

## 数字电视传输技术问答信道调制

门爱东 韩猛 王军

本文作者门爱东先生，北京邮电大学电信学院多媒体通信中心教授，博士生导师；韩猛、王军先生，清华大学电子系博士。

**关键词：**信道 调制 DTTB

### 为什么需要数字调制？

数字调制就是将数字符号转换成适合信道传输特性的波形的过程。基带调制中，这些波形通常具有整形脉冲的形式；而在带通调制中，则利用整形脉冲去调制正弦信号，此正弦信号称为载波。将调制后的载波转换成电磁场进行传播，就实现了无线传输。

之所以要利用载波实现基带信号的无线传输，有以下一些原因：

(1)天线尺寸。电磁场必须通过天线才能发射到空中实现空间传播，接收端也必须通过天线才能有效接收空间传播的信号。根据电磁场和天线理论，天线的尺寸主要取决于波长 $\lambda$ 和应用场合。例如：对于蜂窝电话，天线长度一般为 $\lambda/4$ ，假设发送一个基带信号的频率( $f$ )为 3000Hz，如果不经过载波调制而直接耦合到天线发送，其天线尺寸约为 24km；如果把此基带信号先调制到较高的载波频率上，例如 900MHz，则等效的天线尺寸为 8cm。因此，利用载波进行调制是很有必要的。

(2)频分复用。如果一条信道要传输多路信号，则要通过调制区别不同的信号。

(3)扩频调制。通过调制将干扰的影响减至最小，提高抗干扰的能力，即扩频。

(4)频谱搬移。利用调制将信号放置于需要的频道上，在接收机中，射频(RF)到中频(IF)信号的转换就是一例。

## 有哪些数字调制方式？什么是星座图？

载波信号一般以下列公式表示：

$$S(t) = \underbrace{A(t)}_{\text{幅度}} \underbrace{\cos[w_c t + \phi(t)]}_{\text{频率 相位}} = \underbrace{A(t)\cos\phi(t)}_{\text{同相分量(I)}} \underbrace{\cos w_c t - A(t)\sin\phi(t)\sin w_c t}_{\text{正交分量(Q)}}$$

从中可以看到，载波信号有三个特征分量：幅度、频率和相位。因此，数字调制可以对载波的幅度、频率和相位，或三者之间的联合进行调制，相应地得到幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)，以及幅度与相位联合键控或称为正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)。目前，在数字电视传输系统中，常用的数字调制方式是 PSK 和 QAM，或二者的变种。

数字调制方式又分为二进制和多进制数字调制，统一表示为 MPSK 和 MQAM(这里  $M=2^n$ ,  $n$  为正整数)。更高的多进制调制( $M$  越大)，意味着更高的频率效率，但更低的功率效率。

根据三角函数关系式，把上述载波信号表达式展开为两部分： $\cos w_c t$  部分和  $\sin w_c t$  部分，其中  $A(t)\cos\phi(t)$  称为同相分量(Inphase, I 分量)， $A\sin\phi(t)$  称为正交分量(Quadrature, Q 分量)。如果以 I 分量为横轴、Q 分量为纵轴，在直角坐标系中把符号映射后所代表的坐标点表示出来，得到的图像称为调制矢量图或星座图。

若把上述数字调制方式以星座图表示，则得到图 1。从中可以看到，当  $M=4$  时，4PSK 就等同于 4QAM；随着  $M$  的增加，MQAM 比 MPSK 有更高的频率效率，但对系统的非线性更敏感。

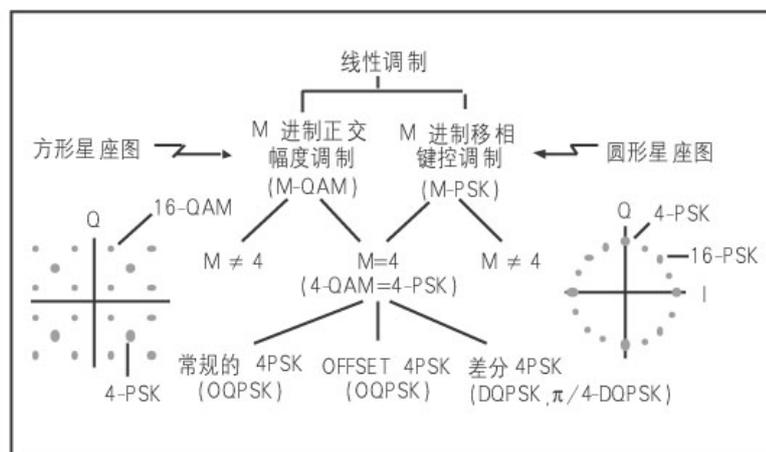


图 1 数字调制的方式

## 什么是 QPSK 调制?

QPSK 调制被称为四相绝对移相调制，它不是用载波信号的频率或幅度携带信息，而是用载波的相位携带信息，即对载波信号的相位进行调制。根据调制的数据，载波相位表示为 4 种相位状态之一，即一个符号，每个符号包含 2b 数据。

QPSK 信号的矢量图(星座图)和波形图如图 2 所示。

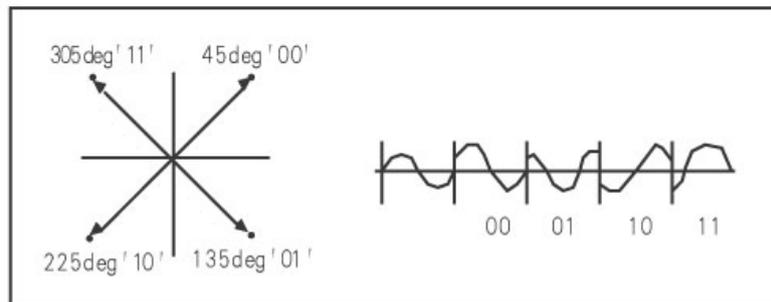


图 2 QPSK 的星座图和波形图

## 什么是 OQPSK 调制?

OQPSK 是 QPSK 调制的一种变形。

普通 QPSK 调制信号的 I 路和 Q 路信号是同步的，当它们同时发生跳变时，相临 QPSK 符号间会发生  $180^\circ$  相移，这时信号包络瞬时通过零点。如随后发射机放大器线性不理想，则会造成较大的频谱扩展，其旁瓣会干扰邻近频道。

偏移四相相移键控(OQPSK)技术可以解决这个问题。其实现方法非常简单，就是在常规 QPSK 正交调制器上将 I 路或 Q 路信号后移半个符号周期(即  $T_s/2$ )。这样，调制信号的相角每  $T_s/2$  时间发生一次跳变，但每次只有一路信号变化，所以相角的跳变只能是  $\pm 90^\circ$ 。

须要强调的是，OQPSK 信号的相位跳变频率虽然比变形前的 QPSK 信号快一倍，但它本质上仍是两路符号周期为的 BPSK 信号的正交叠加，所以其频谱和 QPSK 信号完全一样，在高斯白噪声信道下，采用相关解调的误码性能也相同。

## 什么是 QAM 调制?

在带宽有效的通信系统中，大容量信息必须通过高进制调制来传输。由信号星座图可以直观地看出，此时如果单独使用幅度或相位携带信息，则信号星座点仅分布在一条直线或一个圆上，不能充分利用信号平面。基于这种考虑，诞生了幅度和相位相结合的调制方式——正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)，它可以在保证最小欧氏距离的前提下，尽可能地增加星座点数目。目前  $M$  进制 QAM 调制方案已经广泛应用于数字视频广播，可以在有限带宽内传输高清晰度视频信号。

图 3 为常见的  $M$  进制 QAM 信号星座图。从欧氏距离的角度看，图中矩形星座并不一定是最好的  $M$  元星座点分布，实际中也确实有通信系统选择了不同的信号映射方式，例如蜂窝形状。但是，矩形星座具有容易实现的独特优点，也很利于用正交相干方式解调。所以，矩形星座的 QAM 信号在实际应用中占了绝大部分。

从 QAM 调制过程看，QAM 信号可以看成是两路正交的多进制调幅信号之和。另一方面，在图 3 中  $M=4$  的 QAM 调制与

QPSK 调制完全等同。因此，也可以把 QAM 信号看成多层 QPSK 信号的线性组合。例如：一个 16QAM 星座图可以看成由两层 QPSK 调制组成，第一层调制确定了星座点处于哪个象限；第 2 层调制再映射为该象限的 4 个星座点之一。

MQAM 调制的符号错误概率如图 4 所示。

QAM 信号也存在偏移调制方式，即 OQAM。其原理和实现方法都与 OQPSK 相同。

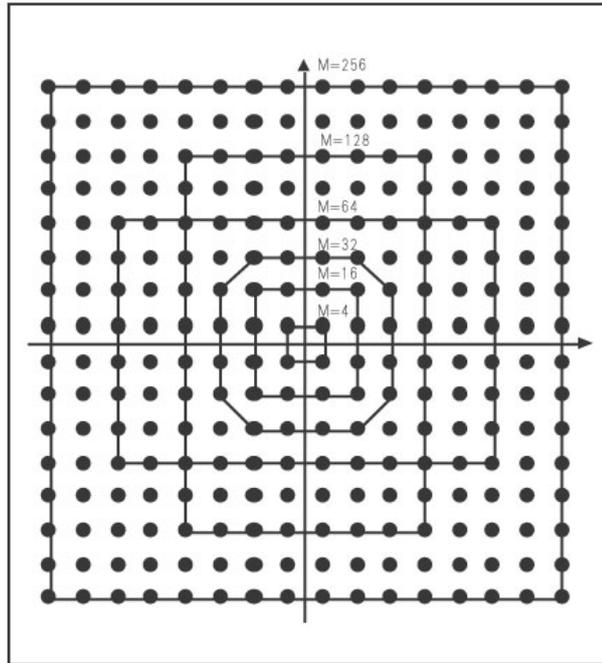


图 3 M 进制 QAM 信号星座图

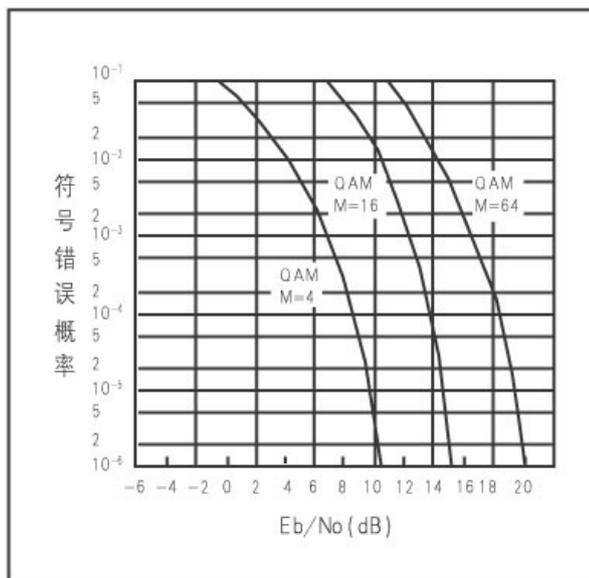


图 4 MQAM 调制的符号错误概率曲线

## 什么是 QAM 分级调制?

QAM 信号可以看成多层 QPSK 信号的线性组合, 这一特点在数字视频通信中得到了应用, 可以提供分级的传输服务。

图 5 为一个典型的分级 64QAM 非均匀调制星座图, 该调制信号被分为两层(或称为两个优先级), 即第一层高优先级(HP)的 QPSK 信号和第二层低优先级(LP)的 16QAM 信号。发射机先完成 QPSK 映射, 然后在 QPSK 星座点的基础上进行一次 16QAM 映射。两层映射通常来自不同的信息源, 并可以采用不同的信道编码, 以提供不同等级的误码保护。接收机则可根据

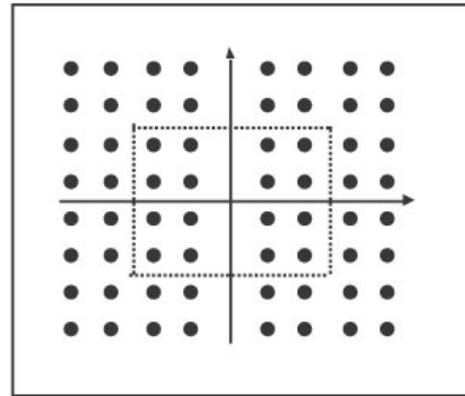


图 5 两层非均匀 64QAM 星座图

根据自身需求和接收条件, 选择全部接收或只接收高优先级码流。

同样的原理, 可以把 64QAM 分为三层, 如图 6 所示, 每层都采用 QPSK 信号, 提供高、中、低三种优先级。

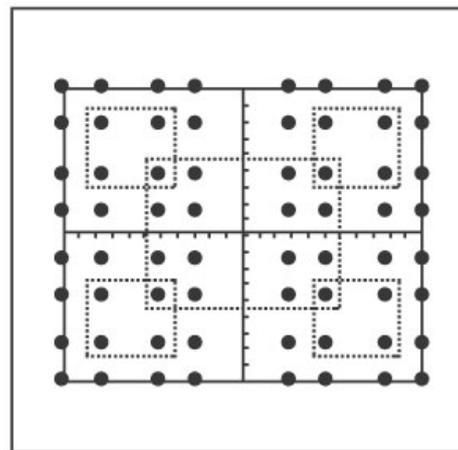


图 6 三层非均匀 64QAM 星座图

在数字视频通信中引入分级调制, 是基于以下考虑:

(1)在未来的视频通信网中, 除视频信号外, 还要传输包括文字、声音、数据、图片等在内的多媒体信息。而不同信息媒体、不同服务对象对传输的要求也各不相同。例如: 数据、文本和图片等不连续媒体对传输误码非常敏感, 但对传输速率要求不太高; 声音和视频信号数据量大, 但对传输误码的敏感度要低一些。不同优先级的码流可以满足不同的传输要求, 例如: 可以用高可靠性的 HP 码流传输数据和标准清晰度电视节目, 而用高数据速率的 LP 码流传输高清晰度电视节目。

(2)如果信号采用地面无线传输方式, 则必须考虑信号覆盖问题。由于地形、发射塔的高度和功率及接收机天线等因素, 不同级别的调制可能实现对不同服务区域的传输覆盖。通常, LP 码流用于覆盖核心服务区, 但在大部分位置需要固定的屋顶指向性天线。在 LP 码流覆盖范围内, HP 码流总是有效的, 它可用来为移动终端和室内天线接收机提供信号, 或为 LP 码流难以覆盖的低 C/N 区域提供覆盖延伸。

须要说明的是，QAM 信号的分级调制是根据“多业务传输”这一特殊需求进行的变形，对通信性能并不会带来提高。由星座图不难看出，如果传输单一码流，在同等传输条件下，分级调制需要比均匀星座图调制更高的功率效率。

### 什么是残留边带调制(VSB)?

我国模拟电视视频信号的最高频率成分理论上为 6MHz。采用调幅以后，除载波以外，上边带和下边带的宽度各为 6MHz，整个调幅波的频带宽度为 12MHz。显然频带太宽了，必须压缩已调图像信号的频带。

压缩图像已调信号的频带，最简单易行的方法是采用单边带传送。抑制一个边带，而传送另一个边带。但是对电视信号来说，采用单边带传输是不利的，主要原因是：(1)单边带传送的信号用包络检波时，失真比较大；(2)电视信号含有 0~6MHz 的频率分量，因此，已调图像信号的频谱中，载波附近有很密的邻近频率成分，要完全滤除下边带是很困难的；(3)当采用单边带滤波器时，它在载频处的幅频特性变化非常陡，相应地，其相频特性的非线性也很严重，对电视图像信号质量非常不利。

因此，模拟电视信号传输不采用单边带调制，而采用残留边带 (Vestigial Sideband Transmission, VSB) 调制。残留边带调制发送如图 7 所示，图中的标值是我国的国家标准，残留部分为 0.75MHz，即 0.75MHz 以下的部分用双边带发送，而 0.75~6MHz 用单边带发送。

### 什么是八电平残留边带(8-VSB)调制?

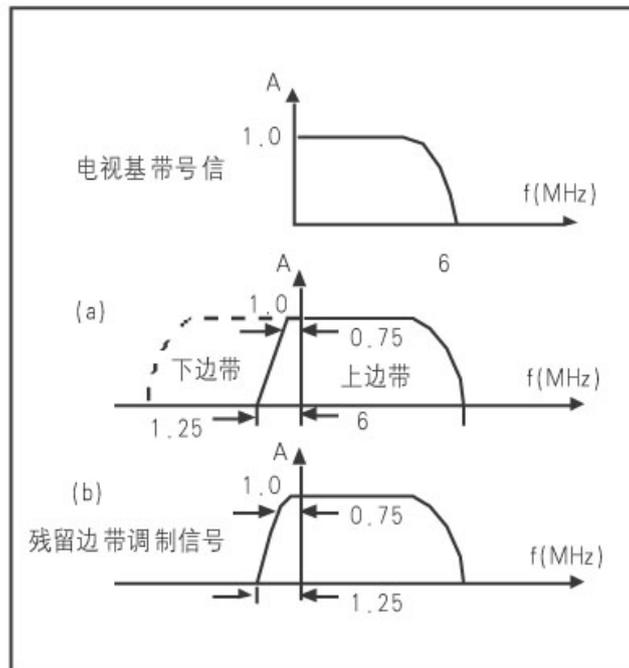


图 7 残留边带调制过程示意图

VSB 是一种模拟线性调制方法，为现行模拟电视广播所采用。8-VSB 调制是模拟 VSB 的数字形式，它首先将二进制码流每 3 比特分为一组，形成八进制基带信号，然后进行频谱搬移。为提高频谱效率，可以用模拟滤波器从调制信号中滤除一个边带，此时的信号称为单边带(SSB)调制信号，其频谱效率等效于 64QAM

信号。然而，下降沿陡峭的单边带滤波器难以实现，所以采用带有一定滚降的残留边带滤波器  $H_{VSB}(f)$  滤波其中一个边带，得到 8-VSB。

### 什么是伪随机(PN)序列和 m 序列？

在数字通信中，一般使用伪随机序列(Pseudo-Noise, PN)作为训练序列。PN 序列的特点是，尽管其序列产生器有确定的构造方法，但 PN 序列本身具有很多类似随机序列的性质。

最常见的二进制 PN 序列是最大长度线性移位寄存器序列，简称 m 序列，它是由一个线性反馈的 n 级移位寄存器生成的。所谓线性反馈，是指反馈函数中仅包含模 2 加运算而不含非线性运算。图 8 是一个简单的  $n=3$  级 m 序列产生器，其生成多项式(即连接关系)为  $x^3+x^2+1$ 。当移位寄存器组  $D_1D_2D_3$  被设置为一个非全“0”的初始状态后，它将循环通过所有  $2^n-1$  个可能的非全“0”状态，同时输出的 m 序列也以  $N=2^n-1$  为周期反复循环。不同的初始状态决定了 m 序列的起始点，也称为 m 序列的相位。

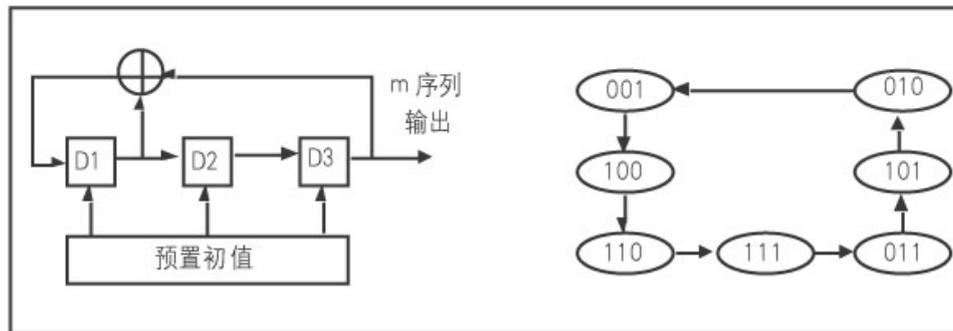


图 8 m 序列产生器示例 ( $n=3$ ) 及其状态转移图

其它长度的 m 序列的生成多项式在许多教科书中可以查到。m 序列的生成多项式必须是 n 次本原多项式，其周期为  $N=2^n-1$ 。这样生成的 m 序列是一个以  $2^n-1$  为周期的循环序列。m 序列具有一些典型的伪随机特性：

(1) m 序列的一个周期(长度为  $2^n-1$ )中，“1”、“0”的个数大致相等。

(2) 将一个 m 序列 a 循环左移  $t$  ( $t \neq 0$ ) 位，得到的 m 序列  $L_t(a)$  与 a 模 2

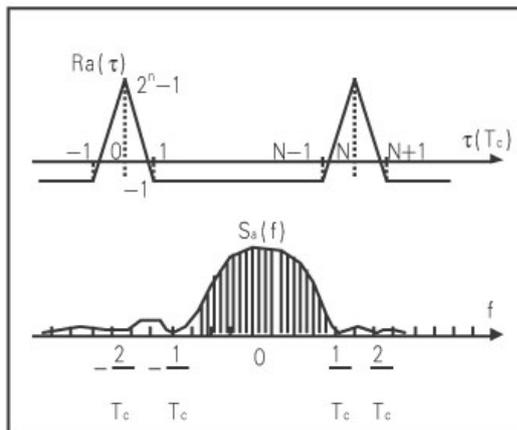


图 9 m 序列的自相关函数和平均功率谱密度

加以后，仍是  $a$  的循环左移若干位后的  $m$  序列。即  $a \oplus L^l(a) = L^l(a)$ 。可见， $m$  序列满足线性叠加。

(3) $m$  序列的自相关函数  $R_a(t)$  和平均功率谱密度  $S_a(f)$ ，如图 9 所示。由于  $R_a(t)$  具有周期性，所以其傅里叶变换(即平均功率谱密度) $S_a(f)$  为离散线谱，谱线间隔为  $1/NT$ 。在实际中，通常将  $m$  序列的周期  $N$  取得很大，而脉冲宽度  $T_c$  取值较小，此时  $m$  序列的自相关函数将近似为  $\delta$  函数，其功率谱近似为平坦的宽带连续谱。也就是说，随着  $N$  值的增大， $m$  序列更加接近随机噪声的性质。

(全文完)

来源：《世界广播电视》

出版日期：2005 年 4 月

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

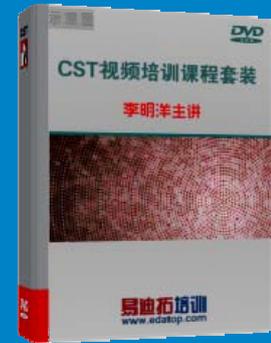
该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## 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,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.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>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并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
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,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>