

文章编号:1671-0576(2001)04-0044-06

## 特殊天线方向图应用前景可能性探讨

王大涵, 雷泽斌

(中国航天科工集团 35 所, 北京 100013)

**摘 要:** 通过平板天线的差包和天线方向图讨论, 提出一种导引头上简便易行的抗旁瓣捕捉的方法。该方法基于差包和方向图的差零值的唯一性, 即在该方向图上, 除和主波瓣与差主波瓣有交叉点, 在此交叉点内和功率方向图大于差功率方向图, 天线在主瓣位置有稳定跟踪点, 在其它位置上差波束功率方向图始终大于和功率方向图, 不存在和差方向图交叉点, 不存在稳定跟踪点, 也不满足单脉冲雷达的捕捉跟踪条件。通过和差功率方向图相减可以得到一个新的“锐化后天线方向图”, 该图也有“主瓣”、“旁瓣”, 只不过其“波束宽度”仅为原天线方向图的 1/100 左右。

**关键词:** 天线; 天线波瓣; 天线方向图

**中图分类号:** TN82

**文献标识码:** A

## Discussion on the Potential Application of A Special Antenna Pattern

WANG Da-han, LEI Ze-bin

(The 35th Institute of China Aerospace Scientific Industry Group Co., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Through the discussion of  $\Delta$ -pattern-cover- $\Sigma$ -pattern style pattern of slot-array antenna, this paper present a simple and practical method for anti-tracking of the side lobe. This method is based on the unique of the zero value in  $\Delta$ -pattern-cover- $\Sigma$ -pattern style pattern, namely except intersection between the  $\Sigma$  main lobe and the  $\Delta$  main lobe, there is no other intersection, the  $\Delta$  lobe is always greater than  $\Sigma$  lobe in other position, no stable tracking point exists, no condition is met for Mono-pulse radar tracking. A new “sharpened antenna pattern” is obtained by the subtraction of the  $\Sigma$  lobe and the  $\Delta$  lobe’s power pattern which also gets “main lobe”, “side lobe”, but its beam width just one percent of the original antenna pattern.

**Key words:** antenna; antenna lobe; antenna radiation pattern

## 0 前言

**收稿日期:** 2001-09-14

**作者简介:** 王大涵(1938-), 男, 高级工程师, 主要从事天线的设计、加工等方面的研究; 雷泽斌(1969-), 男, 工程师, 主要从事天线设计方面的研究。

各类天线, 不论其结构形式如何变化, 使用频率各有不同, 但天线方向图都有一个共同的特点,

即存主瓣和旁瓣,在单脉冲天线中存在和波瓣及差波瓣。单脉冲雷达采用的零点跟踪法是现代制导武器中最常用的一种制导方式,正因如此,在现代战争的电磁干扰条件下,如何防止敌方的有源或无源干扰的电磁能量进入导引头天线的旁瓣,避免导引头天线旁瓣捕捉已提到议事日程。其可行方法有:一是设计特殊的天线方向图,如低旁瓣或赋形波束来降低旁瓣捕捉概率,而过低的旁瓣设计,必然降低天线的孔径利用率,致使天线波束变宽,增益下降,从而降低了雷达的作用距离,这是弹上导引头天线所不允许的;其二是旁瓣消隐技术,采用辅助天线,通过自适应技术实时抵消天线的旁瓣,增加辅助天线及控制设备,这在空间狭小成本有限的战术导弹上应用存在很大困难;其三是采用适当的设计,如差包和天线方向图设计,来降低或制造不满足旁瓣跟踪的条件来防止旁瓣捕捉。本文就此问题展开讨论,试图以此简单方法来解决旁瓣捕捉问题,以提高我海防导弹的抗干扰能力,另外,差包和方向图是否可实现“波束锐化”也发表一些看法,仅供参考。

## 1 一般天线方向图特性

一般导引头都采用单平面或双平面单脉冲天线,可达到只要发射一个电磁脉冲,通过接收其回波信号,就可以确定目标的距离及角度信息。天线形式有抛物面天线、扭转极化天线和卡塞格伦天线等。近十几年国外导引头天线如美、俄及西欧日本等国家多采用波导裂缝平面阵天线,即平板天线。天线辐射方向图由和差波束组成,一般天线都有很高的和差增益。和波束发出探测脉冲,以确定目标的距离;而差波束提供目标的角度信息,供伺服系统控制导弹直指目标飞行,最终击中目标。在整个导弹的捕捉跟踪直到击中目标的过程中可以看到,当目标处在天线的等强线左侧时,伺服系统驱动天线向左转直至对准目标;当目标处在天线的等强线右侧时,伺服系统驱动天线向右转直至对准目标,在此过程中弹体也在不断调整姿态与天线轴保持一致,这就是天线主瓣跟踪的结果。这里指的非相参雷达的捕捉跟踪情

况,也是目前战术导弹最常用的雷达体制。这种情况仅存在目标落在天线和波束半功率点以内的这一很小角度范围内,这里指的是一般单脉冲天线。比较合理的设计是天线和方向图增益与差方向图增益相差3db左右,即在和半功率点处和差功率方向图发生交叉,如图1,为最常见的单脉冲天线方向图。

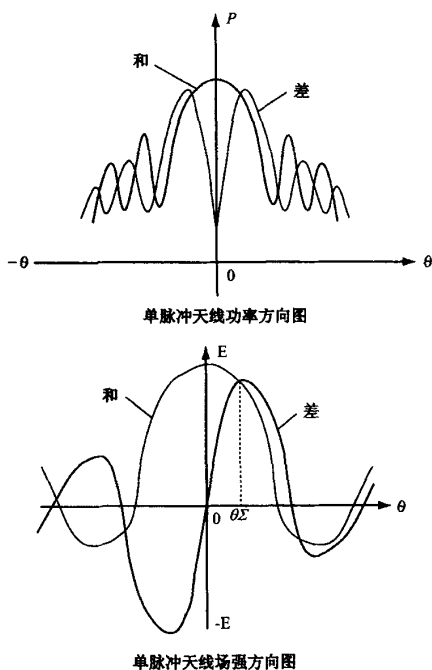


图1 天线方向图

主瓣跟踪只存在于交叉点以内的范围,在此范围内,和波束增益大于差波束增益,即天线斜率  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| < 1$ , 这里  $\Sigma$  指和功率增益的分贝数,  $\Delta$  为差功率增益的分贝数,而且天线跟踪过程是角误差电压不断降低直至天线对准目标飞行误差电压接近零,即天线的斜率  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| \approx 0$ , 在这里可以看出在非相参体制中雷达捕捉只有一个门限电平,只要回波能量超过捕捉门限,控制系统就可以发出捕捉令进行截获,而跟踪方式也只有一个准则,即当和差信号极性相同时,天线就向右跟踪;和差信号极性相反天线即向左跟踪,最后天线轴稳定地与目标散射中心重合,实现稳定跟踪。这种跟踪准则,当目标处在天线旁瓣位置也是同样

适用的。因为旁瓣处和差方向图有交叉现象,出现一个如主瓣处相似的零位。这就是普通天线方向图的多零值现象,此时就不可避免地发生旁瓣捕捉。在现代战争中,电磁环境是十分复杂的,敌方的有源或无源干扰是普遍存在的,即使导引头在远距离正常地捕捉并跟踪目标,因为此时天线主波束毕竟要高出旁瓣 20dB 左右,从敌干扰能量上要使导引头天线旁瓣捕捉是有困难的。但在近距离情况就不同了,敌方可以释放多个无源干扰,也可以设置多个有源干扰,其干扰能量强度可以很大,只要在旁瓣方向回波能量大于主瓣上目标回波信号,这是很容易实现的,现代舰船上都配备这些干扰装置,这样即不可避免地发生旁瓣跟踪,即使不立即发生旁瓣捕捉,导弹也会在几个目标的散射中心跳动,造成跟踪不稳定而贻误战机,即使不存在敌方有源或无源干扰,但在高海情的情况下,也会出现旁瓣捕捉现象,这是已被实验证明的现象。这些对导弹都是灾难性的,是一定要设法避免的。

## 2 差包和天线方向图

所谓差包和,是在单脉冲天线方向图上,在和差功率方向图交叉点以内的角度范围内,和总是大于差,这与普通天线一样。而在这个角度范围以外的区域里,差方向图功率增益总是大于和方向图功率增益。这种方向图特性,在天线和差方向图交叉点内,不影响导引头正常的捕捉跟踪,而在这个范围以外,不满足单脉冲雷达跟踪准则,因为在这里和差波束不存在交叉点,不存在稳定跟踪点,在这里  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| \geq 1$ , 也不符合  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| < 1$  的跟踪条件,因为单脉冲天线差斜率与波束宽度之积约 1.3 左右,即使在主瓣跟踪时,有大的干扰目标出现在旁瓣位置,其回波能量超过主瓣目标回波能量,只能造成失捕,天线只要重新进行搜索而重新进行主瓣捕捉,这与普通天线旁瓣捕捉而稳定跟踪是完全不同的。这里起到关键作用的是此时天线功率方向图的零值点是唯一的,而不是如普通天线方向图和差方向图有多个交叉点,多个零点。

要实现天线的正常稳定跟踪,只要在接收机内稍加鉴别电路就可实现。可设计这样的电路进行判别,当接收到和差误差信号,首先对和差信号进行绝对值比较,只要  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| > 1$  时,证明为旁瓣捕捉,雷达的捕捉指令不发,雷达就可以继续搜索;当达到  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| < 1$  时,为主瓣捕捉,发出捕捉指令后,雷达捕捉就可以稳定跟踪。这种电路在具有普通天线方向图的雷达中应用意义不大。因为在这些天线方向图中  $|\sqrt{\Delta/\Sigma}| < 1$  的条件在旁瓣位置也可能存在,而平板天线通过正确设计完全可以在大的角度范围内如  $\pm 60^\circ$  实现差包和,如图 2 所示。

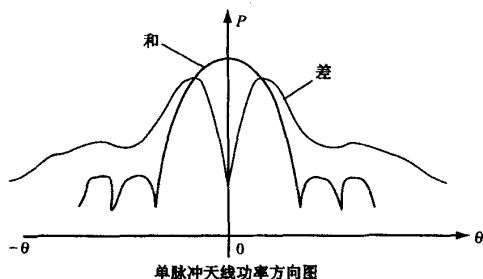


图 2 典型差包和方向图

这对导引头来讲是十分有利的,这也许是目前平板天线在导引头上得到广泛应用的一个原因吧。下面将一个平板天线的实际方向图部分测试结果列入表 1,并给出 4 张两种天线的实测方向图,以作比较。

表 1 天线方向图测试结果

频率 (MHz)	-250	-200	-100	$F_0$	+100	+200	+300
G(dB)	26.4	26.72	27.4	27.16	27.09	27.27	26.9
左-SLL(dB)	18.22	16.43	16.04	17.85	19.03	20.14	20.1
右-SLL(dB)	18.02	18.33	18.76	19.54	21.35	22.94	18.9
$\theta_{0.5} (^{\circ})$	7.12	7.1	6.88	6.95	6.98	7.01	7.03
左 $\sqrt{\frac{\Delta}{\Sigma}}/1^{\circ}(\%)$	19.8	22.2	21.8	22.3	21.4	18.8	19
右 $\sqrt{\frac{\Delta}{\Sigma}}/1^{\circ}(\%)$	22	20.4	20.9	22.4	20.5	19.5	20
零深(dB)	33.9	38.89	47.6	43.88	36.43	36.24	35
差峰差(dB)	0.28	0.47	0.62	0.18	0.2	0.33	0.1
电轴漂移	$\leq 1\% * \theta_{0.5}$						

续表 1

E 平 面	左 - SLL(dB)	17.52	19.05	20.94	21.59	20.22	19.26	14
	右 - SLL(dB)	17.7	19.27	20.71	21.95	21.46	19.78	13.5
	$\theta_{0.5}(^\circ)$	8.1	8.3	8.22	8.28	8.05	7.9	7.2
驻波比		$\leq 2$						

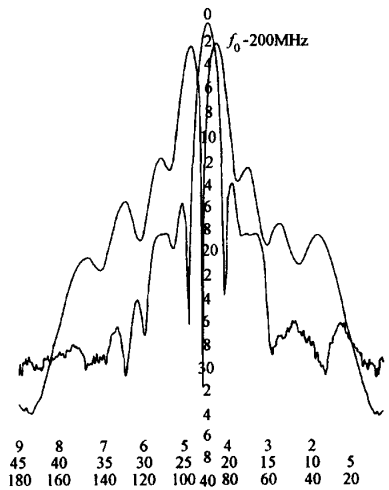


图 3 一种 X 波段差包和天线方向图曲线

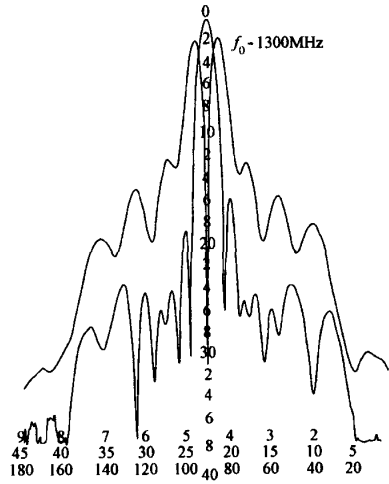


图 4 一种 X 波段差包和天线方向图曲线

从两种天线功率方向图明显看出,普通天线方向图不管是在中心频率,还是在稍偏中心频率

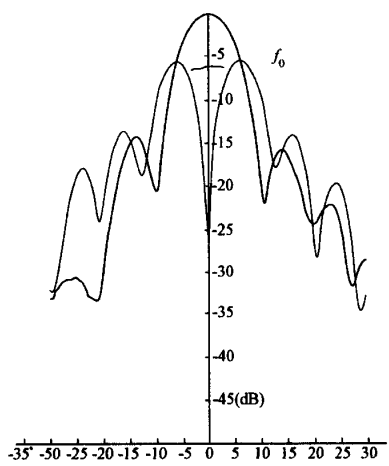


图 5 一种 X 波段普通天线方向图曲线

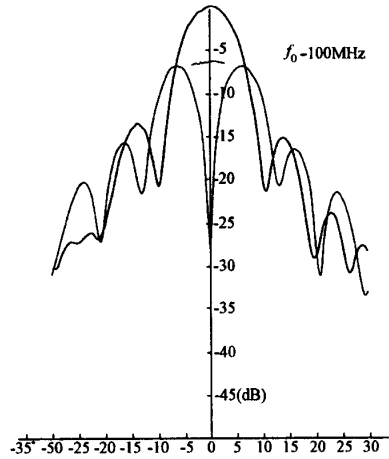


图 6 一种 X 波段普通天线方向图曲线

时,几乎从第一旁瓣到第二、第三…都发生和差波瓣交叉现象,出现一、二、三…个零点,只要达到捕捉门限,在这些位置都可能形成旁瓣捕捉。

而平板天线通过适当的设计可在很宽的频率很大的角度范围实现差零值的唯一性<sup>[1~2]</sup>,达到抗旁瓣捕捉的目的。该天线的方向图在  $\pm 60^\circ$  范围内很好地实现了差包和。

### 3 关于“波束锐化”的设想

众所周知,天线的波束宽度直接影响着雷达

的可分辨最小体积单元,为了提高分辨,必须增大天线的口径尺寸,以达到降低天线波束宽度的目的,天线波束宽度与口径尺寸有如下关系:

$$\theta_{0.5} = \frac{A \cdot \lambda}{D}$$

式中,  $A$  为常数随孔径锥削分布增大而增大,一般在 60 左右;  $D$  为天线的口径尺寸。可以看出当口径尺寸增加两个数量级,波束宽度可降低两个数量级,另一个得到窄波束的方法,就是改变雷达的体制如用综合孔径方法,此方法不在本文讨论范围。那么是否可以通过其它方法,比较简便实现波束锐化,下面将就这一个问题进行讨论。

比相单脉冲平板天线的方向图具有“差包和”的特点,这一现象上面已经陈述了,进一步的讨论是否可以通过一定的技术途径进行“波束锐化”,从下面的分析可以看出是存在这样的可能。

由于在和差功率方向图交叉点以内和大于差,而在交叉点以外差大于和,可以用简单的相减方法进行运算,在差零值深度足够深的前提下,如一般要求  $< -30\text{dB}$ , 和减差的结果形成一个新的所谓“方向图”,如下图。

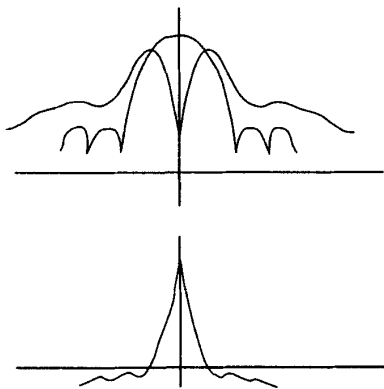


图 7 和差相减后形成的新的“锐化和方向图”

这种新方向图也有其半功率角度及旁瓣电平,只不过其半功率角仅有天线原真正半功率角的 50 分之一左右,而其旁瓣也要比天线固有的旁瓣低得多。这一设想若能实现,对提高雷达的角分辨力是十分有利的,从雷达的可分辨的最小体积单元可以看出:

$$V = \frac{C\tau}{2} \cdot \frac{\pi R^2 \theta^2}{4}$$

式中,  $C$  为光速,  $\tau$  为发射脉冲宽度,  $R$  为目标的距离,它们都是确定的;  $\theta$  为天线的半功率角<sup>[3]</sup>。只要  $\theta$  降低两个数量级,雷达的一维分辨单元可提高三分之四个数量级,这对对称性保证好的天线,零深做到  $-40\text{dB}$  的平板天线是完全可能的。如一个  $\Phi 250$  左右的天线半功率角为  $10^\circ$  左右,“锐化”后的半功率角可在  $6^\circ$  左右。下面分析一下实现锐化的可能性,首先是高频系统和差相减法形成窄波束,从图 8 可看到移相器  $\Phi$  为 0 和  $\pi$  两种状态;当目标刚处在天线等强线左侧,移相量为 0,和差器信号反相,大部分信号进入双 TE 臂被负载吸收;当和信号强度高于差信号强度 40dB 时,有 3dB 和能量进入 H 臂即 37dB 左右能量进入 H 臂;当目标偏离等强度线即 0 位稍大时,差能量由小变大,当达到和差能量相差 3dB 时,和差反相进入 E 臂被吸收,由于不平衡又有 3dB 能量进入 H 臂,此时进入 H 臂的信号强度比在等强度线附近的低 3dB,即定义为合成窄波束的半功率点,当目标处于和差方向图交叉点角度时,此时和信号与差信号强度相同,相减为零,为新波束的第一零点;当目标处于天线等强度线右方,移相器处于移相  $\pi$  状态,这样同样可得出如上的分析结果,得出窄波束的右边的半功率点、第一零点、第一旁瓣……。

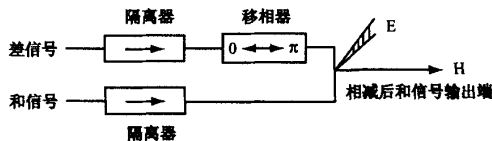


图 8 高频合成窄波束

其次从接收机上实现和差相减形成窄波束可能更容易些,即在相位检波电路引出一路信号控制电控移相器,当和差信号同极性时,使移相器处于  $\pi$  状态,当和差信号反极性时使移相器处于 0 状态。即可得到一种新型的波束,只有几分的“天线方向图”。在接收机上利用检波方法,对和差信号进行检波也可能实现“波束锐化”,在此不作讨论。

当然若通过计算机采样处理可能会更简单,即同时对和差信号强度及极性进行实时采样,控制移相器 0 或  $\pi$  状态,可实时得出窄波束。

## 4 结束语

差包和方向图设计使单脉冲天线的差零值实现了唯一性,使利用特殊天线方向图进行抗旁瓣跟踪成为可能,使多年另人头疼的旁瓣跟踪问题有了较为简单的解决方法。这在战术导弹导引头上是一个十分有用的抗干扰措施,由于该方法理论分析明确,实施方法简便,可在弹上广为采用,

对提高战术导弹抗干扰能力有非常美好的前景。

以上分析的防止旁瓣捕捉特别是所谓“波束锐化”仅是个人的一些不成熟的想法,在此提出仅供参考。

## 参考文献

- [1] Phillip N. Richardson and Hung yuet yee. Design and Analysis of slotted waveguide Antenna Arrays [J]. Microwave Journal, 1988, 31(6).
- [2] Johnson and Jasik. The Antenna Engineering Handbook [M]. USA: McGraw-Hillinc, 1984.
- [3] 罗荣根. 系统设计: 飞航导弹雷达导引头(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1991, 8.

## “毒刺”防空导弹

“毒刺”是美国通用动力公司波莫纳分公司研制的单兵肩射防空导弹系统,用于战区前沿及要地防空。该导弹是在“红眼睛”导弹基础上发展而成。该系统于 1972 年 7 月开始研制,1981 年 2 月进入部队服役。与“红眼睛”相比,该弹改进了制导系统、发射系统和发动机,增加了敌我识别器。

“毒刺”有三种型号,主要区别于制导系统。基本型的“毒刺”导弹 FIM-92A 于 1972 年开始研制,1981 年开始在美军服役。具有被动光学寻的导引头(POST)的“毒刺”FIM-92F 于 1977 年开始研制,1987 年开始部署。最新型“毒刺”FIM-92C 于 1984 年开始研制,1989 年开始交付美国陆军服役。

“毒刺”导弹正被广泛采用模块化设计,改进导引头形成不同型号。“毒刺”导弹具有全向攻击能力及抗干扰能力好的优点,特别是“毒刺”-POST 及“毒刺”-RAM,由于后者能够周期地更换上微处理器的软件,可以对付任何新威胁而不必重新设计导弹。“毒刺”导弹的弹径与“红眼睛”一样,为 70mm,但弹长增至 1.52m,弹重增至 10.13kg。其最大作战半径提高到 5.6km,最大作战高度提高到 4.8km。

具有全向攻击能力,且抗红外干扰能力强的“毒刺”导弹被大量出口到第三世界国家。随着国际形势的变化。不少“毒刺”导弹流落到民间。由于这种导弹非常先进,对军用飞机和民用飞机的威胁很大,如在阿富汗战争中游击队曾发射了 340 枚导弹,命中目标 269 个,有效率达 79%。万一这种导弹落在恐怖分子手里,后患无穷。因此,美国人又不得不出高价去收购散失在各地的“毒刺”。

“毒刺”的性能好、重量轻,可赋予其多种用途,美国人已将这种导弹挂载在直升机和轻型飞机上,以提高它们的空对空自卫能力和空对地攻击能力。

它是一个轻便、耐用、易操作、成本低的导弹系统,它的缺点是战斗部威力较小。

(陈芳)

## 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>