

## 利用线极化天线快速测量圆极化天线轴比的方法

李南京<sup>1</sup>, 冯引良<sup>1,2</sup>, 王建飞<sup>1,2</sup>, 党娇娇<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 针对轴比测试需要连续旋转线极化天线极化轴, 在高频段旋转关节难以消除高速旋转带来的电缆抖动所引起的幅度和相位不一致性, 提出了一种快速、精确测量圆极化天线轴比的测试方法。基于椭圆极化波的正交分解理论, 该方法利用线极化天线对待测圆极化天线进行两组正交的线极化幅度测量, 通过计算得到圆极化天线的轴比等极化椭圆参数的信息。在此基础上又提出了只用三个线极化分量测量圆极化天线轴比的方法。通过在微波暗室中对圆极化天线进行多次测试, 验证了该方法的有效性。该方法提高了圆极化天线的测试效率, 降低了测试难度, 对于工程应用有重要的应用价值。

**关键词:** 圆极化天线; 线极化; 正交分解; 轴比

**中图分类号:** TN821<sup>+.1</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2216-05

## Fast measuring axial ratio of circular polarization antennas based on linear polarization antenna

Li Nanjing<sup>1</sup>, Feng Yinliang<sup>1,2</sup>, Wang Jianfei<sup>1,2</sup>, Dang Jiaojiao<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Xi'an 710065, China;

2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Axial ratio (AR) test requires continuous rotation of polarization axis of linear polarization(LP) antenna, however high-speed rotation of rotary joint brings cable jitter, which causes inconsistencies between amplitude and phase. Since it is difficult to eliminate the jitter at high frequency, a fast and accurate measurement method of the AR of CP antennas was presented. The method, which is based on the orthogonal decomposition theory of elliptically polarized wave, employs LP antenna to measure two groups of orthogonal LP amplitude of the CP antennas under test. Therefor axial ratio of circularly polarized antennas and other parameters of elliptic polarization can be obtained by calculating. And on this basis, an innovative method of measuring the AR of CP antennas using only three linear polarization components was proposed. By measuring CP antennas in an anechoic chamber repeatedly, the method was proved to be effective. This method can increase the efficiency of measuring CP antennas, ease the difficulty level of test, and is of great importance to engineering application.

**Key words:** circular polarization(CP) antennas; linear polarization(LP); orthogonal decomposition; axial ratio(AR)

收稿日期: 2013-01-13; 修订日期: 2013-02-11

基金项目: 西北工业大学基础基金

作者简介: 李南京(1976-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事天线与散射技术、系统仿真、微波成像技术等方面的研究。

Email: linanjing76@163.com

## 0 引言

极化的利用在很早就引起了人们的重视,特别是对圆极化波的利用。圆极化天线的极化波具有抗自然干扰的特性,为了获得最大极化效率,减少干扰,许多卫星通讯系统、点对点通讯系统、雷达系统、导航系统等都采用了圆极化方式<sup>[1-2]</sup>。在圆极化天线测试中,需要测量圆极化天线的轴比,以判断圆极化天线的圆极化程度是否达到设计要求。参考文献[3-4]提出了一种用线极化辅助天线在同一极化面内绕旋转轴高速旋转,而被测圆极化天线绕方位轴慢速旋转来测量圆极化天线的方法——旋转源法。该方法只能得到一个截面的近似特性信息,并且旋转关节不能够完全消除,因为高速旋转而带来的电缆抖动所引起的幅度和相位的变化(特别是在高频段,这种现象尤为明显)会给测试带来误差,同时由于标准圆极化天线不易制作,通常也不采用圆极化天线作为辅助天线进行精确测量。参考文献[5]提出了一种基于线圆变换的线极化测试方法。文中在参考文献[5-6]的基础上进行推导分析,提出了一种两组正交线极化分量测量圆极化天线轴比的方法,同时还对该方法做了进一步分析,得到了更为简单的只用三个线极化分量就能对天线轴比进行测量的方法。

## 1 极化的概念

所谓极化,就是在空间某位置上,沿电磁波的传播方向看去,其电场矢量在空间的取向随时间变化所描绘出的轨迹。如果这个轨迹是一条直线,则称为线极化;如果是一个圆,则称为圆极化;如果是一个椭圆,则称为椭圆极化。图1所示为电场矢量取向随时间变化的典型轨迹曲线<sup>[6-7]</sup>。由于线极化和圆极化是椭圆极化的特例,椭圆极化波可以分解为两个同频线极化波,也可以分解为两个同频旋向相反的圆极化波,亦可合成为一个椭圆极化波<sup>⑧</sup>。极化轴比的定义为极化椭圆长轴与短轴之比,用AR表示。AR的取值范围为 $1 \leq AR < \infty$ ,工程上常用分贝表示: $AR_{dB} = 20\log AR$ 。当 $AR=1(0\text{ dB})$ 时为圆极化, $AR=\infty$ 时为线极化。在圆极化天线设计中,轴比是衡量天线圆极化程度的一个重要技术指标,一般要求在方向图主瓣宽度范围内 $AR_{dB} \leq 3\text{ dB}$ 。通常理想的线极化天线较

容易做到,而理想的圆极化天线很难实现,一般的圆极化天线都表现为椭圆极化。若用一个非理想的圆极化天线来测量圆极化天线参数会带来一定的测量误差,所以要研究用线极化天线测量圆极化天线的参数。

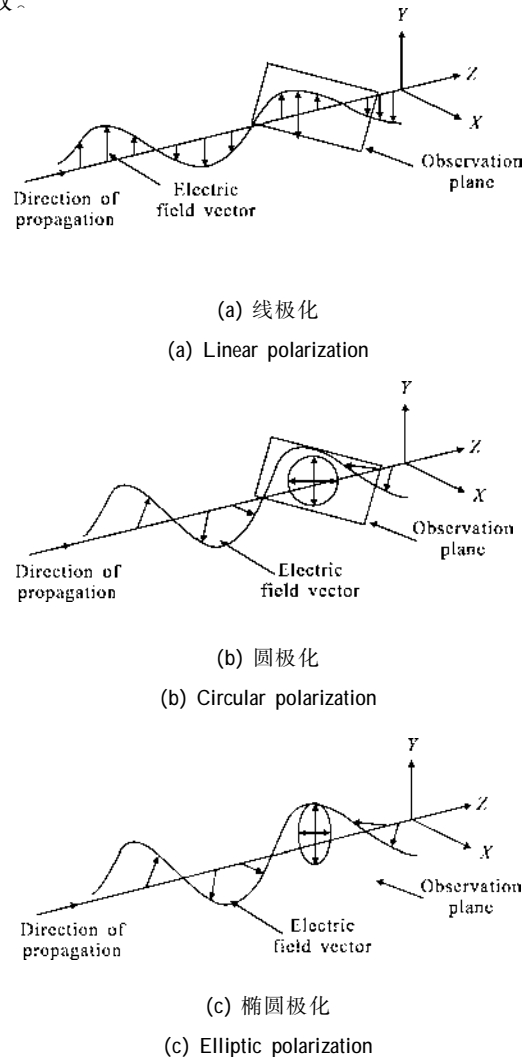


图1 电场矢量取向随时间变化的典型轨迹曲线

Fig.1 Typical trajectory curves of electric field vector orientation changed with time

## 2 测量原理

椭圆极化波可以看成两个同频线极化波合成的结果。如图2所示,取任意方向的一般椭圆极化波,可分别用沿x方向和y方向的两项线极化分量来描述。

令水平极化波的瞬时电场为 $E_x$ ,垂直极化波的瞬时电场为 $E_y$ ,它们都是距离和时间的函数:

$$E_x = E_1 \sin(\omega t - kz) \quad (1)$$

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (2)$$

式中:  $E_1$  为水平极化波的振幅;  $E_2$  为垂直极化波的振幅;  $\delta$  为  $E_y$  超前  $E_x$  的相位角(水平极化波取为参考相位)。当  $0^\circ < \delta < 180^\circ$  时, 旋向为左旋; 当  $-180^\circ < \delta < 0^\circ$  时, 旋向为右旋<sup>[1]</sup>。

为了简化, 取在  $z=0$  的平面分析<sup>[6]</sup>, 并对两个方程进行合并, 有

$$\frac{E_x^2}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{E_y^2}{E_2^2 \sin^2 \delta} = 1 \quad (3)$$

方程(3)是个一般化椭圆方程。它表明由  $E_x$  和  $E_y$  组合成的电场矢量终端画出的轨迹是一个椭圆, 如图 2 所示。它的长轴和短轴不与  $x$  轴及  $y$  轴重合, 其合成电场矢量振幅大小随时间而改变, 这就是椭圆极化波。

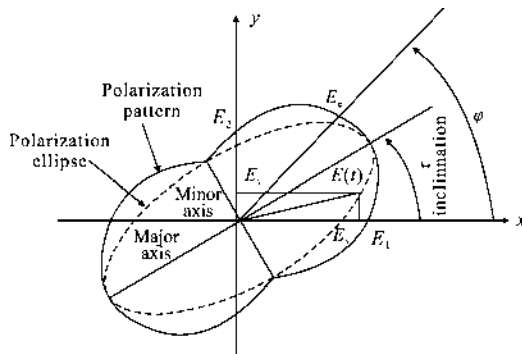


图 2 极化图和极化椭圆

Fig. 2 Polarization pattern and polarization ellipse

由参考文献[6]可知, 测量圆极化天线方向性图时, 只需测量待测天线在水平极化电磁波幅度  $E_1$  和垂直极化状态下的电磁波幅度  $E_2$ , 然后代入  $E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$  中计算  $E_0$ , 就能得到待测天线的方向性图。

再考虑图 2 所示  $xoy$  平面中  $\vec{E}$  在任意方向  $\varphi$  的瞬时分量(即投影), 有

$$E_\varphi(t) = E_x \cos \varphi + E_y \sin \varphi \quad (4)$$

根据上述分析可以推得:

$$E_\varphi(t) = E(\varphi) \sin(\omega t + \gamma) \quad (5)$$

其中

$$E^2(\varphi) = (E_1 \cos \varphi + E_2 \sin \varphi \cos \delta)^2 + (E_2 \sin \varphi \sin \delta)^2 = \frac{1}{2} [E_1^2 + E_2^2 + (E_1^2 - E_2^2) \cos 2\varphi + 2E_1 E_2 \sin 2\varphi \cos \delta] \quad (6)$$

$E$  与  $\varphi$  的关系图称为波的极化图, 它给出了电场矢量  $E$  在  $\varphi$  方向的最大投影。因此,  $E(\varphi)$  实际上

就是在  $xoy$  平面内旋转的线极化天线对  $\varphi$  方向的场强响应, 且极化图的最大值和最小值与极化椭圆的最大值和最小值重合。

从图 2 中可以看出, 极化椭圆的长轴与短轴不与坐标轴重合, 以  $xoy$  坐标系为参考, 建立一组新的坐标系  $x'oy'$ , 如图 3 所示。则任一点的坐标可用新坐标表示如下:

$$\begin{cases} x = x' \cos \tau - y' \sin \tau \\ y = x' \sin \tau + y' \cos \tau \end{cases}$$

因此, 电场分量  $E_x$  和  $E_y$  可以用新的电场分量  $E_{x'}$  和  $E_{y'}$  表示如下:

$$\begin{cases} E_x = E_{x'} \cos \tau - E_{y'} \sin \tau \\ E_y = E_{x'} \sin \tau + E_{y'} \cos \tau \end{cases} \quad (7)$$

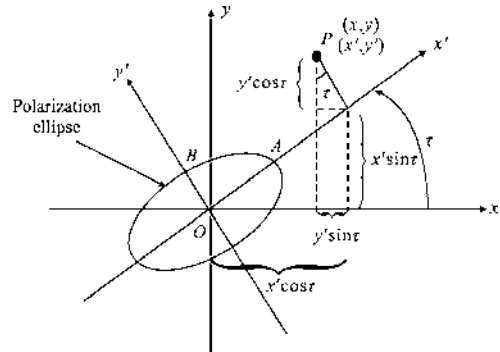


图 3 坐标系变换

Fig. 3 Coordinate system transformation

将公式(7)代入公式(3)中可以推得:

$$\begin{aligned} & E_{x'}^2 \left( \frac{\cos^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{\sin^2 \tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} \right) + \\ & E_x E_{y'} \left( \frac{\sin 2\tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} - \frac{2\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} \right) + \\ & E_{y'}^2 \left( \frac{\sin^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{\cos^2 \tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} \right) = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

公式(8)为新坐标中的一般化椭圆方程。如果椭圆极化波的极化椭圆之长轴和短轴分别与新坐标  $x'$ 、 $y'$  轴重合, 则  $E_x$  和  $E_y$  乘积项的系数应为零, 因此有

$$\frac{\sin 2\tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} - \frac{2\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} = 0 \quad (9)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2E_1 E_2 \cos \delta}{E_1^2 - E_2^2} \right) \quad (10)$$

$$AR = \frac{\text{长轴}}{\text{短轴}} = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2 \tau + E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \sin^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \tau - E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \cos^2 \tau}} \quad (11)$$

根据上述分析,选取一个极化方向已知、可以在  $\varphi$  平面(即极化平面)内转动并且附转动轴上附有精确刻度的线极化天线作为辅助天线。分别测取线极化天线极化方向在  $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$ 、 $\varphi=45^\circ$ 、 $\varphi=145^\circ$  时所接收到的场强响应。由公式(6)可知,线极化天线极化方向在  $\varphi=0^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$  时所接收到的功率分别正比于  $E_1^2$  和  $E_2^2$ , 当线极化天线处于  $\varphi=45^\circ$  和  $\varphi=145^\circ$  极化方向时,所接收到的相对功率分别正比于

$$E_\varphi^2(45^\circ) = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\delta) \quad (12)$$

$$E_\varphi^2(135^\circ) = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\delta) \quad (13)$$

令

$$E_\varphi^2(45^\circ) = E_3^2, E_\varphi^2(135^\circ) = E_4^2 \quad (14)$$

联立公式(12)~(14)可以推得:

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{E_3^2 - E_4^2}{2E_1E_2}\right) \quad (15)$$

将公式(15)代入公式(10)可得待测椭圆极化天线极化椭圆的倾角为:

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{E_3^2 - E_4^2}{E_1^2 - E_2^2}\right) \quad (16)$$

可见,只要测得线极化天线在极化方向  $\varphi=0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $135^\circ$  时的相对功率响应就可以通过公式(16)求出待测椭圆极化天线极化椭圆的倾角,由公式(15)求得其旋向。

由公式(15)和公式(11)可推得轴比计算公式:

$$AR = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2\tau + \frac{1}{2}(E_3^2 - E_4^2) \sin 2\tau + E_2^2 \sin^2\tau}{E_1^2 \sin^2\tau - \frac{1}{2}(E_3^2 - E_4^2) \sin 2\tau + E_2^2 \cos^2\tau}} \quad (17)$$

根据公式(11)、(12)、(14)可进一步推得:

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2}{2E_1E_2}\right) \quad (18)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2}{E_1^2 - E_2^2}\right) \quad (19)$$

$$AR = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2\tau + \frac{1}{2}(2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2) \sin 2\tau + E_2^2 \sin^2\tau}{E_1^2 \sin^2\tau - \frac{1}{2}(2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2) \sin 2\tau + E_2^2 \cos^2\tau}} \quad (20)$$

由公式(20)可知,只需进行三次测量就可以计算出圆极化天线的轴比,称之为“三线法”。

### 3 实验验证

为了验证该方法的有效性,根据测试原理,在微波暗室中利用线极化喇叭天线(图4)对某圆极化天线(图5)进行实际测试,并将测试结果与旋转源方法和参考文献[5]的方法进行了比较。测试频率为 8.5 GHz,在该频率下旋转源方法的测试结果是可信的。测量角度范围为  $-50^\circ \sim 50^\circ$ 。在相同条件下,对公式(17)和公式(20)的计算结果进行了比较。



图4 辅助线极化天线

Fig.4 Auxiliary linear polarization antenna



图5 待测圆极化天线

Fig.5 Under test circular polarization antenna

图6为主极化方向图。可以看出,该圆极化天线的主瓣宽度为  $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。通过图7和图8中的计算结果比较,可以证明文中提出的方法是正确、有效的。

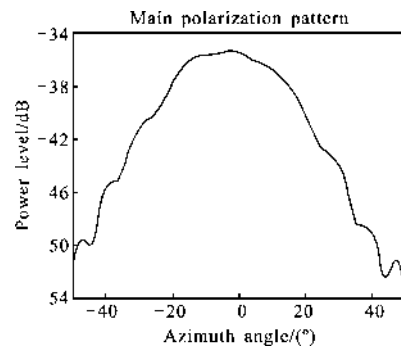


图6 主极化方向图

Fig.6 Main polarization pattern

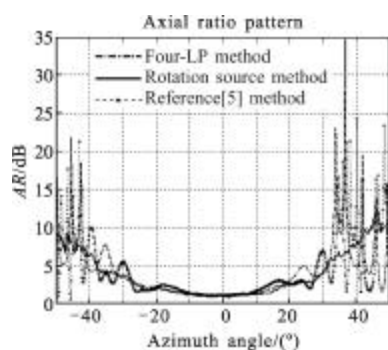


图 7 三种方法计算结果对比图

Fig.7 Three methods results comparison chart

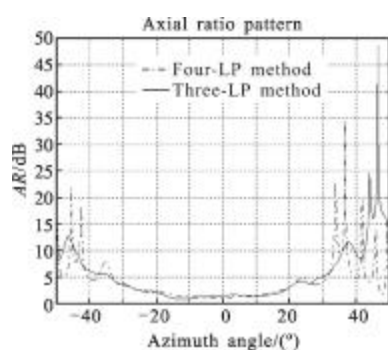


图 8 四线法和三线法计算结果对比图

Fig.8 Four-LP and three-LP method results comparison chart

经过大量实验验证,任意两组正交线极化分量(即四线法)都可以得到在主瓣范围内一致的轴比信息。三线法不一定能够得到一致的轴比信息,所以其具有不稳定性。为了能够得到真实的轴比信息,建议使用四线法进行测量。

## 4 结 论

辅助天线处于静态,减少了不可控制因素的影响,消除旋转关节高速旋转带来的电缆抖动所引起误差,可以得到更加真实可靠的圆极化天线轴比信息。文中依托西北工业大学无人机重点实验室微波暗室设计了一种利用线极化天线来快速、精确测量圆极化天线轴比的方法。通过在微波暗室内的实际测试,表明该方法简单、快速、有效,在工程应用中具有重要的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Mao Naihong, Ju Xinde. Antenna Measurement Manual [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997: 126-135. (in Chinese)  
毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 126-135.
- [2] Shang Junping, Fu Demin, Jiang Shuai, et al. Method for measuring the characteristic parameter of the circular polarization antenna [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(1): 106-110. (in Chinese)  
尚军平, 傅德民, 蒋帅, 等. 圆极化天线特性参数测量方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(1): 106-110.
- [3] Toh B Y. Understanding and measuring circular polarization [J]. IEEE Transactions Education, 2003, 46(3): 313-318.
- [4] Kraus J D, Marhefka R J. Antennas: For All Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 827-873.
- [5] Zhang Xiaoping, Zhou Huai'an. An accurate test method for circular polarized antenna [J]. 2009, 26(1): 67-70. (in Chinese)  
张晓平, 周怀安. 一种圆极化天线极化特性的幅度精测方法 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(1): 67-70.
- [6] Guo Jing, Wan Shunsheng. Measuring Method for circular polarization antennas in far field [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 46(S): 62-66. (in Chinese)  
郭静, 万顺生. 圆极化天线在远场条件下的测试方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 46(S): 62-66.
- [7] Qin Shunyou, Yang Kezhong, Chen Hui. Measuring technique of gain for different polarization antenna [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2003, 17(1): 7-11. (in Chinese)  
秦顺友, 杨可忠, 陈辉. 不同极化天线增益测量技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2003, 17(1): 7-11.
- [8] Ling Changlu. Antenna Measurement Techniques [M]. Chengdu: Chengdu Institute of Telecommunication Engineering Press, 1987: 165-169.  
林昌禄. 天线测量技术 [M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987: 165-169.

## 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](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>