

文章编号:1001-893X(2008)06-0025-05

## 基于微分几何的平面天线阵列测向精度研究\*

吕泽均

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:**利用阵列流形的微分几何作为分析工具,构造了实际使用中常见的平面天线阵的几何结构,并对这些阵列结构的测向精度进行了研究和全面仿真。通过比较各种天线阵几何结构的优劣,可以从中选择一种合适的、最优的阵列结构,避免设计的盲目性和随意性。这为超分辨阵列结构的选择和设计提供了一条有效的途径,在实际应用中将具有十分重要的参考价值。

**关键词:**平面天线阵列;波达方向估计;阵列流形;微分几何;测向精度;天线阵列

中图分类号:TN802 文献标识码:A

## Study on the Direction - Finding Accuracy of Planar Antenna Array Based on Differential Geometry

*LÜ Ze-jun*

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** The array manifold of sensor array is analysed using the tools of differential geometry, and a number of planar array configuration in the actual use is constructed. The ultimate direction - finding (DF) accuracy of these array geometries have been investigated and simulated. The suitable optimal array geometry is selected through comparison of diverse array geometries to avoid the blindness and willingness of the design. It supplies a valid way for the choice and design of super - resolution array configuration, and is of great value to actual applications.

**Key words:** plane antenna array; DOA estimation; array manifold; differential geometry; direction - finding (DF) accuracy; antenna array

### 1 引言

波达方向(DOA)估计在电子侦察与对抗、智能天线、雷达和通信等领域的应用已成为目前研究的热点,受到人们的广泛重视和深入研究,在某些领域已得到广泛应用。自 R. O. Schmidt 提出 MUSIC 算法<sup>[1]</sup>和 R. Roy 提出 ESPRIT 算法<sup>[2]</sup>以来,子空间阵列测向(DF)技术得到了迅速发展,理论与实践均已证明这类子空间方法具有高精度(其估计精度接近 Cramer - Rao 方差下限)和高分辨的特性<sup>[3-4]</sup>。子空间阵列测向系统主要是根据阵列接收信号的统计

特性来估计辐射源的波达方向,大多数子空间 DF 算法在渐进条件(无限的快拍数或无限的信噪比)下具有无限的分辨能力,因此称为“超分辨”算法。但在非渐进条件下,系统的测向性能受到所使用的 DF 算法和阵列的几何结构的影响,同一种测向算法对不同的阵列结构会有不同的测向性能。在过去的阵列测向技术研究中,为了提高测向性能,人们往往只对测向算法感兴趣并进行了大量的研究,忽略了阵列结构对测向性能的影响。近来的研究表明<sup>[5-7]</sup>,阵列结构从根本上限制了测向系统的最终性能,而阵列结构与阵列流形密切相关,阵列流形又

\* 收稿日期:2008-03-14;修回日期:2008-05-15

与阵元的数目、位置及特性等有关。另外,在进行实际侦测系统总体方案设计选择阵列结构时,往往缺乏理论支撑和依据。因此,在实际的超分辨测向系统的设计过程中,如何根据实际的天线安装环境和性能要求选择适当的阵列结构是一个十分重要的、有意义的课题。

本文以阵列流形曲线的微分几何为工具,对超分辨阵列测向系统的6种常用阵列几何结构的测向精度进行了研究和计算机仿真,并得出了一些有实际意义的结论。通过比较各种天线阵结构的优劣,可以减少系统设计的盲目性和随意性,这在实际应用中将具有十分重要的参考价值,将使超分辨阵列测向系统的设计能力和工程实用化上一个新的台阶。

## 2 阵列模型

假设天线阵由N个全向阵元组成,M个远场窄带辐射源从方向 $p = [p_1, \dots, p_M]^T$ 入射到阵列上,则阵列输出信号向量 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(p) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{s}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是入射信号的复包络向量, $\mathbf{n}(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为加性噪声向量, $\mathbf{A}(p) \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 为流形(响应)向量矩阵,其定义为

$$\mathbf{A}(p) = [\mathbf{a}(p_1), \dots, \mathbf{a}(p_M)] \quad (2)$$

其中 $\mathbf{a}(p_i) \in \mathbb{C}^N$ 称为阵列响应向量(或称为方向向量),表示阵列对方向为 $p_i$ 的入射信号的复响应。对于同时测量方位角和俯仰角的二维平面阵列DF系统, $p = (\theta, \phi)$ ( $\theta$ 为方位角, $\phi$ 为俯仰角),响应向量为

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \exp\{-j\pi(\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}(\theta, \phi))\} = \exp(-j\pi \mathbf{R}(\theta) \cos \phi) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]^T \in \mathbb{R}^{N \times 3}$ 是以半波长为单位的传感器位置构成的矩阵, $\mathbf{k}(\theta, \phi) = \pi [\cos \theta \cos \phi, \sin \theta \cos \phi, \sin \phi]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 是波数向量。 $\mathbf{R}(\theta) = r_x \cos \theta + r_y \sin \theta$ 表示平面阵沿着方位角 $\theta$ 方向的投影,称为平面阵沿着该方向的等效线阵, $[r_x, r_y]$ 表示平面阵元的坐标( $x, y$ )以半波长为单位。

阵列流形定义为参数空间 $\Omega$ 上的所有响应向量的集合,即:

$$\mathbf{A}(p) = \{\mathbf{a}(p) : p \in \Omega\} \quad (4)$$

阵列流形描述了复N维空间 $\mathbb{C}^N$ 中的一个几何体,它完全表征了天线阵的特征,并且将实际天线阵映射为一个N维复空间,根据传感器的位置和方向

特性可以计算天线阵的阵列流形,这为用微分几何的知识研究阵列天线的测向性能提供了途径和可能<sup>[5~7]</sup>。

列流形在子空间测向算法中起到十分重要的作用。为了用微分几何来研究阵列流形,将曲面看成是由曲线构成的,比如将平面阵的阵列流形曲面可以看成由 $\theta$ 曲线组成的曲线簇或由 $\phi$ 曲线组成的曲线簇,即: $\theta$ 曲线簇为

$$C_{\theta, \phi_0} = \{\mathbf{a}(\theta, \phi_0) : \theta \in [0^\circ, 360^\circ]\} \quad (5)$$

$\phi$ 曲线簇为

$$C_{\theta, \phi_0} = \{\mathbf{a}(\theta, \phi_0) : \theta \in [0^\circ, 90^\circ]\} \quad (6)$$

$\phi$ 曲线即是超螺旋线又是测地线,而 $\theta$ 曲线两者都不是。由于超螺旋线的所有曲率从一个点到另一个点不会发生变化,因而可由其低阶曲率递推计算得到<sup>[6]</sup>。

## 3 基于阵列流形曲线微分几何的测向精度

根据微分几何,曲线最基本的特征就是它的弧长 $s$ ,其定义为

$$s(p) = \int_0^p \left| \frac{d \mathbf{a}(p)}{dp} \right| dp \quad (7)$$

弧长的变换率定义为

$$s(p) = \frac{ds}{dp} = |\mathbf{a}'(p)| \quad (8)$$

式中, $p$ 表示线阵(LA)流形的方位角 $\theta$ 或平面阵的 $\phi$ 曲线的俯仰角 $\phi$ 。因此, $\phi$ 曲线和 $\theta$ 曲线的特征可表示为

$$\begin{aligned} S_\phi(\phi) &= \pi |\mathbf{R}(\theta)| (1 - \cos \phi) \\ S_\phi(\phi) &= \pi |\mathbf{R}(\theta)| \sin \phi \\ S_\theta(\theta) &= \pi |\mathbf{R}(\theta)| \cos \phi \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{R}(\theta) = r_x \cos \theta + r_y \sin \theta$ , $\mathbf{R}_\phi(\theta) = \partial \mathbf{R}(\theta) / \partial \theta$ 。

弧长的变化率是流形曲线的局部性质,对阵列的测向性能有很大的影响。而流形曲线的长度也是它的重要特性,影响阵列的模糊性,因为阵列模糊是由于估计的信号子空间与阵列流形伪相交引起的。超分辨阵列测向系统的测向性能包括检测能力、分辨力和DOA估计精度等性能,根据阵列流形的微分几何可以定量地研究阵列的几何结构对这些性能的影响,这样就能评价和比较各种阵列结构的测向性能。这些性能不仅与观测时间(快拍数) $L$ 和SNR有关,而且还与阵列的物理特性即阵列流形的局部结构有关。

众所周知,CRB表示任一无偏估计值所能达到

的最小估计误差方差,它与估计参数时所使用的估计值无关。在阵列信号处理中,CRB 只与快拍数、信噪比、阵元位置及其特性有关。在阵列模型(1)中,克拉美-罗下界(CRLB)是真实参数向量  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^M$  的任意无偏估计向量  $\hat{\mathbf{p}}$  的估计误差协方差矩阵的下界。假设阵列由  $N$  个全向传感器构成,有  $M$  个窄带信号入射到该阵列,加性传感器噪声是功率为  $\sigma^2$  的零均值白高斯过程,则对充分大的快拍数  $L (L \gg 1)$ ,确定性 CRLB 的表达式为<sup>[3]</sup>

$$\text{CRB}[\mathbf{p}] = \frac{\sigma^2}{2L} (\text{Re}[\mathbf{H} \odot \mathbf{P}^T])^{-1} \in \mathbb{R}^{M \times M}, \mathbf{p} \in \mathbb{R}^M \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{H} = \dot{\mathbf{A}}^H \mathbf{P}_A^{-1}$ ,  $\dot{\mathbf{A}} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ ,  $\mathbf{P} = E\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_M] \in \mathbb{C}^{N \times M}$  是阵列流形向量矩阵,  $\dot{\mathbf{A}} = [\dot{\mathbf{a}}_1, \dots, \dot{\mathbf{a}}_M] \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ,  $\mathbf{P}_A^{-1} = \mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$ 。而随机性 CRLB 的表达式为<sup>[4]</sup>

$$\text{CRB}[\mathbf{p}] = \frac{\sigma^2}{2L} (\text{Re}[\mathbf{H} \odot \mathbf{G}^T])^{-1} \in \mathbb{R}^{M \times M} \quad (11)$$

其中  $\mathbf{G} = \mathbf{P} \mathbf{A}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}$ ,  $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{P} = E\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\}$ ,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

利用阵列流形的微分几何参数,只考虑空间只有一个或两个辐射源的特殊情况,可以得到式(10)的简洁、有用的表达式。

假设在空间环境中,只有一个来自于方向  $p$  的信号入射到天线阵上,则确定性 CRLB 的表达式为<sup>[6]</sup>

$$\text{CRB}_1(\mathbf{p}) = \frac{1}{2L \times \text{SNR}_1 s(p_1)^2} \quad (12)$$

假设两个辐射源在空间分别位于方向  $p_1$  和  $p_2$  =  $p_1 + \Delta p$ ,则此时的确定性 CRLB 为

$$\text{CRB}_2(p_1) = \frac{1}{\text{SNR}_1 \times L s^2(p_1) (\Delta s)^2 (k_1^2(p_0) - 1/N)} \quad (13)$$

式中,  $\Delta s = s(p_0) \Delta p$ ,  $k_1(p_0) = k_1 \sin \xi(p_0)$ ,  $p_0 = (p_1 + p_2)/2$ ,  $1/k_1$  是流形曲线的圆弧近似的半径,其值由下式确定:

$$k_1 = k_1 \sin \xi = k_1 \sqrt{1 - \frac{[\text{sum}(\tilde{\mathbf{L}}^3)]^2}{k_1^2}} \quad (14)$$

式中,  $\xi$  是由流形方向测量的阵列倾斜角。

两个辐射源的 DOA 估计的 CRB 为<sup>[7]</sup>

$$\text{CRB}_2(p_1) = \frac{2}{L \times \text{SNR}_1 s(p_1)^2 \Delta s^2 (k_1^2(p_0) - 1/N)} \quad (15)$$

式中,  $\Delta s = s(p_0) \Delta p$ ,  $k_1(p) = k_1(p) \sin \xi(p)$ ,  $p_0 = (p_1 + p_2)/2$ 。

方程(13)和(15)决定了阵元结构的基本测向精度,与所使用的算法无关。因此,这两组方程可用来比较各种阵列结构的优劣。

#### 4 计算机仿真实验

在实际的工程应用中,常采用均匀圆阵(UCA)、方阵(Square)、交叉阵(Cross)、“T”形阵、“Y”形阵和“L”形阵等阵列构形。在仿真实验中,这6种天线阵元位置坐标如表1所示,并假设辐射源信号的信噪比为10 dB,快拍数为256。

图1~4是空间环境中只有一个辐射源的仿真实验结果。图1是当辐射源的俯仰角为20°时,方位估计的CRB与辐射源的方位角之间的关系。图2是当辐射源的方位角为20°时,俯仰估计的CRB与辐射源的方位角之间的关系。图3是当辐射源的俯仰角为20°时,方位估计的CRB与辐射源的俯仰角之间的关系。图4是当辐射源的方位角为20°时,俯仰估计的CRB与辐射源的俯仰角之间的关系。

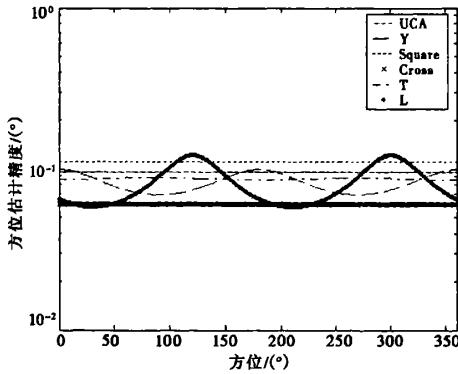


图1 方位估计精度与方位之间的关系

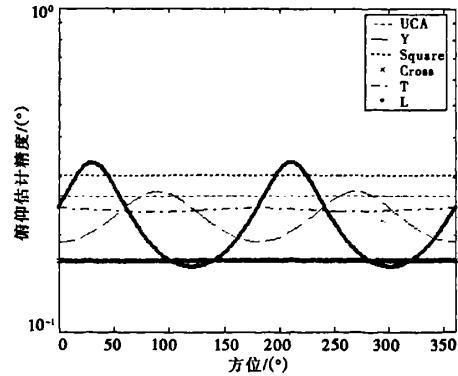


图2 俯仰估计精度与方位之间的关系

表1 各种天线阵列的阵元位置坐标

阵列几何结构	阵元位置坐标(第一行表示x坐标,第二行表示y坐标)
均匀圆阵	$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{2} & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \sqrt{2} & 1 & 0 & 1 & -\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix}$
方阵	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$
交叉阵	$\begin{bmatrix} 3 & 1 & 0 & 0 & -1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & -1 & -3 \end{bmatrix}$
“T”形阵	$\begin{bmatrix} 2.25 & 1.25 & 0.25 & -0.75 & -0.75 & -0.75 & -0.75 & -0.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & -2 \end{bmatrix}$
“Y”形阵	$\begin{bmatrix} 2.625 & 1.625 & 0.625 & -0.375 & -0.875 & -1.375 & -0.875 & -1.375 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3} & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$
“L”形阵	$\begin{bmatrix} 2.25 & 1.25 & 0.25 & -0.75 & -0.75 & -0.75 & -0.75 & -0.75 \\ -1.25 & -1.25 & -1.25 & -1.25 & -0.25 & 0.75 & 1.75 & 2.75 \end{bmatrix}$

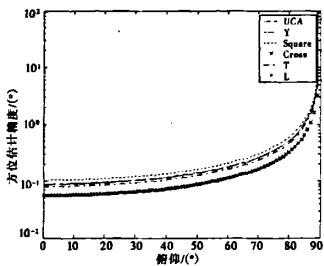


图3 方位估计精度与俯仰之间的关系

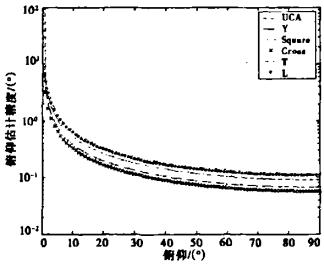


图4 俯仰估计精度与俯仰之间的关系

个辐射源的方位角之间的关系,两个辐射源的方位间隔为1°。图8是当第一个辐射源的方位角为20°,两个辐射源的方位间隔为1°时,第一个辐射源方位估计的CRB与辐射源的俯仰角之间的关系。图9是当第一个辐射源的俯仰角为20°时,第一个辐射源俯仰估计的CRB与辐射源的方位角之间的关系,两个辐射源的俯仰间隔为1°。图10是当第一个辐射源的方位角为20°时,第一个辐射源俯仰估计的CRB与辐射源的俯仰角之间的关系,两个辐射源的俯仰间隔为1°。

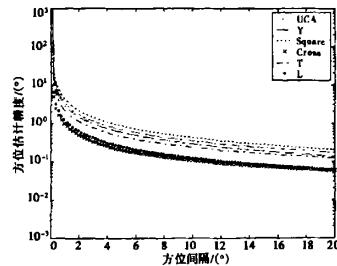


图5 方位估计精度与方位间隔之间的关系

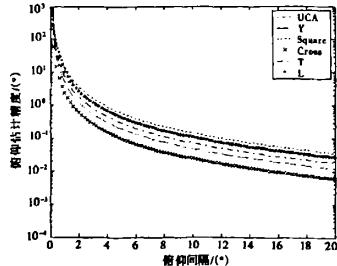


图6 俯仰估计精度与俯仰间隔之间的关系

图5~10是空间环境中两个辐射源的仿真结果。图5为第一个辐射源方位估计的CRB与这两个辐射源的方位间隔之间的关系,仿真中假设两个等功率辐射源的俯仰角都为20°,第一个辐射源的方位角为20°。图6为第一个辐射源俯仰估计的CRB与这两个辐射源的俯仰间隔之间的关系,仿真中假设两个等功率辐射源的方位角都为20°,第一个辐射源的俯仰角为20°。图7是当两个辐射源的俯仰角都为20°时,第一个辐射源方位估计的CRB与第一

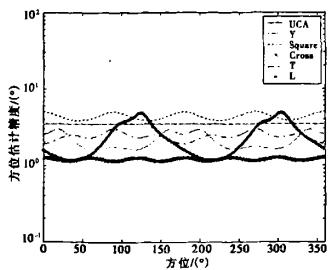


图7 方位估计精度与方位之间的关系

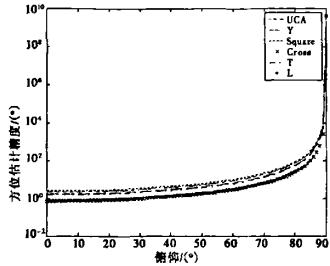


图8 方位估计精度与俯仰之间的关系

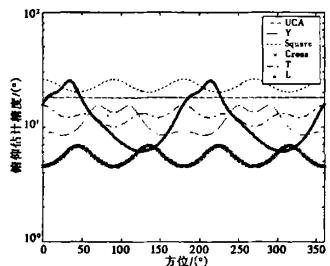


图9 俯仰估计精度与方位之间的关系

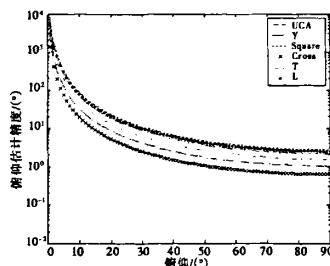


图10 俯仰估计精度与俯仰之间的关系

从仿真结果可以看出,对于均匀圆阵,方位和俯仰的估计精度与方位无关。当空间环境中只有一个辐射源时,“Y”形阵和“L”形阵的方位、俯仰估计精度与方位成周期性的关系,而方阵、交叉阵和“T”形阵的方位、俯仰估计精度与方位无关。当空间环境中有两个辐射源时,“Y”形阵、“L”形阵、方阵、交叉阵和“T”形阵的方位、俯仰估计精度都与方位成周期性的关系。“L”形阵的方位和俯仰估计精度随方

位的变化最大。对仿真中的各种平面阵列结构,不管是一个辐射源还是两个辐射源,当俯仰角接近于0°时,方位角的估计精度提高,而俯仰角的估计精度下降,相反,当俯仰角接近于90°时,方位角的估计精度下降,而俯仰角的估计精度提高。在6种阵列结构中,交叉阵的方向估计精度最高,方阵的方向估计精度最差。另外,方位和俯仰的估计精度都随两个辐射源空间间隔的增大而提高。

## 5 结论

本文以微分几何为工具,分析和研究了超分辨阵列测向系统的阵列流形的本质特征,揭示了它们与测向性能之间的关系。对实际应用中6种常见的平面阵列结构的测向精度进行了详细的研究和仿真,并得出了具有指导作用的结论。在实际的系统设计时,可以根据安装环境和性能要求对各种阵列结构进行定量仿真,通过比较各种天线阵结构的优劣,从中选择一种合适的、最优的阵列结构,减少设计的盲目性和随意性。本文的内容为超分辨阵列结构的选择和设计提供了一条有效的途径,这在实际应用中具有十分重要的意义和价值。

## 参考文献:

- [1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans. Antenna Propagat., 1986, AP-34(3):276-280.
- [2] Roy R, Kailath T. ESPRIT - estimation of signal parameter via rotational invariance techniques [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1989, 37(7):984-999.
- [3] Stoica P, Nehorai A. MUSIC, maximum likelihood, and Crammer - Rao bound [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1989, 37(5):720-741.
- [4] Stoica P, Nehorai A. Performance study of conditional and unconditional direction - of - arrival estimation [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1990, 38(10):1783-1795.
- [5] Daclos I, Manikas A. Estimating the manifold parameters of one - dimensional arrays of sensors [J]. Journal of the Franklin Institute Engineering and Applied Mathematics, 1995, 332B(3):307-332.
- [6] Karimi H R, Manikas A. Manifold of a planar array and its effects on the accuracy of direction - finding systems [J]. IEE Proc. - Radar, sonar Navig., 1996, 143(6):349-357.
- [7] Manikas A, Alexiou A, Karimi H R. Comparison of the ultimate direction - finding capabilities of a number of planar array geometries [J]. IEE Proc. - Radar, sonar Navig., 1997, 144(6):321-329.

## 作者简介:

吕泽均,男,高级工程师,主要研究方向为系统总体、信号处理和雷达组网等。

## 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>