

# 卫星导航系统天线阵接收机波束指向误差分析\*

李 敏, 曾祥华, 聂俊伟, 王飞雪

(国防科技大学电子科学与工程学院卫星导航研发中心, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 研究表明: 卫星导航系统阵元几何位置误差是影响波束指向误差的主要因素, 而卫星和接收机位置误差则影响甚微, 其中千米级的卫星位置误差以及接收机位置误差导致的波束指向误差不超过  $0.1^\circ$ , 而毫米级的阵元几何位置随机误差可导致典型 7 阵元天线阵波束指向误差达到几度。该研究成果可为卫星导航系统天线阵接收机的设计提供依据。

**关键词:** 卫星导航系统; 天线阵; 最大信噪比准则; 波束指向误差

中图分类号: TN973.3 文献标识码: A

## Analysis on beam pointing error of antenna array receivers in satellite navigation systems

Li Min, Zeng Xianghua, Nie Junwei, Wang Feixue

(Satellite Navigation R&D Center, School of Electronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

**Abstract:** The study results show that kilometer-level satellite position uncertainty and receiver position uncertainty only lead to less than  $0.1$ -degree beam pointing error, and millimeter-level antenna array element position error can lead to several degrees' beam pointing error in a classic 7-element array. This study will provide reference to the design of antenna array receivers in satellite navigation systems.

**Key words:** satellite navigation systems; antenna array; maximum SINR criterion; beam pointing error

## 0 引言

卫星导航系统中, 到达地球表面的卫星信号十分微弱, 接收机极易受到干扰。采用数字波束形成算法的天线阵可灵活控制波束指向和增益。在最大信噪比准则下, 根据卫星方向和天线阵元几何分布等先验信息, 可使天线阵分别形成对准每一个可视卫星的波束, 有效增大各个卫星信号的接收信噪比, 提高测距和定位精度<sup>[1-2]</sup>。然而, 引导波束指向的先验信息可能存在误差, 例如星历、接收机位置、阵元位置误差等, 均可能导致天线阵波束指向偏离实际卫星方向, 降低天线阵接收增益。

迄今为止研究文献大多关注最大信噪比准则下波束指向误差的影响和校正<sup>[3-5]</sup>, 这些研究中波束指

向误差的大小均基于理论假设, 而关于波束指向误差的实际范围以及影响因素却未见报道。本文定量分析了先验信息误差对卫星导航系统天线阵波束指向的影响, 可为天线阵接收机的工程设计提供参考。

## 1 阵列信号模型

假设天线阵由  $N$  个全向阵元组成, 接收机参考点处的有用信号为  $s(t)$ , 其余信号以及各种干扰用  $J_i(t)$  表示, 那么总的阵列接收信号可表示为  $N$  维矢量<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 s(t) + \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{a}_i J_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中  $N_j$  表示干扰数目,  $\mathbf{a}_0$ 、 $\mathbf{a}_i$  分别为有用信号和干扰的导向矢量,  $\mathbf{n}(t)$  为阵列通道噪声矢量, 一般假设各通道噪声相互独立, 且信号、干扰、噪声之间互不相关。

阵列信号  $\mathbf{x}(t)$  的统计特性是权值计算的重要根据, 其自相关矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}_{xx} = E(\mathbf{x}^H(t)\mathbf{x}(t)) = \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_m \quad (2)$$

式中  $\mathbf{R}_s$ 、 $\mathbf{R}_{jj}$  和  $\mathbf{R}_m$  分别表示有用信号、干扰和噪声的自相关矩阵。卫星导航系统中, 有用信号到达接收机的功

\* 基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0144)

收稿日期: 2011-05-04; 2011-07-08 修回。

作者简介: 李敏(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向为卫星导航信号接收、干扰抑制以及天线阵技术等。

率一般远远低于噪声和强干扰,常用  $\mathbf{R}_{xx}$  代替  $\mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_m$ ,因此最大信干噪比(Maximum SINR)准则下的最优加权矢量可表示为:

$$\mathbf{w} = \mu(\mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_m)^{-1}\mathbf{a}_0 \approx \mu\mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{a}_0 \quad (3)$$

式中  $\mu$  为归一化常数,  $\mathbf{R}_{xx}$  可根据阵列接收信号  $\mathbf{x}(t)$  通过  $E(\mathbf{x}(t)^H\mathbf{x}(t))$  直接估计,而有用信号的导向矢量  $\mathbf{a}_0$  可根据先验信息获得。可以看出,  $\mathbf{R}_{xx}$  (主要成分为噪声和强干扰) 主导着天线阵方向图的零陷位置,有用信号的导向矢量  $\mathbf{a}_0$  主导着天线阵的主波束指向。

根据加权矢量  $\mathbf{w}$ , 遍历空间入射角可得到天线阵方向图函数<sup>[7]</sup>:

$$F(\theta, \varphi) = |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta, \varphi)| \quad (4)$$

式中,  $|\cdot|$  表示对复数取模,  $\mathbf{a}(\theta, \varphi)$  表示仰角为  $\theta$ 、方位角为  $\varphi$  的信号导向矢量,又称扫描矢量。天线阵方向图最大值对应的信号入射方向  $(\theta_M, \varphi_M)$  为波束指向。假设卫星信号方向为  $(\theta_0, \varphi_0)$ ,那么天线阵波束指向在仰角方向的误差为  $\theta_0 - \theta_M$ , 在方位角方向的误差为  $\varphi_0 - \varphi_M$ , 而  $(\theta_0, \varphi_0)$  和  $(\theta_M, \varphi_M)$  之间的立体角误差为:

$$\beta = \arccos(\sin\theta_0 \sin\theta_M + \cos\theta_0 \cos\theta_M \cos(\varphi_0 - \varphi_M)) \quad (5)$$

下面分析根据先验信息计算导向矢量  $\mathbf{a}_0$  的方法。取天线阵平面的几何中心为参考点  $O$ , 建立直角坐标系如图 1 所示,  $x$  轴指向用户所在地的东,  $y$  轴指向用户所在地的北,  $z$  轴向上,  $x-y-z$  满足右手定则。假设卫星信号以  $(\theta_0, \varphi_0)$  入射到天线阵, 阵元  $n$  相对天线阵几何中心的坐标为  $(px_n, py_n, pz_n)$ , 那么卫星信号的导向矢量  $\mathbf{a}_0$  的第  $n$  个分量可表示为:

$$a_{0n} = \exp(2\pi j(p_{x_n} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 + p_{y_n} \sin\theta_0 \sin\varphi_0 + p_{z_n} \cos\theta_0)/\lambda) \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为载波波长。

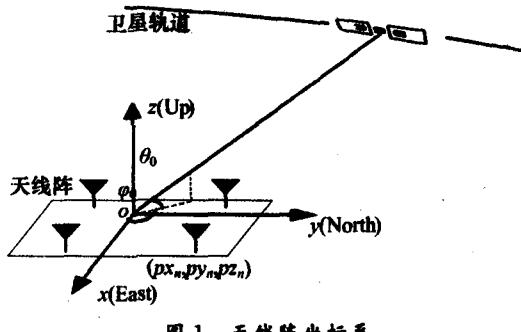


图 1 天线阵坐标系

卫星信号的仰角  $\theta_0$ 、方位角  $\varphi_0$  可根据卫星位置和接收机位置计算得到。首先通过坐标系变换将地心惯性(ECI)坐标系下的卫星坐标和用户大地坐标系(经度、纬度、高度)下的接收机参考点坐标均变换到地心固(ECEF)坐标系下,假设卫星的 ECEF 坐标为

万方数据

$(x_s, y_s, z_s)$ , 接收机参考点的 ECEF 坐标为  $(x_u, y_u, z_u)$ 。然后计算卫星到接收机视线方向的单位矢量  $\mathbf{e}$ :

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} / \|\mathbf{d}\|, \text{ 其中 } \mathbf{d} = (x_s - x_u, y_s - y_u, z_s - z_u) \quad (7)$$

式中  $\|\cdot\|$  表示求矢量的范数。最后,将 ECEF 坐标系下的单位矢量  $\mathbf{e} = (e_x, e_y, e_z)$  变换到东北天(ENU)坐标系  $(e_e, e_n, e_u)$ ,那么信号到达接收机参考点的仰角、方位角可由下式求得:

$$\theta_0 = \arcsin(e_u), \varphi_0 = \arctan2(e_e, e_n) \quad (8)$$

式中  $\arctan2$  表示四象限反正切函数,仰角  $\theta_0$  的取值范围为  $0 \sim \pi/2$ , 方位角  $\varphi_0$  的取值范围为  $-\pi \sim \pi$ 。

可见,当卫星位置坐标或接收机参考点坐标的信  
息不准确时,卫星信号入射角的估计将产生误差。当把含有误差的卫星位置坐标、接收机参考点坐标和阵元几何位置坐标代入公式(6),计算得到的有用信号导  
向矢量也存在误差,从而影响阵列加权矢量的计算以  
及天线阵的波束指向。需要说明的是,若数字波束形  
成的加权网络在中频或基带,波束指向误差还与接收  
机的硬件电路有关,如天线间的互耦、通道失配以及  
ADC 量化误差等,由于篇幅所限,本文仅研究硬件特  
性理想情况下由先验信息造成的波束指向误差范围。

## 2 波束指向误差的定量计算

根据上一节的分析,卫星位置坐标、接收机参考点坐标、阵元几何位置坐标三者的精度是影响天线阵波束指向的重要因素,下面定量分析这些因素导致的波束指向误差范围。

### 2.1 星历数据精度

卫星导航系统中,星历数据按照精度可分为历书、广播星历、精密星历三大类,其中历书的轨道精度在千米量级,广播星历的轨道精度为米级,精密星历的轨道精度可达厘米级。天线阵波束形成对信号方向信息的实时性要求较高,不适合采用精密星历,下面分别用广播星历和历书数据对卫星位置进行预测,分析这两种类型的星历数据对波束指向误差的影响。

广播星历取自 IGS 网站的广播星历数据文件 abpo 1380.10n,参考时刻为 2010 年 5 月 18 日 14:00:00; 历书数据取自 USCG 网站 2010 年 5 月 15 日发布的历书数据文件 135.alm。假设接收机参考点坐标位于北纬 39.9°、东经 116.4°、高 31.2m 的精确已知点,以广播星历数据推算的卫星位置(轨道精度为米级)作为参考,考查历书数据(轨道精度为千米级)推算的卫星位置与参考值的误差以及相应的卫星仰角、方位角计算误差,如图 2 所示。

由图 2 可见,使用历书数据计算的卫星位置虽然与

使用广播星历计算的卫星位置相差几百到几千米,但对于地面接收机而言,使用两种数据计算得到的卫星信号仰角或方位角都相差不到 $0.1^\circ$ 。经计算,对于地球表面的其它位置,卫星信号到达角计算误差也未超过 $0.1^\circ$ 。可以推断,即使卫星轨道精度由米级提高到厘米级,卫星信号到达角计算误差也不过由 $0.1^\circ$ 降低到更小。

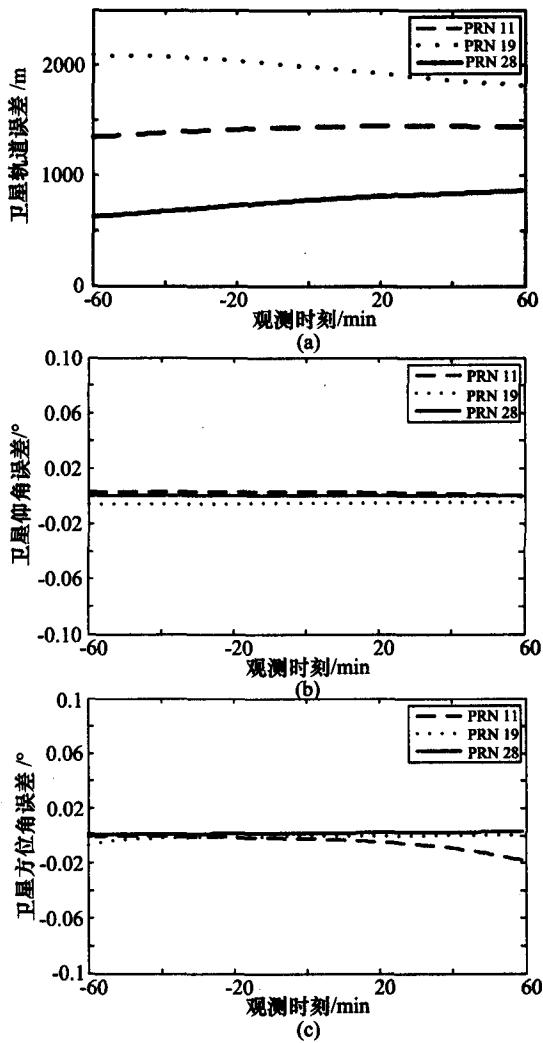


图 2 星历数据误差导致的卫星仰角和方位角估算误差

直观地解释, GPS 卫星的轨道高度为两万多千米,当卫星位置( $x_s, y_s, z_s$ )的推算误差为千米级(不到轨道高度的万分之一)时,根据公式(7),卫星到接收机视线方向的单位矢量  $e$  变化非常小,因此根据公式(8),仰角、方位角的计算误差也非常小。需要注意的是,星历数据的使用需要参考数据的有效期,一般广播星历的有效时间为 2 小时,历书数据的有效时间长达几个月<sup>[8]</sup>。

## 2.2 接收机位置误差

对于监测站、参考站来说,接收机位置是精确已知的;对于位置未知的接收机来说,需要外部输入接收机的概略位置,或等待接收机给出定位结果之后才能形成指向精确的波束。下面定量分析接收机位置估计误差方数据

对天线阵波束指向误差的影响。

使用上一小节中的广播星历数据,取参考时刻的卫星位置坐标(该坐标可认为是精确的),当接收机参考点的经纬度或高度估计不准确时,接收机位置误差也随估计误差的增大而增大,计算卫星仰角、方位角计算偏差与接收机位置误差的关系,如图 3 所示。

可见,卫星仰角、方位角计算偏差随接收机位置误差的增大而增大,当接收机位置误差在 10km 范围内时,造成的卫星仰角、方位角计算误差均小于 $0.1^\circ$ 。接收机参考点位置误差与卫星位置误差对波束指向误差的影响是类似的,当接收机参考点位置坐标( $x_u, y_u, z_u$ )误差为千米级(不到轨道高度的万分之一)时,根据公式(7),卫星到接收机视线方向的单位矢量  $e$  变化非常小,因此根据公式(8),仰角、方位角的计算误差也非常小。

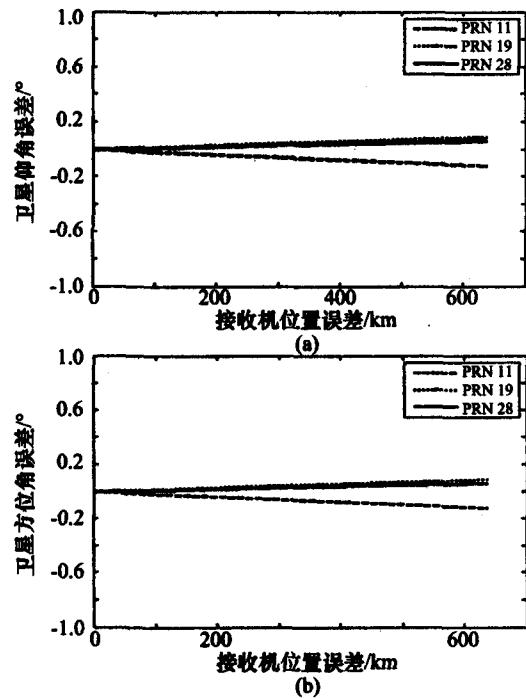


图 3 接收机位置误差导致的卫星仰角方位角估算误差

## 2.3 阵元几何位置误差

阵元几何位置指阵元相对于接收机参考点的位置,其误差根据产生原因可分为两类:一类是天线阵安装平台姿态不精确引起的整体角度误差,其对波束指向造成的影响较为简单,平台俯仰角安装误差将导致波束指向仰角产生误差,平台方位角安装误差将导致波束指向方位角产生误差;另一类是由机械安装、重力或风力变形、天线架变形等因素引起的单个阵元位置随机误差,不具可预测性。阵元位置随机误差示意图如图 4 所示,“○”形标记表示阵元的预测位置,“\*”形标记表示阵元的实际位置。

下面分析阵元位置随机误差对波束指向的影响。以典型的 7 阵元中心圆阵为例,相邻阵元间距半个载

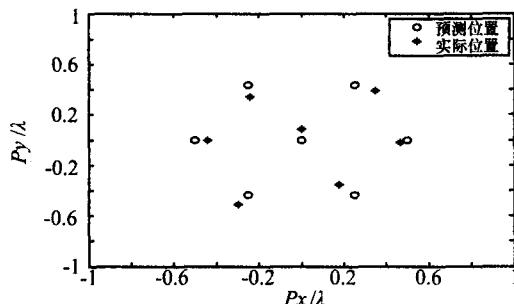
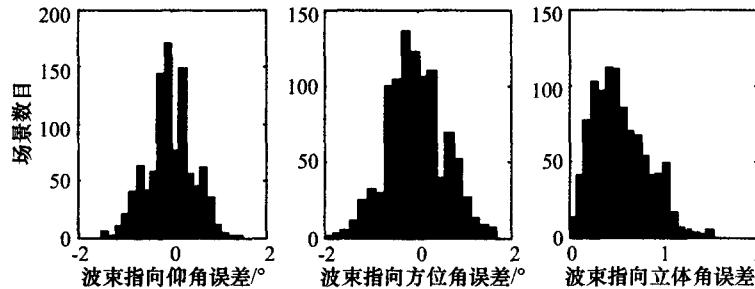


图 4 随机阵元位置误差示意图

波波长即  $0.5\lambda$ 。卫星导航系统的载波波长一般在厘米量级,例如 GPS L1 载波波长  $\lambda$  为 19cm。根据天线架的材质不同,阵元安装误差一般在毫米量级,例如钢质平台的安装误差为  $\pm 1\text{mm}$ ,混凝土平台的安装误差为  $\pm 3\text{mm}$ ,约为载波波长  $\lambda$  的百分之一。因此,假设阵元位置坐标误差  $\Delta p_{xn}, \Delta p_{yn}, \Delta p_{zn}$  在  $\pm 0.01\lambda$  内均匀分布,进行 1000 次蒙特卡罗仿真,统计波束指向误差直方图如图 5 所示。

图 5 阵元位置误差范围不超过  $0.01\lambda$  时的波束指向误差统计

根据图 5 可见,波束指向的仰角、方位角误差范围在  $\pm 2^\circ$  之内。需要指出的是,仰角误差和方位角误差均为零的场景很罕见,仰角误差为零时方位角误差一般较大,波束指向立体角误差的统计结果也说明了这点,1000 次仿真中立体角误差小于  $0.1^\circ$  的场景数不到 20 次。统计结果显示,立体角误差的平均值为  $0.54^\circ$ ,95% 误差落在  $1.05^\circ$  以内。

将上述仿真中的阵元位置坐标误差范围递增到  $\pm 0.1\lambda$ ,统计每组坐标误差范围对应的波束指向平均误差和 95% 误差,如图 6 所示。

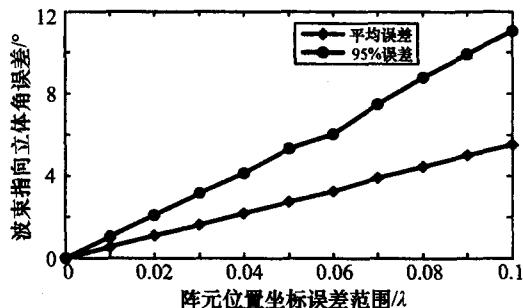


图 6 波束指向误差随阵元位置误差范围的变化曲线

由图 6 可见,随阵元位置坐标的误差范围增大,波束指向误差也随之增大,当阵元位置坐标误差范围达到  $\pm 0.1\lambda$  时,波束指向立体角的平均误差接近  $6^\circ$ ,95% 误差落在  $11^\circ$  以内。需要注意的是,以上数值分析中各个阵元的实际位置相比预测位置的偏移方向和大小是随机的;若所有阵元的实际位置相比预测位置发生整体偏移,即向同一个方向移动了相同距离,则等效于参考点位置发生了变化,而阵元相对参考点的位置没有改变,这种误差可归于接收机位置误差进行分析。

综上所述,阵元位置误差对波束指向误差的影响较大,一般阵元安装位置误差在毫米量级,导致的波束指向误差可达  $1^\circ$  甚至更大。根据天线阵接收机可容忍的波束指向误差范围,可合理分配天线阵的安装和在线校正精度指标。

### 3 结语

针对卫星导航系统,本文定量分析了星历数据类型、接收机位置误差以及阵元几何位置误差对波束指向误差的影响。结果表明,即使使用精度最差的历书数据,造成的波束指向误差也不超过  $0.1^\circ$ ;一般接收机位置估计误差在千米量级,造成的波束指向误差同样也不超过  $0.1^\circ$ ;而阵元几何位置误差是影响波束指向误差的主要因素,对于典型的 7 阵元中心圆阵,当阵元位置随机误差范围由  $\pm 0.01\lambda$  增大至  $\pm 0.1\lambda$  时,波束指向平均误差由  $0.5^\circ$  增大到  $6^\circ$ ,95% 误差由  $1^\circ$  增大到  $11^\circ$ 。■

### 参考文献:

- [1] Lorenzo DS De, Gautier J, Rife J, et al. Adaptive array processing for GPS interference rejection [C]. Long Beach: Proc. of ION GNSS 2005, 2005.
- [2] Gold K, Brown A, Stolk K. Bistatic sensing and multipath mitigation with a 109-element GPS antenna array and digital beam steering receiver [C]. San Diego: Proc. of ION NTM 2005, 2005.
- [3] Compton RT Jr. The effect of random steering vector errors in the applebaum adaptive array [J]. IEEE Trans. Aerospac. Electron., 1982, 292–400.
- [4] 冯存前, 童宁宁. 一种自适应阵列指向误差校正方法 [J]. 空军工程大学学报自然科学版, 2007, 8(4): 53–57.
- [5] 武思军, 张锦中. 存在指向误差时的稳健自适应波束形成算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(4): 531–535.
- [6] 龚耀寰. 自适应滤波 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [7] 杨维, 陈俊仕, 等. 移动通信中的阵列天线技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2005.
- [8] Kaplan ED, Hegarty CJ. GPS 原理与应用 [M]. 宋艳红, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.

## 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>