

位置敏感探测器 PSD 在雷达天线 稳定平台测试中的应用

戴明宇, 刘万富, 张 平

(中科院电子所, 北京 100080)

摘要: 为了满足对机载合成孔径雷达 (SAR) 天线稳定平台动态性能的高精度测试的目的, 采用基于二维 PSD 的测量系统测试平台。介绍了该测试系统测量雷达天线微小转角的原理、测试系统的结构、PSD 器件的基本原理, 数据采集及处理系统的硬件和软件实现。解决了 PSD 器件实验中的关键技术问题。该系统能精确真实地检测天线平台台体和平台控制装置的主要技术指标, 特别是角位置伺服回路跟踪精度时间常数等某些动态指标。实现了雷达稳定平台的自动化测试。

关键词: PSD; 角位置测量; 雷达天线; 电控转台

Application of Position Sensitive Detector in Testing of SAR Antenna Stabilization

Dai Mingyu, Liu Wanfu, Zhang Ping

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: For the precise test of the dynamic performance of SAR antenna stabilization platform on plane, the test system basing on Position Sensitive Detector is applied to test the platform. The test theory of the system in testing slightly rotational angle of SAR antenna, the construction of the test system, the principium of PSD, the hardware and software implement of signal detection and processing system are introduced. The critical technique in PSD testing is solved. The system can precisely measure and evaluate the major technical indexes of antenna platform and its control equipment, especially the dynamic indexes, such as angle location servo loop track precision index etc. High performance automatic test for platform is realized

Key words: PSD; measurement of angle; SAR antenna; simulator

0 引言^[1-4]

近年来, 光电位移检测技术的研究十分活跃, 已成为测量技术领域的一个热点。光电位置敏感器件 PSD (Position Sensitive Detector) 是一种应用于光电传感器的半导体位置敏感元件, 与 CCD 图像传感器相比, PSD 敏感表面连续分布, 以输出模拟信号来反映入射点能量重心的位置, 因此分辨率高, 误差小。且 PSD 器件具有体积小、噪声低、光谱响应范围大、响应速度快、价格低、应用电路简单, 不需要复杂光学聚焦系统的优点, 因而广泛应用于光电位置测量、光学遥控、位移和振动的检测与监控、激光准直、机器人视觉、方向探测、三维位置测量系统等领域。

1 测试系统结构及 PSD 测试系统原理

SAR 要求雷达天线平台作匀速直线运动^[5], 而飞机的飞行常常偏离航线, 出现横滚、俯仰和偏流等姿态的变化, 这些非理想运动将会导致 SAR 在 LOS 方向出现距离误差、使方位向采样不均匀, 导致相位误差, 进而引起 SAR 图像质量下降, 如分辨力下降, 图像对比度下降, 甚至无法成像。雷达天线伺服平台对雷达天线进行运动补偿, 进而保证雷达姿态稳定。

本雷达稳定平台的自动测试系统将平台安装在模拟载机角运动的二维电控转台上, 测试雷达稳定平台的伺服系统的动态性能, 并通过实时监测平台的输出数据检测故障。它从结构上可以划分为三个部分:

- (1) 模拟载机角运动的二维电控转台;
- (2) 测量稳定平台实际姿态的 PSD 激光测量系统^[6];
- (3) PXI 虚拟仪器设备。

其中的虚拟仪器设备主要实现电控转台的控制、平台的监测与故障诊断以及平台角位置伺服环的功能测试以及数据处理和数据显示软件。为了实时跟踪天线转动和有效观察天线响应的参数, 通过虚拟仪器控制放置天线平台的电控转台产生模拟载机实际姿态的角运动, 采集转台实际姿态后转换成模拟惯导信号输入给平台, 然后通过安装在天线上的激光器发出激光束

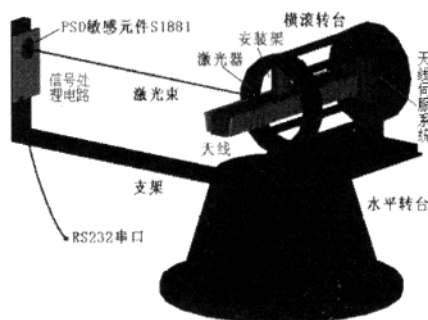


图1 激光测量装置原理图

收稿日期:2004-05-14; 修回日期:2004-06-06。

作者简介:戴明宇(1976-),男,辽宁省凤城人,工程师,硕士,主要从事雷达测控方向的研究。

张平,男,研究员,博导,主要从事雷达测控方向的研究。

将天线的角运动信号转化为 PSD 位置探测器件上探测的位置信号, 精确测量天线平台的响应。

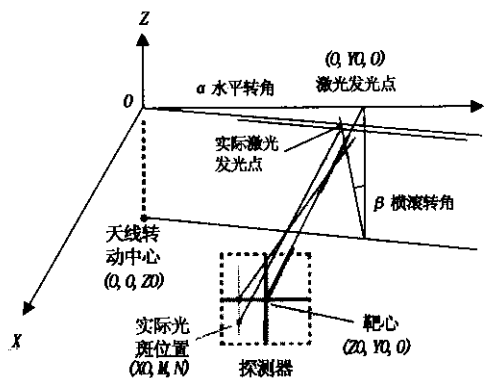


图 2 测量系统坐标系

如图 2 所示, 天线的转动中心位于坐标 $(0, 0, Z_0)$, 此位置为雷达天线的方向关节中心; 激光器安装在天线上表面距离天线中心轴 Y_0 位置, PSD 光靶安装在激光发光方向上, 中心位置为 $(X_0, Y_0, 0)$ 。各参数如下:

- Z: 方位轴;
- Y: 横滚轴;
- X_0 : 靶心和激光原始发光点的距离 (参考值 0.6 m);
- Y_0 : 激光器和水平转动轴的距离 (参考值 0.1 m);
- Z_0 : 激光器和垂直转动轴的距离 (<0.1 m);
- $M-Y_0$: 光斑距离靶心的水平距离 H ;
- N : 光斑距离靶心的垂直距离 V ;
- α : 水平方向逆时针转动角;
- β : 横滚方向逆时针转动角。

设天线在转台运动后发生了 α 和 β 角度的转动, 顺时针转动取负值。则激光器的发光点的空间坐标变为: $(-Z_0 \sin\beta \cos\alpha - Y_0 \sin\alpha, -Z_0 \sin\beta \sin\alpha + Y_0 \cos\alpha, Z_0(1 - \cos\beta))$ 。

激光束空间法矢量变为 $(\cos\alpha \cos\beta, \sin\alpha \cos\beta, -\sin\beta)$ 从而使激光光束的空间直线方程为:

$$\frac{X + Z_0 \sin\beta \cos\alpha + Y_0 \sin\alpha}{\cos\alpha \cos\beta} = \frac{Y + Z_0 \sin\beta \sin\alpha - Y_0 \cos\alpha}{\sin\alpha \cos\beta} = \frac{Z - Z_0(1 - \cos\beta)}{-\sin\beta}$$

将 PSD 光靶的空间平面方程 $X = X_0$ 与上式联立得到激光束在光靶上的光点位置坐标为: $(X_0, X_0 \tan\alpha + Y_0 / \cos\alpha, -X_0 \tan\beta / \cos\alpha - Y_0 \tan\alpha \tan\beta + Z_0(1 - 1 / \cos\beta))$, 由此可得 PSD 敏感面上相对于 PSD 中心的水平位移 H 和垂直位移 V 为:

$$H = M - Y_0 = X_0 \tan\alpha + \frac{Y_0}{\cos\alpha} - Y_0$$

$$V = N = -\frac{X_0 \tan\beta}{\cos\alpha} - Y_0 \tan\alpha \tan\beta + Z_0(1 - \frac{1}{\cos\beta})$$

将万能公式代入上式得:

$$H = X_0 \frac{2 \tan \frac{\alpha}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\alpha}{2}} + Y_0 \frac{2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\alpha}{2}}$$

$$V = -\frac{2 \tan \frac{\beta}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\beta}{2}} (X_0 \frac{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\beta}{2}} + Y_0 \frac{2 \tan \frac{\alpha}{2}}{1 - \tan^2 \frac{\beta}{2}} + Z_0 \tan \frac{\beta}{2})$$

由此可知, PSD 敏感面上的水平位移仅由水平转角 α 引起, 而其垂直位移由水平转角 α 和横滚转角 β 共同引起。由于水平转角 α 和横滚转角 β 很小, 一般小于 0.1° , 即约 0.001745 rad, 所以近似有:

$$(2Y_0 + H)\alpha^2 + 4X_0\alpha - 4H = 0$$

解出水平转角 α 为:

$$\alpha = \frac{2X_0(\sqrt{1 + \frac{H(2Y_0 + H)}{X_0^2}} - 1)}{2Y_0 + H} \approx \frac{2X_0 \frac{H(2Y_0 + H)}{2X_0^2}}{2Y_0 + H} = \frac{H}{X_0}$$

同理有:

$$V = -\beta(1 + \frac{\beta^2}{4})[X_0(1 + \frac{\alpha^2}{4})(1 + \frac{\beta^2}{4}) + Y_0\alpha(1 + \frac{\alpha^2}{4}) + Z_0 \frac{\beta}{2}]$$

因为 α 和 β 很小, 上式舍去 α 和 β 的高次项, 解出:

$$\beta \approx -\frac{V}{X_0}$$

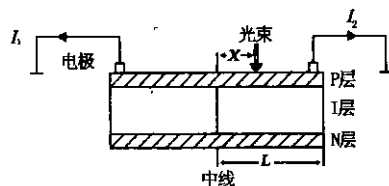


图 3 PSD 截面的结构图

天线平台的转角 α 和 β 越大, 则 α 和 β 的高次项对 PSD 上光点的位移 H 和 V 的影响越大, 所以考虑缩放 α 和 β 取最大参考值时, 即设 $\alpha = \beta = 0.5^\circ$, 计算 α 和 β 的所有高次项在 H 和 V 中占据的比例, 得转角 α 和 β 的最大误差为:

$$e(\alpha) = 0.073\%$$

$$e(\beta) = 0.22\%$$

2 PSD 器件的工作原理^[7]

PSD 器件由 P^+IN 构成, 利用其横向光电效应测量光信号。具有高的光电转换率, 灵敏度和响应速度。若将两个信号电极的输出电流 I_1 和 I_2 检出作如下处理有:

$$P_X = (I_2 - I_1) / (I_2 + I_1) = X/L$$

即 P_X 只与光点的位置有关。

当有背景光电流 I_0 时有:

$$P_X = (I_2 - I_1) / (I_2 + I_1) = I_0 \times X / ((2I_0 + I_2 + I_1) \times L)$$

3 PSD 测试系统硬件软件设计

PSD 探测器直接输出的是电流信号, 为了得到光点的位置信息, 还需要进行信号处理, 其结构如图 4 所示^[8-9]。

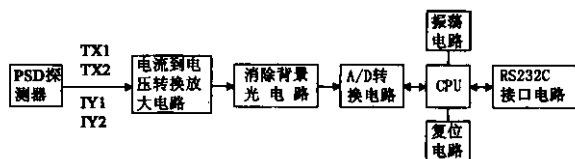


图 4 PSD 硬件处理电路框图

其主要由 5 部分组成：电流—电压转换电路、消除背景光电路、A/D 转换、CPU 处理电路和串口电路。CPU 主要完成 X、Y 两个方向上电压的加减运算和除法运算，得到光点在 X、Y 方向的位置值。RS232 串口电路用于与微机通信。

消除暗电流和背景光电路：采用采样—保持法消除，其基本原理是将激光束用机械调制方法调制成脉冲光，当激光照到 PSD 表面时，通过控制信号 P1、P2，使采样—保持器 S/H A 处于采样状态，而 S/H B 处于保持状态，反之当激光照不到 PSD 表面时，通过控制信号 P2、P1，使采样—保持器 S/H B 处于采样状态，而采样—保持器 S/H A 处于保持状态。经过采样保持器后，通过减法器运算得出消除了背景光和暗电流的输出信号。采样—保持器采用 LF398，激光调制频率和 P1、P2 的频率取 200 Hz，5 ms 测量一次光斑位置。

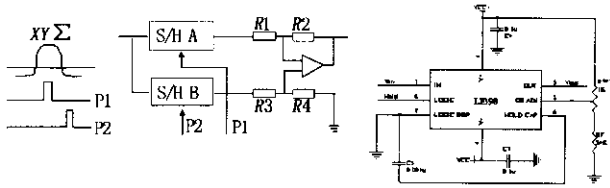


图 5 采样—保持法消除背景光原理图

系统复位后进行初始化，启动 CPU，在外部触发信号到来后，启动 A/D 采样，它将不间断的向 FIFO 存储器中写入数据，直到写入 REW 中断采样。从开始启动后，需反复查询 FIFO 是否半满，如果半满则查询 FIFO 是否溢出，如果没溢出则从 FIFO 中读出数据进行运算，运算结果编码后写入发送缓冲区 SBUF，通过串口中断发送数据。如果 FIFO 溢出则说明部分数据丢失，采集失败，报错退出。其流程如图 6 所示。

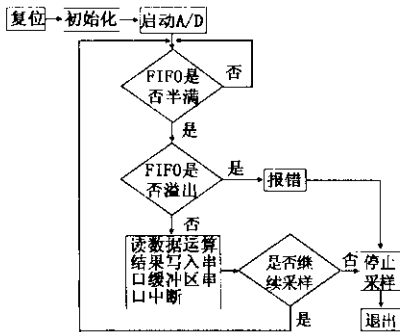


图 6 程序框图

4 PSD 测试系统的关键技术

光源的波长要与 PSD 的响应波长相匹配，光源的波长应尽可能接近 PSD 的峰值响应波长 920 nm，此时 S1881 的灵敏度最高，但因其为近红外波段，只能用黑体实现，而黑体一般体积较大，且因为该波段不可见而给测试系统的调试和使用带来不便。实验中采用波长 700 nm 左右的红光半导体激光器。由照射灵敏度 0.6 A/W，饱和输出电流 0.5 mA 和激光器转换效率 5%—20%，可计算出激光器功率应选择为 5~20 mW，为保证信噪比高可适当提高激光器功率。

要注意暗电流与背景光的干扰^[10]，因 S1881 的响应区间为 320~1100 nm，又因为 PSD 器件无光照时也可能有暗电流

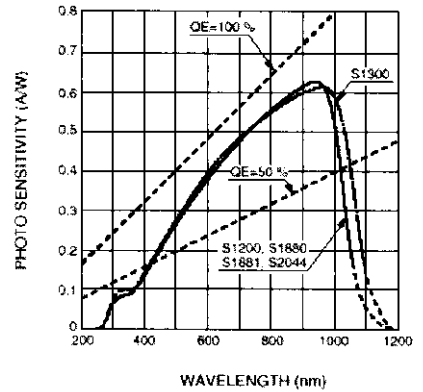


图 7 PSD 对不同波长的光响应曲线

输出，前人从实验结果和理论分析得知，随着背景光的不断加强，同一点的位置也随之向 PSD 中心原点接近。所以要消除背景光和暗电流对 PSD 位置探测精度的影响。消除背景光的方法有光学法和电学法。光学法是在感光面上加一与入射光波长匹配的滤光片以滤掉背景光。电学法可以先检测出信号光源熄灭后的光强的大小，然后点光源，将检测出的信号减去背景光的成分。或采用调制脉冲光源，对输出信号进行锁相放大，同步检波的方法滤去背景光的成分。

PSD 的工作环境，单色光辐射度 $M_\lambda(\lambda, T)$ ，对其在 PSD 响应区间积分得出环境对 PSD 器件总辐射度 $M_e(T)$ ，它取决于辐射体的温度 T ，辐射满足普朗克定律，温度越高，辐射越强，且辐射峰值由红外向近红外移动。温度上升 1℃，暗电流增大 1.15 倍。所以在 PSD 器件周围不能有温度高的物体以保证测量误差尽可能小。

PSD 的线性范围，S1881 在图 8 中 A 区的探测误差为 150 μm ，B 区的探测误差为 400 μm ，这是因为实际光点有一定面积，当光点打在 PSD 器件边缘时，部分光没有打在 PSD 器件的感光面上而使被测光点的重心发生了变化，从而使测量值产生误差。因而实验中应尽可能使光点在 A 区移动。因半导体激光器的远场发散角一般较大，为 30 多度，且光斑能量分布满足二维高斯分布，实验中采用经聚焦后的光斑照射 PSD 感光面。

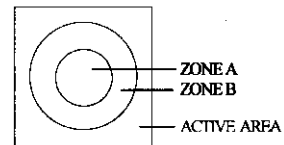


图 8 PSD 的线性范围

5 结束语

如何测量平台运动的角位置是雷达天线稳定平台测试中的技术难点之一，针对测量对象的特性——隔离扰动，相对于地面仅有微小角运动（根据某型机载 SAR 稳定平台技术参数，该波动小于 0.1°），我们引入的独立于雷达稳定平台的 PSD 测试系统使用日本滨松公司的高分辨率的光敏位置测量器件 PSD S1881 作为测量器件，

(下转第 188 页)

叫前导零位置值 (Leading One's Position value) 即 LOPV 值。LOPV 电路就是完成这种检测的电路, 下面是对 LOPV 算法进行探讨:

先将输入序列划分为 2 等份为上下 2 个半区, 然后 4 等份把第一次的各分区分别再划分为上下区, 并且每次分区时假设前导“1”不在上半区就在下半区, 形成上下半区对应序列的“或非”输出的互排斥的关系, 由此类推划分为 8, 16, 32... 等份。以 8 位的二进制数为例 (设为 $a7a6a5a4a3a2a1a0$): 需要 3 次划分, 每次划分分别原来的操作数的位为 2, 4, 8 等份 (一般地如果是 n 位数则要 进行 $\log_2 n$ 次划分)。

(1) 第一次划分或非输出 $F1 = \sim(a7 \mid a6 \mid a5 \mid a4)$, 显然若 $F1$ 为“1”则前导“1”在下半区 ($a3a2a1a0$), $\sim F1 = "1"$, 若 $F1$ 为“0”则前导“1”在上半区 ($a7a6a5a4$), 即分区的“按位”或非输出是互斥的。

(2) 第二次划分或非输出: 对上半区划分 $a7a6$ 和 $a5a4$ 两个上下分区, 下半区划分 $a3a2$ 和 $a1a0$ 两个上下分区。
 $F21 = \sim(a7 \mid a6)$, $F22 = \sim(a5 \mid a4)$ 。

(3) 第三次划分得 $F31 = \sim a7$, $F32 = \sim a5$, $F33 = \sim a3$, $F34 = \sim a1$ 。这样 $LOPV[7] = F1 \& F21 \& F31$; $LOPV[6] = F1 \& F21 \& (\sim F31)$; $LOPV[5] = F1 \& (\sim F21) \& F32$; ... $LOPV[0] = (\sim F1) \& (\sim F223) \sim F34$, 按照这样的办法依次进行划分, 对于 8 位操作数的分区图如图 5 所示。

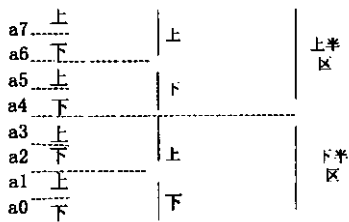


图 5 8 位操作数分区图

具体 8 位 LOPV 实现电路如图 6 所示。图中“L”是 LOPV 的缩写, 用 VERILOG 对电路进行编程, 用 QUARTUS 进行仿真发现除输入是“00000000”时候输出结果错误之外, 其余的全部是正确, 原因是在划分区域时假设前导“1”不在上半部分就在下半部分。而对于输入是全 0 的情况由于根本没有“1”存在, 这个假设是不成立。必须对电路进行修正: 只要增加一

*** (上接第 156 页)

解决了该技术难点, 满足了对高性能雷达稳定平台的测试要求, 对机载 SAR 的动态性能指标能进行良好的测试。

参考文献:

- [1] 陈刚, 范天泉. 位置敏感器 PSD 在几何量测量中的应用和展望 [J]. 工具技术, 1996, 30(12): 37-40.
- [2] 石庚辰, 王俊. 新型光电二维传感器 [J]. 测试技术学报, 1997, 11(4): 25-27.
- [3] 友清. 光学测量位移传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 1996, (6): 19-20.
- [4] Yamamoto K, Yamaguchi S. New structure of two-dimensional

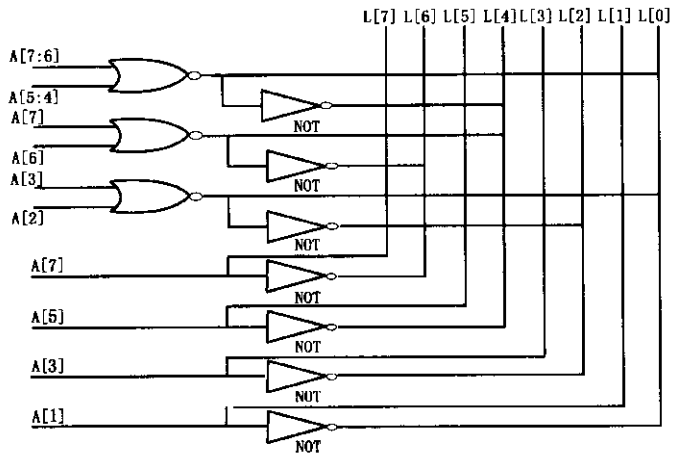


图 6 8 位 LOPV 实现电路图

个或门进行 $A[0] + A[1]$ 逻辑运算然后把输出跟原来的 LOPV[0] 与就可以解决这个问题。通过逻辑优化, 一个 64 位的浮点加法器的移位编码通过 LOPV 电路来实现关键路径只有一个 32 位的 NOR 和一个反相器, 再通过 6 级线与可以实现, 对于 NOR 的扇入问题可以通过逻辑优化改善。对于 64 位操作数的移位编码电路在上华 0.6 工艺下只需要 5.9 ns 延时, 这样形成规格化移位编码具有很大的速度优势!

5 结论

本文结合具体设计实际, 对浮点加法器中的关键问题数据路径划分, 尾数加法器设计, 尾数加法器输出电路设计, 前导“1”检测电路设计进行了研究, 提出了实际可行的设计思想, 在双精度 FPU 和浮点 24 位浮点 DSP 中应用得到很好的效果。

参考文献:

- [1] Oberman S F. Design issues in high performance floating point arithmetic units [D]. Stanford University, Degree of Doctor of Philosophy, 1996.
- [2] 李亚民. 计算机组成与系统结构. 清华大学出版社, 2000
- [3] Farmwald M P. Design of High performance digital arithmetic units [D]. Stanford University, Degree of Doctor of Philosophy, 1981.
- [4] Seidel P M. Design of fast IEEE floating adders [J]. IEEE Trans Comput., 2001 c-01 (3).
- [5] position sensor and applications [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1985, NS-32(1): 438.
- [6] 张澄波. 综合孔径雷达原理 [M]. 北京: 科技出版社, 1989.
- [6] 程继伟, 巩马理, 贾维清. 位置敏感探测器在转角测量中的应用 [J]. 传感器技术, 2002, 21(10): 40-42.
- [7] 曾超, 李锋, 徐向东. 光电位置传感器 PSD 特性及其应用 [J]. 光学仪器, 2002, 24(4-5): 30-34.
- [8] 王之江. 光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [9] 陶慧良. 数据采集系统及其器件 [M]. 北京: 北京理工大学出版社.
- [10] 王广志, 丁海曙, 丁辉. 位置敏感器件 PSD 的杂光干扰研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1997, 37(1): 61-64.

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>