单元) 在频带内相位比较稳定，移相误差小于 20 度；而与谐振长度相差大的振子在边频上相位偏差较大，1 号和 8 号振子移相偏差接近 100 度，且在低频端相位滞后，在高频端相位超前。

三、天线阵面设计

以下分析计算均基于上述 8 种辐射元进行。通过理论分析，平面抛物面天线需考虑相位补偿、馈电色散、频带宽度及焦径比的选取等问题。

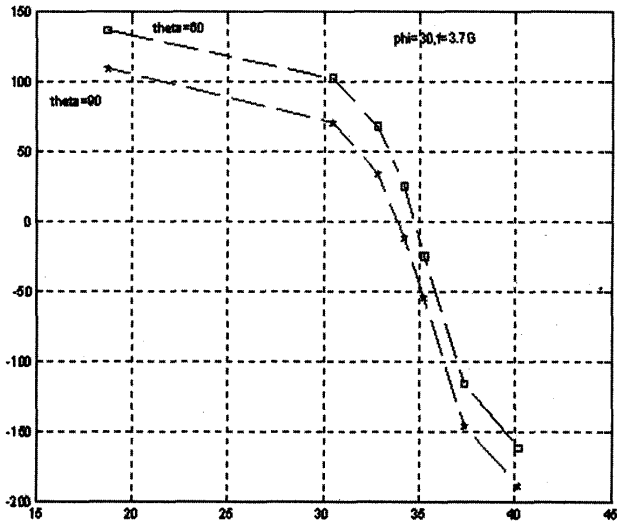


图 4 阵中辐射元特性

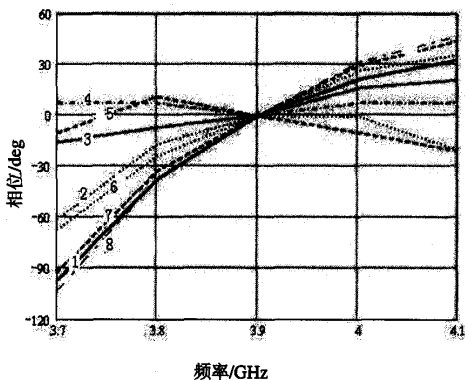


图 5 辐射元的频率响应特性

1. 相位补偿

图 6 所示为天线中心剖面的示意图，F 为虚线所画抛物线的焦点，同时也是平面抛物面的焦点。

由抛物面天线原理可知，从馈源发出的电磁波，在各个方向上经反射面反射后到达焦平面上，电磁波的空间路径均等长且在焦平面上同相。而将抛物面变为平面之后，各个方向上电磁波的空间路径不再相等，即存在空间程差。

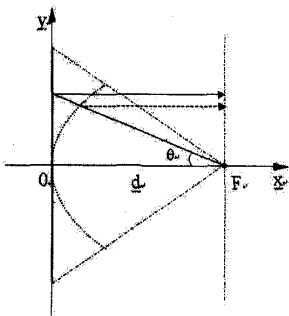


图 6 天线中心剖面示意图

空间程差是馈源到反射面的距离 L 和电波入射角度 θ 的函数，关系式如下：

$$\Phi = -kL(\sec\theta - 1) \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ ，为波数。这个程差可通过辐射元的移相进行补偿。由此可得平面抛物面天线反射面阵列中每个天线单元的相位补偿量，即单元移相量，移相值由下式给出

$$\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda}(\sec\theta - 1) \quad (2)$$

2. 馈电色散

馈电程差的存在将带来色散问题，这是导

致平面抛物面天线工作频带较窄的主要原因之一。设天线为圆形口径，直径为 D ，则馈源到阵面的最大入射角为

$$\theta_m = \tan^{-1} \frac{D}{2L} \quad (3)$$

相应地，最大馈电程差为

$$\Phi_m = \frac{2\pi L}{\lambda} (\sec \theta_m - 1) \quad (4)$$

设中心频率为 f_0 ，工作频带宽度为 $2\Delta f$ ，则在边频工作时，由于色散引起的阵列边缘相位偏差为

$$\Delta \Phi_m = \frac{2\pi \Delta f}{c} (\sec \theta_m - 1) \quad (5)$$

3. 频带宽度

由(5)式可得天线的频带宽度

$$2\Delta f = \frac{c \cdot \Delta \Phi_m}{\pi (\sec \theta_m - 1)} \quad (6)$$

另外，天线的频带宽度还与列中辐射元的散射特性有关。设辐射元在边频工作时等效移相偏差为 $\Delta \Phi_e$ ，则天线的频带宽度估计式可改写为

$$2\Delta f = \frac{c(\Delta \Phi_m + \Delta \Phi_e)}{\pi (\sec \theta_m - 1)} \quad (7)$$

其中， $(\Delta \Phi_m + \Delta \Phi_e)$ 的值可根据天线副瓣

指标给出一个适当的值进行估算。从上式中还可以看出，天线的频带宽度 $2\Delta f$ 与 $\sec \theta_m$ 成反比关系，而由(3)看出 $\sec \theta_m$ 与焦距比 L/D 为正比关系，因此， $2\Delta f$ 与 L/D 成正比关系，即平面抛物面天线的焦距比越大，其工作频带越宽。

图7给出一个色散对天线方向图影响的计算结果。程差引起的色散在高低频端引起天线主瓣抬肩膀现象和第一副瓣抬高，单元频率响应引起第一副瓣进一步抬高。

图8分别画出了波瓣宽度、方向性系数、最大副瓣电平与频率之间的关系曲线，计算参数为中心频率 $f_0=4\text{GHz}$ ，焦距比 $F/D=0.5$ ，口径为 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 。其中，实心线为仅考虑存在波程差的色散影响，虚线为考虑波程差和单元频率响应共同的色散影响。从计算结果可以看出，单元频率响应特性对波瓣宽度的影响不大，而对方向性系数和副瓣电平有很大影响，使得增益带宽和副瓣带宽明显变窄。在边频上，波瓣宽度快速增大、方向性系数快速降低、最大副瓣电平明显抬高。如果允许方向性系数在边频下降 2dB ，则天线增益带宽约为 9% 。如果要求副瓣电平小于 -20dB ，则副瓣带宽约为 12% ，此时边频增益下降约 3dB 。

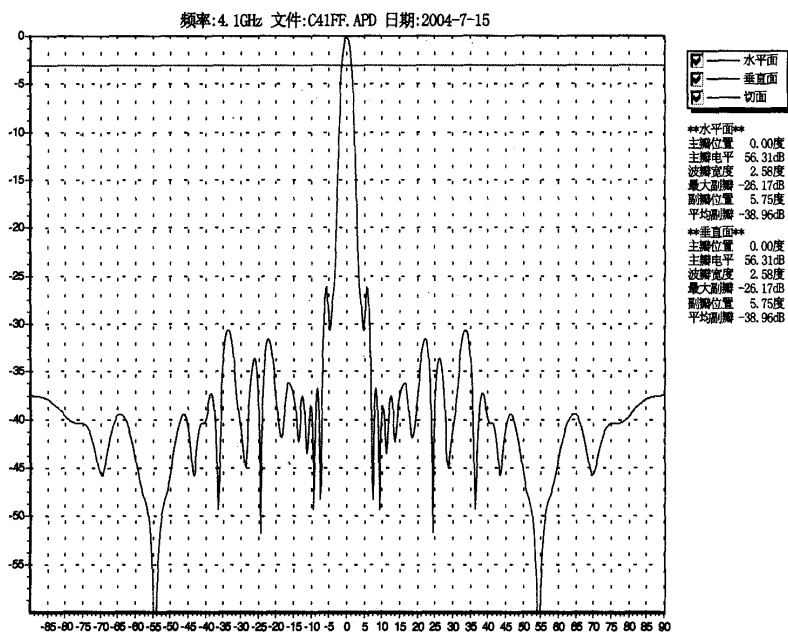


图7 色散对天线方向图的影响

$f=4\text{GHz}$, 天线直径=2m, 焦距比 $F/D=0.5$

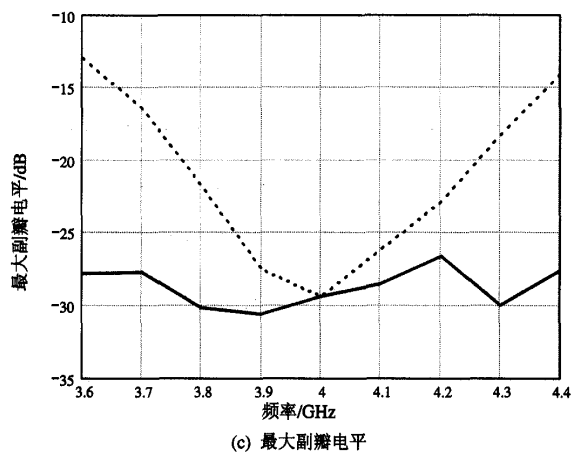
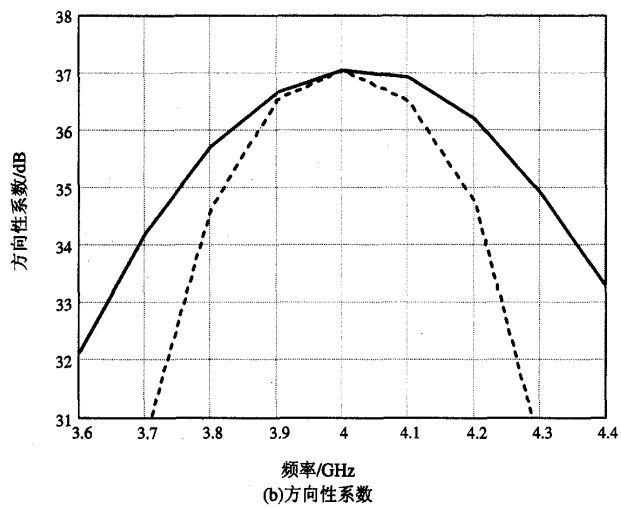
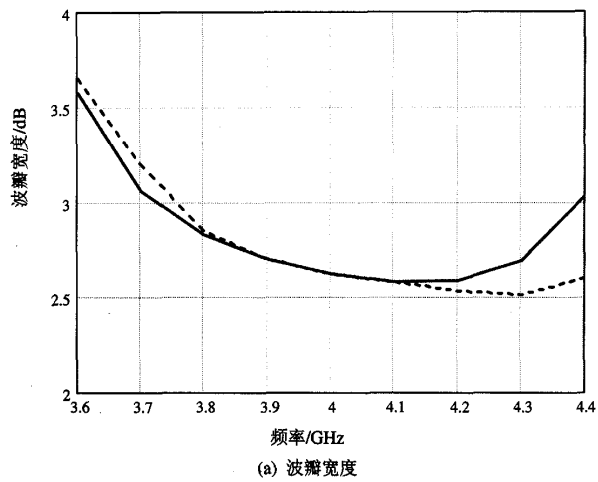


图 8 波瓣宽度、方向性系数

四、试验结果

1. 试验天线

试验天线采用双层凯夫拉尔纤维网控制的平面网块组阵，两层凯夫拉尔纤维网间距为8mm，网格尺寸为45mm×45mm，如图9所示。

辐射元由两个十字振子组成，分别粘在前后两层纤维网上。十字振子臂厚度为0.5mm，宽度为1.5mm。根据相位补偿量分布将8种辐射元粘在阵面上。

2. 测试结果

采用平面近场测试了3.7GHz~4.3GHz共七个频率点。根据测试结果，在3.9GHz~4.2GHz约7.5%的频带内，E面和H面最大副瓣电平均优于-18dB；在此频带外，高低频最大副瓣电平大部分抬高；和最大副瓣电平的频率

特性波瓣宽度与理论值相近，在此频带外，高低频波瓣宽度均快速变宽；天线方向性系数介于33.76~34.71之间，起伏范围小于1dB，较理论值小2dB左右。在此频带外，高低频方向性系数均快速减小；

平均副瓣电平在高频端（4.3GHz）快速增大。

从上述各指标综合分析，在频带内各项指标均与理论值相近，而在此频带外各项指标有快速变差的趋势，因此可以确定试验天线的工作频带为3.9GHz~4.2GHz，即频带宽度约7.5%。图10为中心频率的水平面和垂直面实测波瓣，水平面和垂直面波瓣宽度分别为2.49°和2.48°，最大副瓣电平分别为-19.4dB和-20.3dB。

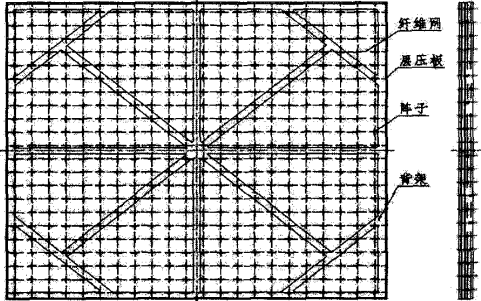


图9 平面抛物面网块示意图

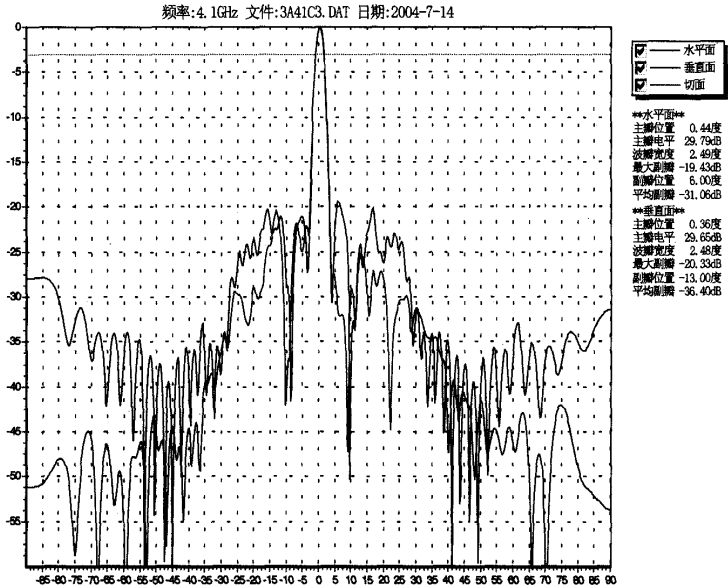


图10 水平面和垂直面测试波瓣（中心频率）

五、结论

试验天线测试结果与理论计算结果基本吻合,一方面说明辐射元的移相效果良好,达到了设计目的,另一方面验证了分析方法和计算结果的正确性。应用文中给出的计算结果和设计方法,通过进一步研究,可以开发出多种形式和多种功能的平面抛物面天线。

参考文献

- [1] FLAPS TM Reflector Antennas, Malibu Rsearch, 1993.
- [2] E. A. Parker and S. M. A. Hamdy, "Rings as elements for frequency selective surfaces," Electron. Lett., vol. 17, no. 17, pp. 612-614, Aug. 1981.
- [3] Huder, B and Menxel, W, March 1988, 'Falt printed reflector antenna for mm-wave applications', Electron, Lett., vol.24, no.6, 318-319.
- [4] D. N. Black and J. C. Wiltse, "Millimeter-wave characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates," IEEE Trans. Micro-wave Theory Techn., vol.Mtt-35, no. 12, pp. 1122-1128, Dec. 1987.
- [5] Griffiths, H D, Vernon, A M and Milne, K, April 1989, 'Planar Phase-Shifting Structures for Steerable DBS', ICAP'89, 45-49.
- [6] J. Shaker and L. Shafai, "Analysis of multiresonant frequency selective surfaces", IEEE, 1993, pp. 1948-1951.

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>