

# 波束波导天线角误差坐标变换方法<sup>\*</sup>

卢华强

(中国电子科技集团公司第39研究所·西安·710065)

**摘要:**针对波束波导馈电天线无法对空间移动目标进行单脉冲跟踪的特点,首先分析了单脉冲跟踪角误差电压形成机理,同时定义了天线及馈源角误差坐标系,并通过分析常规天线及波束波导馈电天线跟踪移动目标时角误差电压特性,在国内首次得出了波束波导馈电天线跟踪空间移动目标的角误差电压坐标变换公式,最后,通过某波束波导馈电天线系统工程实践对该变换公式进行验证。结果表明,单脉冲跟踪角误差坐标变换模型完全满足波束波导天线对移动目标进行全空域高精度跟踪的要求。

**关键词:**波束波导馈电天线;单脉冲跟踪;馈源角误差坐标系;天线角误差坐标系;角误差电压;坐标变换

中图分类号:V556.8

文献标志码:A

文章编号:1674-5620(2013)04-0326-05

DOI:10.7642/j.issn.1674-5620.2013-04-0326-05

## Angle Error Coordinates Conversion Method for Beam Waveguide Antennas

LU Huaqiang

(No. 39 Research Institute of CETC, Xi'an 710065)

**Abstract:** The forming mechanism of monopulse tracking angle error voltage is analyzed to find out why beam waveguide antennas can not perform monopulse tracking of moving objects in space. Meanwhile, antenna and feed angle error coordinates are defined. Coordinates conversion formulas for angle error voltage of beam waveguide antennas in tracking of moving objects in space is derived for the first time in China through analysis of angle error voltage characteristics in tracking of moving objects with conventional antennas and beam waveguide antennas. Results of validation through an engineering project of a beam waveguide antenna system indicate that the coordinates conversion model of monopulse tracking angle error fully meets the requirements of beam waveguide antennas to track moving objects in full space with high accuracy.

**Keywords:** beam waveguide antenna; monopulse tracking; angle error coordinates of feed; angle error coordinates of antenna; angle error voltage; coordinates conversion

## 0 引言

在国内首批采用波束波导馈电的测控天线中,对空间目标的跟踪主要采用单脉冲自跟踪方式,如果不对馈源输出的角误差电压进行坐标变换,天线就无法跟踪空间移动目标。关于波束波导馈电天线采用单脉冲跟踪时的角误差坐标变换,国外相关资料中有简单介绍,但对于公式推导及天线转动引起的周向角变化量的计算没有描述。本文根据常规天线单脉冲角误差原理,推导出波束波导馈电天线单脉冲跟踪角误

差坐标变换模型,结合波束波导馈电系统的特点,总结出天线转动引起周向角变化量的计算公式,圆满解决了工程中波束波导馈电天线对空间移动目标进行单脉冲自跟踪时角误差坐标变换问题。

## 1 角误差坐标系定义

### 1.1 馈源角误差坐标系

对于具有单脉冲跟踪功能的天线系统,由馈源形成的和差波束产生空间目标在馈源角误差坐标系中的角误差信号,当偏离馈源和差波束中心(电轴)

\* 收稿日期:2013-03-15;修回日期:2013-04-09;网络出版时间:2013-07-19 10:35

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4230.TV.20130719.1035.004.html>

作者简介:卢华强(1963—),男,学士,高级工程师,主要从事天线总体研究与设计工作;E-mail:luhuaqiang18@sohu.com

角度为 $\theta$ 的空间目标 $P$ 绕电轴旋转一周时,和信号相位不发生变化,差信号相位变化 $360^\circ$ ,因此和信号与差信号的相位差 $\varphi$ 也叫做周向角。当角误差矢量逆时针旋转时, $\varphi$ 定义为正向。馈源角误差坐标系定义为馈源电轴与 $Z$ 轴重合,和信号相位 $\varphi_\Sigma$ 与差信号相位 $\varphi_\Delta$ 的相位差为 $0^\circ$ 时表示 $X$ 轴正向,和差信号相位差为 $90^\circ$ 时表示 $Y$ 轴正向,如图1所示。

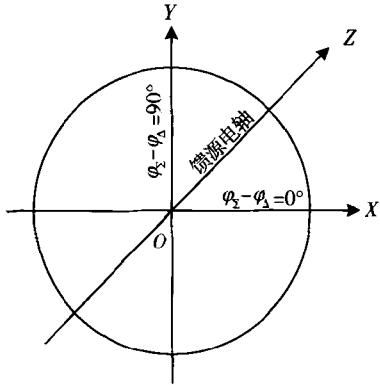


图1 馈源角误差坐标系

Fig. 1 Angle error coordinates of the feed

## 1.2 天线角误差坐标系

馈源激励的和差波束经天线面反射后形成天线和差波束照射空间目标,由于天线座架的运动方式又产生了天线角误差坐标系,以A-E(方位-俯仰型)座架为例,天线在空间沿俯仰及交叉俯仰2个轴向运动,天线角误差坐标系定义为天线电轴与 $Z$ 轴重合,天线俯仰误差 $\delta_{EL}$ 为正时定义为 $Y$ 轴正向,天线交叉俯仰误差 $\delta_{XEL}$ 为正时定义为 $X$ 轴正向,如图2所示。

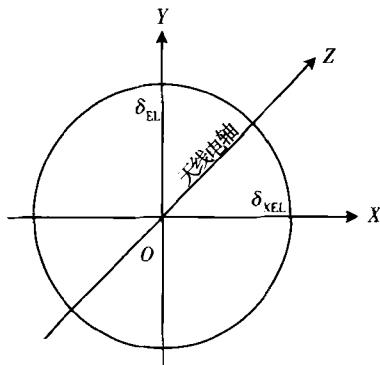


图2 天线角误差坐标系

Fig. 2 Angle error coordinates of the antenna

## 2 天线单脉冲跟踪角误差及坐标变换

### 2.1 非波束波导天线系统的角误差

对于常规天线系统,馈源安装在反射面焦点处,

随天线反射面一起绕方位和俯仰轴转动,馈源系统和天线反射面之间相对关系固定不变。因此当目标偏离天线电轴时,馈源输出的角误差信号只与目标偏离天线及馈源电轴的角度大小和方向有关。天线校相后跟踪目标时,馈源和天线的角误差坐标系始终是重合的,如图3所示。

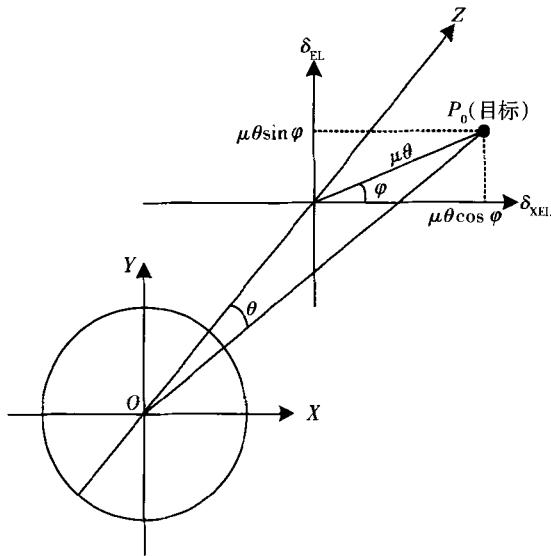


图3 天线及馈源角误差坐标系

Fig. 3 Angle error coordinates of the antenna and feed

馈源输出目标相对于天线误差坐标系的角误差信号,相应的,跟踪接收机(或综合基带)解调出的角误差电压为<sup>[1]</sup>

$$\delta_{EL} = \mu\theta\sin\varphi \quad (1)$$

$$\delta_{XEL} = \mu\theta\cos\varphi \quad (2)$$

其中  $\delta_{EL}$  为俯仰误差电压分量;  $\delta_{XEL}$  为交叉俯仰误差电压分量;  $\mu$  为自跟踪系统角误差解调灵敏度;  $\theta$  为目标偏离天线电轴的偏角;  $\varphi$  为目标到天线电轴的垂线与水平面的夹角(周向角)<sup>[1]</sup>。

上述角误差电压是在馈源和天线反射面坐标系内的俯仰误差分量和交叉俯仰误差分量。对于A-E座架,天线的方位轴是在大地水平面内转动,即绕铅垂轴为基准转动的,方位面与交叉俯仰面不重合,在自跟踪环路中需要进行正割补偿,将天线误差坐标系的角误差信号转换到方位-俯仰坐标系。经过正割补偿转换到天线方位-俯仰坐标系内的角误差电压为

$$U_A = \left(\frac{1}{\cos\theta}\right)\mu\theta\cos\varphi \quad (3)$$

$$U_E = \mu\theta\sin\varphi \quad (4)$$

其中  $U_A$  为方位角误差电压分量;  $U_E$  为俯仰角误

差电压分量。图 3 中,馈源角误差坐标系与天线角误差坐标系完全重合,但在工程中,由于馈源在现场安装完毕后, $\varphi_{\Sigma} - \varphi_{\Delta} = 0^{\circ}$  的位置是随机的,其角误差坐标系 X 轴和 Y 轴的方向并不一定与天线角误差坐标系  $\delta_{XEL}$  轴和  $\delta_{EL}$  轴的方向重合。虽然在理论上可通过沿馈源电轴方向旋转馈源使 2 坐标系重合,但在工程中几乎是不可能实现的,因此通常采用跟踪校相的方法完成 2 个坐标系的重合。

由于馈源在安装时, $\varphi_{\Sigma} - \varphi_{\Delta} = 0^{\circ}$  的方向与  $\delta_{XEL}$  轴方向有一个初始相位差  $\varphi_1$ (实际上就是 X 轴与  $\delta_{XEL}$  轴之间的夹角),同时由于跟踪解调信道中的和、差支路的时延也不一致,这样也会给和、差信号之间带来一个额外的附加相位差  $\varphi_2$ 。跟踪校相的目的是通过调整鉴相器的和、差信号初始相位差,消除  $\varphi_1 + \varphi_2$ ,使 2 个误差坐标系重合,完成周向角  $\varphi$  的零位标定工作,此时,角误差电压只与空间目标偏离馈源电轴的角度  $\theta$  和方向  $\varphi$  相关。

校相时,天线电轴对准目标后沿  $\delta_{XEL}$  轴负向偏离目标,由于目标偏离天线电轴的周向角  $\varphi = 0^{\circ}$ ,此时解调出的角误差电压只取决于  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,调整鉴相器的和、差信号相移  $\Delta\varphi = -(\varphi_1 + \varphi_2)$ ,从而使得角误差电压只出现在  $\delta_{XEL}$  轴正向,这样就完成了周向角  $\varphi$  零位的标定。这是通过鉴相器移相的方法旋转馈源角误差 X-Y 坐标系,使之与图 3 中所描述的方向一致。

## 2.2 波束波导馈电天线角误差及坐标变换

当天线采用波束波导馈电方式时,馈源系统安装在地面,不随天线转动。天线跟踪目标运动时,馈源角误差坐标系与天线角误差坐标系就不重合了。目标偏离天线电轴的方向(周向角)经波束波导反射镜反射到馈源口面时,会随着天线方位及俯仰运动而变化。因此,馈源解调出的角误差信息不仅与目标偏离天线电轴角度及方向有关,而且也与天线方位及俯仰的转动角度有关,因此天线角误差坐标系经波束波导反射镜投射到馈源角误差坐标系时,周向角  $\varphi$  的角误差增加了由天线当前方位、俯仰角产生的额外分量。

波束波导天线要完成对空间目标的单脉冲自跟踪,也必须通过跟踪校相的方法实现 2 个坐标系的重合(如图 3 所示)。当天线在  $P_0(A_0, E_0)$  点校相时,目标仍然在  $\delta_{XEL}$  轴正向偏离馈源电轴,此时鉴相器解调出的和、差信号相位差  $\varphi$  除了包含前面所述的  $\varphi_1, \varphi_2$  外,还包含了天线当前角度( $A_0, E_0$ )叠加

到馈源角误差坐标系的相位差  $\varphi_3$ ,此时调整鉴相器的初始相位  $\Delta\varphi = -(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$ ,使  $\varphi = 0^{\circ}$ ,就完成了天线在  $P_0$  点的校相工作。如果天线始终跟踪  $P_0$  点的固定目标,就和常规天线没有区别。

当天线在  $P_0$  点开始跟踪移动准目标时,目标在天线角误差坐标系的偏离角  $\theta$ 、周向角  $\varphi$  经过波束波导反射镜投射到馈源(喇叭口面)角误差坐标系,偏离角  $\theta$  没变,周向角  $\varphi$  叠加了由于天线方位及俯仰运动而产生的分量,当天线跟踪目标运动到  $P(A, E)$  点时,周向角变化量为  $\Phi$ ,因此目标在馈源角误差坐标系的周向角变为  $\varphi + \Phi$ ,如图 4 所示,此时如果不对角误差电压进行坐标变换,2 个坐标系就不再重合,天线就无法对移动目标进行自跟踪。

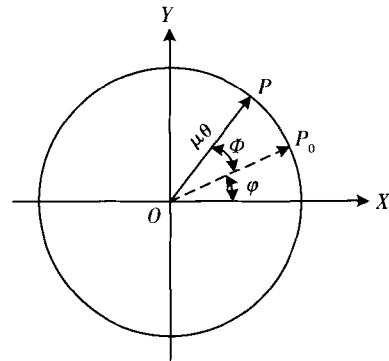


图 4 波束波导天线转动时的角误差

Fig. 4 Angle error of the beam waveguide antenna in rotation

将天线跟踪目标到点  $P$  位置对应的周向角  $\varphi + \Phi$  代入式(1)、式(2),得到 2 个坐标系重合后的角误差电压

$$\begin{aligned}\epsilon_{EL} &= \mu\theta\sin(\varphi + \Phi) = \\ &\mu\theta(\sin\varphi\cos\Phi + \cos\varphi\sin\Phi) = \\ &\mu\theta\sin\varphi\cos\Phi + \mu\theta\cos\varphi\sin\Phi = \\ &\delta_{EL}\cos\Phi + \delta_{XEL}\sin\Phi\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\epsilon_{XEL} &= \mu\theta\cos(\varphi + \Phi) = \\ &\mu\theta(\cos\varphi\cos\Phi - \sin\varphi\sin\Phi) = \\ &\mu\theta\cos\varphi\cos\Phi - \mu\theta\sin\varphi\sin\Phi = \\ &\delta_{XEL}\cos\Phi - \delta_{EL}\sin\Phi\end{aligned}\quad (6)$$

其中  $\epsilon_{EL}$  和  $\epsilon_{XEL}$  分别为坐标变换后馈源及天线角误差坐标系俯仰轴角误差分量和交叉俯仰轴角误差分量; $\Phi$  为天线从校相点开始跟踪目标时,由于方位及俯仰转动引起角误差矢量的旋转分量。

考虑到正割补偿后,在天线控制单元闭环时的方位及俯仰角误差电压为

$$U_A = \left(\frac{1}{\cos E}\right)(\delta_{XEL}\cos\Phi - \delta_{EL}\sin\Phi)\quad (7)$$

$$U_E = \delta_{EL} \cos \Phi + \delta_{XEL} \sin \Phi \quad (8)$$

由式(5)~式(8)可以看出,只要根据天线校相后的转动角度对天线角误差坐标系进行适当的变换,就可以始终使2个坐标系保持图3所示的状态,从而完成天线在全空域对目标的高精度跟踪。

### 3 天线转动引起的周向角变化量 $\Phi$

由式(3)及式(4)可以看出,只要确定了由于天线转动引起的周向角变化量  $\Phi$ ,就可以对角误差电压进行坐标变换,从而完成天线对移动目标的自跟踪。天线转动导致的周向角变化量  $\Phi$  满足以下关系

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_E \quad (9)$$

其中  $\Phi_A$  表示方位转动导致的周向角变化量;  $\Phi_E$  表示俯仰转动导致的周向角变化量。

$\Phi_A$  和  $\Phi_E$  与天线方位和俯仰转动角度的关系并不是一成不变的,这和波束波导反射镜的数量有关,因此无法用公式表示。下面以具体天线为例进行分析,某天线的波束波导馈电系统如图5所示。

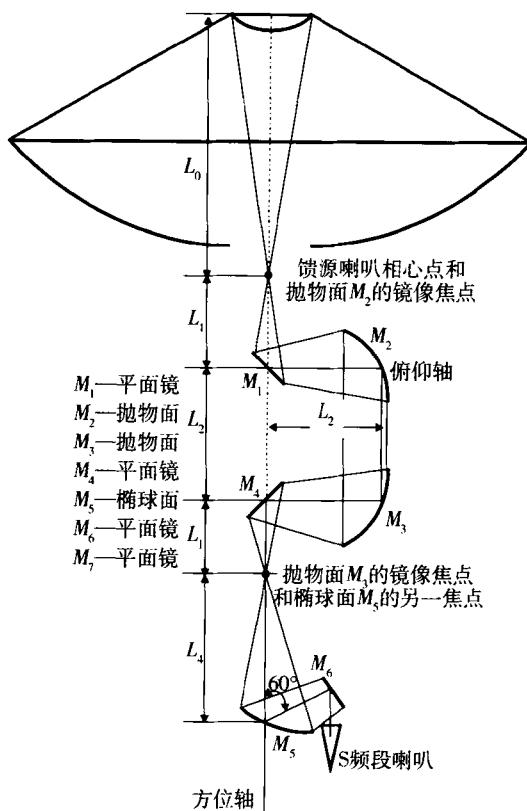


图5 某天线波束波导馈电系统

Fig. 5 Example of a beam waveguide feed system

#### 3.1 天线方位转动引起周向角变化量

假设天线在点  $P_0(A_0, E_0)$  校相后跟踪空间目

标到点  $P(A, E)$  位置(见图4),天线跟踪过程中,目标偏离天线电轴的角度  $\theta$  和周向角  $\varphi$  不变,当天线跟踪移动目标时,由于  $M_1 \sim M_4$  随天线方位一起转动,所以不产生  $\Phi$ 。但  $M_5$  和  $M_6$  不随方位转动,从波束照射的方向看,角误差矢量投射到  $M_5$  上时,逆时针旋转;投射到  $M_6$  上时,顺时针旋转;投射到馈源角误差坐标系时,逆时针旋转,且角度为  $A_0 - A$ 。由于天线方位从  $A_0$  逆时针旋转到  $A$  时角度减小,因此由于方位转动而叠加的  $\Phi_A = A_0 - A$  为正值。由此可以得出以下结论:

1)当跟随天线方位轴运动的波束波导反射镜数量为偶数时,  $\Phi_A$  的数值为正,且  $\Phi_A = A_0 - A$ ;

2)当跟随天线方位轴运动的波束波导反射镜数量为奇数时,  $\Phi_A$  的数值为负,且  $\Phi_A = -(A_0 - A)$ 。

#### 3.2 天线俯仰转动引起周向角变化量

俯仰转动引起  $\Phi_E$  变化的原理与方位向相同,因此可以直接得出下面结论:

1)当跟随天线俯仰轴运动的波束波导反射镜数量为偶数时,  $\Phi_E$  的数值为正,且  $\Phi_E = E_0 - E$ ;

2)当跟随天线俯仰轴运动的波束波导反射镜数量为奇数时,  $\Phi_E$  的数值为负,且  $\Phi_E = -(E_0 - E)$ 。

#### 3.3 工程应用举例

根据上述结论并结合图5所示的波束波导馈电系统,分析某工程波束波导馈电天线跟踪目标转动时周向角变化量,跟随天线方位转动的波束波导反射镜有4个( $M_1 \sim M_4$ ),为偶数,所以  $\Phi_A = A_0 - A$ ;跟随俯仰轴运动的反射镜只有  $M_1$ ,为奇数,所以  $\Phi_E = -(E_0 - E)$ 。

最终图5所示的波束波导馈电系统在天线跟踪目标运动时引起的周向角变化量为

$$\Phi = (A_0 - A) - (E_0 - E) \quad (10)$$

### 4 应用实例

在某工程中,波束波导馈电系统如图5所示,将式(7)、式(8)及式(10)代入天线控制单元跟踪误差坐标变换软件,在任务初始段快速校相完成后,天线控制单元与跟踪接收机显示角误差电压完全一致,证明此时馈源角误差坐标系与天线角误差坐标系完全重合。

为验证天线大范围转动时角误差坐标变换的正确性,分别在方位  $40^\circ$ 、俯仰  $60^\circ$  方向和方位  $310^\circ$ 、俯仰  $40^\circ$  方向利用射电星对跟踪频点进行校相,然后天线转到方位  $110^\circ$ 、 $174^\circ$  和  $237^\circ$  方向跟踪不同仰角

的同步卫星，天线都能够稳定、可靠地捕获跟踪卫星，证明跟踪目标时角误差电压已不受天线大范围转动的影响。为进一步验证角误差坐标变换的准确性，天线分别连续跟踪射电星和空间目标，任务中天线跟踪目标最长时间将近6 h，当方位角变化范围为 $110^\circ \sim 250^\circ$ ，俯仰角变化范围为 $12^\circ \sim 67^\circ \sim 12^\circ$ 时，天线始终稳定精确地跟踪目标。

## 5 结束语

波束波导馈电天线单脉冲跟踪角误差坐标变换方法成功解决了波束波导馈电天线全空域跟踪空间移动目标的关键问题，实现方法简单可靠，可在类似天线系统中推广使用。

### 参考文献(References)

- [1] 李日尚. 圆波导多模角跟踪系统角误差解耦方法研究[J]. 测控与通信, 2010, 130(34):1-2.  
Li Rishang. Study of decoupling method of angle error in conical waveguide multi-mode angle tracking system[J]. TT&C and Communications, 2010, 130(34):1-2 (In Chinese).
- [2] 沈民谊, 蔡镇远. 卫星通信天线、馈源、跟踪系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1993:219-37.  
Shen Minyi, Cai Zhenyuan. Satellite communications antenna, feed and tracking system[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1993:219-237 (In Chinese).
- [3] 赵业福, 李进华, 吴永龙, 等. 无线电跟踪测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003:66-93.  
Zhao Yefu, Li Jinhua, Wu Yonglong, et al. Radio tracking and measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003:66-93 (In Chinese).
- [4] 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992:283-289.  
Chen Fangyun, Jia Naihua. Satellite TT&C manual[M]. Beijing: Science Press, 1992:283-289 (In Chinese).
- [5] 柯树人. 圆波导多模自跟踪系统的工作原理[J]. 通信与测控参考, 2002, 184(3):8-13.  
Ke Shuren. Operation principle of conical waveguide multi-mode autotracking system[J]. Communications and TT&C Reference, 2002, 184 (3):8-13 (In Chinese).
- [6] 柯树人. 差信道采用四相调制的伪单脉冲自跟踪系统[J]. 通信与跟踪, 1998, 82(3):1-6.  
Ke Shuren. Pseudo monopulse autotracking system with four-phase modulation in error channel[J]. Communications and Tracking, 1998, 82(3):1-6 (In Chinese).

(本文编辑:吴丽娟)

## 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](http://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](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，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](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。

## 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>