

第一章 绪 论

1.1 移动通信的发展概况

随着现代通信技术的不断进步，移动通信业务以前所未有的速度向前发展。

移动通信从本世纪二十年代起步，至今大致经历了五个发展阶段。第一阶段^[1]从本世纪二十年代中期至四十年代，当时美国底特律警察局首先使用了车载无线电系统，工作频率为 2MHz，到四十年代提高到 30~40MHz，电台既庞大、笨重且有很大功耗，并使用尺寸较大的天线。此阶段特点为专用系统开发，工作频率较低。

第二阶段是从四十年代中期至六十年代初期。公用移动通信业务开始问世。此阶段特点是从专用网向公用网过渡，接续方式为人工，网的容量较小。

第三阶段从六十年代中期至七十年代中期。是现代移动通信系统改进与完善的阶段，美国和德国相继推出了改进型的现代移动通信系统，使用 150MHz 和 450MHz 频段。本阶段特点是采用大区制，中小容量，实现了自动选频和自动接续。

第四阶段是现代移动通信系统进入蓬勃发展的阶段。七十年代，美国贝尔实验室提出了蜂窝网，即小区制的概念。由于实现了频率再用，系统容量大大提高。此间有贝尔实验室于 1978 年底研制成功的移动电话系统（AMPS）、日本的 800MHz 汽车电话系统、西德的 C 网（频段为 450MHz）、英国的全地址通信系统（900MHz）、加拿大的 450MHz 移动电话系统、以及瑞典等北欧国家的 450MHz 移动通信网投入使用。

第五个阶段是从八十年代中期开始，进入了数字移动通信系统发展和

成熟时期^[2]。第一代移动通信网是模拟系统，由于用户需求急速发展，其容量已经不够，因此八十年代欧洲首先推出了数字移动通信网 GSM (Global System For Mobil)，随后美国和日本也制订了各自的数字移动通信体制。

如今，蜂窝状移动通信系统是最迅猛的工业，用户数量激增。目前，GSM 系统已经在除美国、日本和韩国等几个国家外的世界范围内得到广泛应用。其它数字式蜂窝移动通信网也在许多国家和地区使用，如 DCS1800(Digital Communication System)数字通信网、PDC(Personal Digital Cellular) 等。

我国从八十年代初开始建成模拟蜂窝移动通信系统，九十年代以来，第二代数字式移动通信系统出现，我国嘉兴地区在 1992 年引入第二代数字式移动通信 GSM 系统，目前 GSM 系统已经覆盖了全国大部分城市和农村地区。上海、深圳等地开通了 DCS1800 数字式移动通信资金网，实现 GSM900 网和 DCS1800 网之间的自由切换，扩展了 GSM 系统的信道资源。北京地区开通了 CDMA (Code Division Multiple Access) 实验网。移动通信在中国有着巨大的市场。

1.2 移动通信系统的天线系统

由于移动通信具有广阔的前途，移动通信用户要求的不断提高，这对移动通信设备的设计来说就需要考虑更多的因素。研制小型及至电小天线，以适应于现代技术，使天线能在很小的手持基面上工，而且还要使天线满足电性能指标，特别是带宽和效率指标^[3]。这也就对天线设计提出了更高的要求。

移动天线设计不再局限于在一个轮廓分明的平坦的基面上实现小型化、轻重量、薄剖面或平嵌安装的全向天线，而是建立一个复杂的电磁结构，使其在信号处理中发挥重要作用，并通常在不确定的时间变化环境中工作。在小型化便携设备中，天线和发射机 / 接收机的射频 (RF) 前置电

路通常一体化为一个系统，作为辐射器。也就是说是为天线系统这样一个整体来研究的，而不是对单个天线进行研究。

移动天线系统的要求^[4]主要有：

1. 天线应作为一个系统，而不是孤立的接收 / 发射终端；
2. 要根据电波传播条件设计天线，要有一定程度的极化或方向图分集控制能力；
3. 天线要适应环境条件，方向图与区域要求相一致，并且允许在天线附近有障碍物存在；
4. 天线要与车辆或平台综合考虑，设计天线时要考虑人手和身体的影响，以及可能存在的干扰；
5. 要研究新的制作技术，要开发新材料和集成电子新技术；
6. 具有使用户使用方便和可靠的性能，要有最少的可动部件和开关部件，要有高可靠度的机械性能等。

1.3 移动天线系统的设计

在移动通信系统天线设计时，一般要求移动终端尺寸小、重量轻、低剖面，具有全向辐射方向图，此外，天线还必须具有环境传播特性，并且要牢固可靠，经得起运动时机械撞击和环境的影响。

众所周知，天线尺寸越小，天线效率越低，带宽越窄。并且个人终端便携设备的设计概念是必须把设备壳体作为辐射器的一部分进行处理。这样天线的辐射特性大大不同于在自由空间只有天线本身时的辐射特性。辐射方向图随着便携设备的尺寸、形状和天线本身在便携设备中的位置不同而变化。

下图是实际移动通信系统用的典型天线：

系统	移动站	
	天线类型	要 求

寻呼机 150 MHz 280 MHz 450 MHz 900 MHz	小型方环天线 多环天线 铁氧体线圈天线 平行板天线（磁流环）	有限空间内安装天线本体，内装型，重量轻。通过合成天线系统产生的磁场和电场分量实现全方向性灵敏度。利用镜像环提高灵敏度，低成本。
移动电话， 车载： 800MHz	1/4 单极天线 1/2 套 筒振子印刷：振子；两 单极天线：水平、垂直	水平面全向性方向图 垂直面低仰角空间分集
蜂窝电话 900MHz 1800MHz	1/4 单极天线 1/4 鞭 状天线 常规螺旋天线 平面 IFA	有限空间内安装天线本体 天线系统包含人体或便携设备， 空间分集
无绳电话 280/400MHz	短振子，小型环天线， 1/4 单极天线	内装型式安装在电话机壳上

分析和设计移动天线和其他类型天线常用的方法是：

1. 矩量法：适用于单极天线或便携设备使用的 F 型天线以及 VHF 频段的汽车单极天线；
2. 几何绕射理论（GTD）：适用 UHF 频段的汽车单极天线；
3. 混合方法：
4. FDTD 法：适用于便携设备使用的倒 F 型天线以及螺旋天线等其它简单天线；
5. 空间网络法：适用于无限大基面上的倒 F 型天线的阻抗特性计算。

第二章 手机天线设计理论基础

2.1 手机天线类型

面对便携电话重量和体积的令人注目的改进促使电话机天线的迅速发展，设计者的重点是在降低尺寸的同时，要保持差不多相同的天线性能，如增益、覆盖区和频带等。

在 800~1000MHz 频带内，便携蜂窝移动电话设计的主要要求：1) 相当大的带宽 (~10%)；2) 小尺寸；3) 在整个方位平面上提供均匀覆盖，增益为 0dBi 或更高些。

综合这些因素，移动电话天线通常考虑以下几种类型：1) 套筒振子；2) 螺旋天线；3) 四分之一波长鞭状天线；4) 振子螺旋天线组合。

我们这里主要讨论的是四分之一波长鞭状天线和螺旋天线。

2.2 四分之一波长鞭状天线

2.2.1 对称振子

对称振子可用于短波、超短波甚至微波^[5]。

一、其电流分布与辐射场：

取对称振子中心为坐标原点^[6]，振子轴沿 Z 轴。半径 $a \ll \lambda$ ，如图 2-1 所示，设 I_m 为波幅电流， β 为对称振子电流传输的相移常数。当无耗时

$\beta = k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，则电流分布为

$$I(Z) = I_m \sin \beta(l - |Z|) \quad -l \leq Z \leq l \quad (2-1)$$

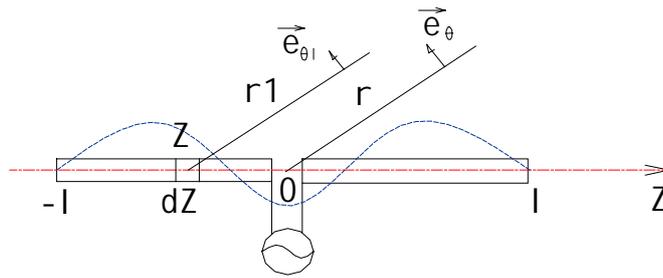


图2-1

理论与实践证明无限细的对称振子 ($l/a = \infty$) 上的电流分布和无耗开路传输线上正弦电流分布相当一致。粗的圆柱形对称振子 ($l/a = 75$) 上电流稍有差异，只在波节点附近差别稍大。有：

$$E_{\theta} = j \frac{60I_m [\cos(kl \cos \theta) - \cos kl]}{r \sin \theta} e^{-jkr} \quad (2-2)$$

场强大小为：

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_m}{r} f(\theta, \varphi) \quad (2-3)$$

式中
$$f(\theta, \varphi) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} \quad (2-4)$$

电场的极化方向在 $\varphi = \text{常数}$ 的子午面内，取向为 θ 方向，与电基本振子极化方向一致。

显然可得对称振子磁场：

$$H_{\varphi} = \frac{E_{\theta}}{\eta_0} = j \frac{I_m}{2\pi r} \cdot \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} e^{-jkr} \quad (2-5)$$

二. 方向图：

由式 (2-4) 知，当 $l/\lambda \leq 0.65, \theta = 90^\circ$ 时，

$$E = E_{\max} = \frac{60I_m}{r} f_{\max} \quad (2-6)$$

$$f_{\max} = 1 - \cos kl \quad (2-7)$$

归一化场强方向性函数：

$$F(\theta, \varphi) = F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl \sin \theta)} \quad (2-8)$$

归一化功率方向性函数为 $F^2(\theta, \varphi)$ ，根据式 (2-8) 可绘出对称振子的归一化场强方向图和功率方向图。

半波振子的方向性是 2.15dBi (dBi 表示相对于各向同性天线增益的分贝数)，以下是对称振子天线长度 L 为不同值时天线方向图与方向性系数。

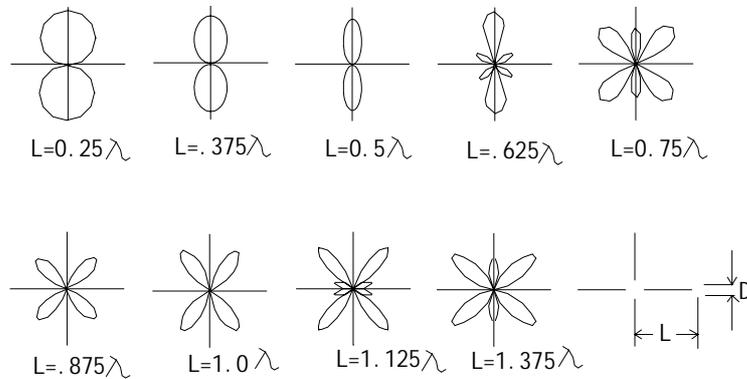


图2-2

L/	0.25	.375	0.5	.625	0.75	.875	1.0	1.125	1.375
方向性 (dBi)	2.15	2.75	3.82	5.16	3.47	3.74	4.03	4.87	4.91

从图知，L 为 5/8 波长的振子天线在水平方向的方向性达到最大值。

2.2.2 四分之一波长单极天线 (鞭状天线)

单极天线是振子臂 (或轴) 垂直地面架设的天线，其原理结构如图 2-3

所示。设地为理想导体，地的影响用镜像代替，且仅在地面上半空间存在电磁场，图 2-3 (a) 中的单极天线可等效为图 (b) 所示的直立对称振子。

一．鞭天线的辐射场

图 2-4 为鞭天线坐标，鞭天线的辐射场^[7]就是等效对称振子在上半空间的辐射场。由式 (2-3) (2-4)，并考虑到 $\Delta = 90^\circ - \theta, h \rightarrow l$ ，得

$$|E| = \frac{60I_m}{r} \cdot \frac{\cos(kh \sin \Delta) - \cos kh}{\cos \Delta} \quad (2-9)$$

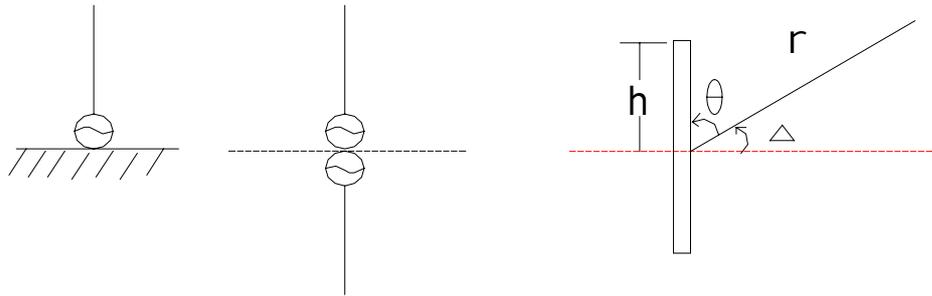


图2-3 单极天线原理结构及其等效

图2-4

二．鞭天线的特性参数

当单极底馈天线的激励电压是等效的双极天线的一半时，存在于上半空间的辐射场相等，根据这样的事实，可知单极天线与等效的双极天线有如下关系：

方向性函数和方向图相同（上半空间），主瓣宽度、极化特性、频率特性等参数均相同，然而单极天线的输入阻抗是双极天线的一半，这是因为激励电压减半而激励电流不变引起的。单极天线的方向性系数是双极天线的两倍，这是因为场强不变而辐射功率减半（半空间辐射）的缘故。也就是说理论上四分之一波长鞭状天线的输入阻抗只是半波振子的一半（即约 36 Ω ），而方向性比半波振子天线大 3dB，但是由于实际地面的大小和传导损耗，实际方向性不可能改善这么多。

下图表示安装在半径为 r 的圆盘上的四分之一波长单极天线的辐射图。实际应用中，地平面大小是有限的，最大辐射方向由地面稍微上翘，因此，四分之一波长单极天线的有效增益通常低于半波振子天线的增益。

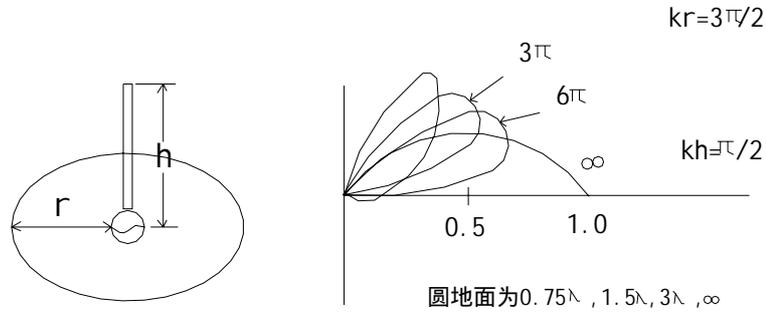


图2-5

2.3 螺旋天线

2.3.1 螺旋天线的辐射模式

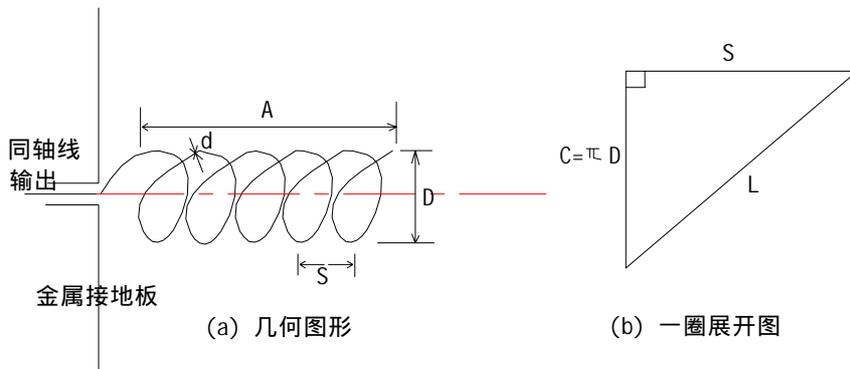


图2-6 螺旋天线的几何图形和一圈展开图

螺旋天线是由金属导线或金属管绕制成螺旋形，并正确馈电而构成，螺旋天线通常由同轴线馈电。同轴线内导体与螺旋线的一端相接，外导体与地板相接。

D ----- 螺旋天线的直径	C ----- 螺旋天线的周长
S ----- 螺距	----- 螺距角
L ----- 一圈的长度	N ----- 圈数
A ----- 轴长	d ----- 螺旋导线直径

由图 2-6 以上参数有以下关系：

$$C = \pi D \qquad S = C \cdot \tan \alpha$$

$$L = \sqrt{C^2 + S^2} \qquad A = NS$$

若 $S = 0$ ($\alpha = 0^\circ$)，螺旋天线蜕化成环天线；

若 $D = 0$ ($\alpha = 90^\circ$)，螺旋天线蜕化成线天线。

螺旋天线根据 D/λ 值范围的不同，分为三种辐射模式^[8]：

1. 法向模式： $D \ll \lambda$ 其最大辐射垂直于螺旋天线的轴线；
2. 轴向模式： $0.25 \lambda < D < 0.4 \lambda$ 轴向有最大辐射；
3. 圆锥形： $D > 0.4 \lambda$ 进一步增大。

2.3.2 轴向模螺旋天线

轴向模螺旋天线^[9]有以下主要特点：

1. 最大辐射方向与螺旋轴一致；
2. 天线辐射的电磁波在轴向是圆极化波，或接近圆极化波，其它方向是椭圆极化波；
3. 天线的输入阻抗是纯电阻性；
4. 天线中是行波电流；
5. 天线有较宽的工作频带 ($\pm 30\%$)。

由于轴向模螺旋天线辐射的不是全向模，我们不再讨论它。

2.3.3 法向模螺旋天线

一. 对小环天线的分析

$D \ll \lambda$ ($D/\lambda \leq 0.18$) 时发生法向模^[10], 由于法向模螺旋天线与波长相比很小, 假设在其全长电流的幅度和相位均匀, 远场方向图与圈数无关, 因而仅通过一圈的研究即可得出远场方向图。

比很小, 假设在其全长电流的幅度和相位均匀, 远场方向图与圈数无关, 因而仅通过一圈的研究即可得出远场方向图。

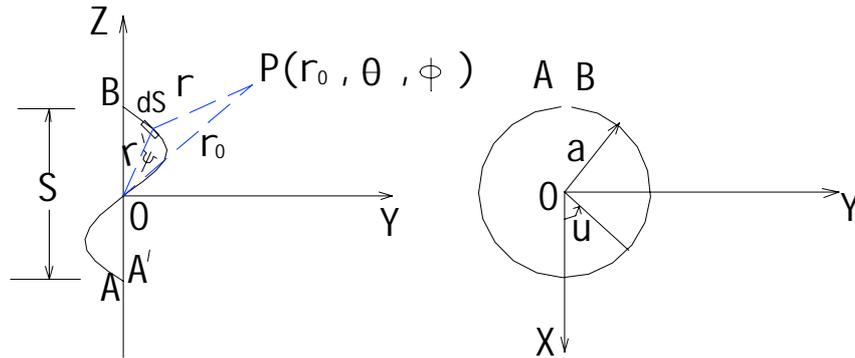


图2-7 螺旋天线一圈的展开图

以法向模螺旋天线的一圈为参考, 半径为 a , 螺距为 S , 如图 2-7 所示。

线上一段 ds 的坐标为:

$$\begin{cases} x = a \cos u \\ y = a \sin u \\ z = \frac{S}{2\pi} \cdot u \end{cases} \quad -\pi \leq u \leq \pi \quad (2-10)$$

螺旋线上等幅同相位电流 I 在观察点 $P(r_0, \theta, \phi)$ 产生的电位矢量为:

$$\vec{A} = \frac{\mu I}{4\pi} \int \frac{e^{-jkr}}{r} d\vec{s} \quad (2-11)$$

这里 r 是从 ds 到 P (远场区) 的距离, 且 $r \approx r_0 - r' \cos \psi$, 其中 r' 是从原点 O 到 ds 的距离, ψ 是 $\angle COP$, 有

$$r' \cos \psi = a \cos u \sin \theta \cos \phi + a \sin u \sin \theta \sin \phi + \frac{S}{2\pi} u \cos \theta \quad (2-12)$$

电位 \vec{A} 的 X, Y, Z 分量可分别列式：

$$A_x = \frac{\mu I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} \int_{-\pi}^{\pi} e^{jk(r' \cos \psi)} (-) a \sin u du \quad (2-13a)$$

$$A_y = \frac{\mu I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} \int_{-\pi}^{\pi} e^{jk(r' \cos \psi)} a \cos u du \quad (2-13b)$$

$$A_z = \frac{\mu I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} \int_{-\pi}^{\pi} e^{jk(r' \cos \psi)} \frac{S}{2\pi} du \quad (2-13c)$$

考虑到 $ka \ll 1$ ，取展开级数前两项，有

$$A_x = -\frac{j\mu\pi I}{2\pi r_0} e^{-jkr_0} \left(\frac{Sa}{\lambda} \cos \theta + \frac{ka^2}{2} \sin \theta \sin \phi \right) \quad (2-14a)$$

$$A_y = \frac{j\mu\pi I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} ka^2 \sin \theta \cos \phi \quad (2-14b)$$

$$A_z = \frac{\mu I S}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} \quad (2-14c)$$

由 $\vec{E} = -\nabla V - j\omega \vec{A}$ ，

$$E_r = 0 \quad (2-15a)$$

$$E_\theta = -\frac{k^2 Z_0 I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} (Sa \cos^2 \theta \cos \phi - j \frac{S}{k} \sin \theta) \quad (2-15b)$$

$$E_\phi = \frac{k^2 Z_0 I}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} (Sa \cos \theta \sin \phi + \pi a^2 \sin \theta) \quad (2-15c)$$

由 (2-15b) 及 (2-15c) 式知当 $S = \pi ka^2$ ，xy 平面所有点 ($\theta = \pi/2$)，有关系 $E_\theta = jE_\phi$ ，也就是满足圆极化的条件。另外，由于 $ka \ll 1$ ，除值极小外 (即值靠近 Z 轴)，辐射场近似圆极化。但在特定辐射方向 $\theta = \tan^{-1} ka, \phi = 3\pi/2, E_\phi = 0$ ，在这角度小的方向上线极化。对 N (N 较小

时) 圈螺旋来说, 辐射场是单圈的 N 倍。

二. 法向模螺旋的辐射阻抗

法向模螺旋的总辐射功率为:

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{2Z_0} r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (2-16)$$

这里 E_θ 和 E_ϕ 由式 (2-15b), (2-15c) 决定, 代入后可得:

$$W = 10k^2 S^2 I^2 [1 + k^2 (4a^2/10 + \pi^2 a^4/S^2)] \quad (2-17)$$

由于功率 $W = I^2 R_r / 2$, 所以法向模螺旋天线的辐射电阻

$$R_{r0} = 20k^2 S^2 [1 + k^2 a^2 (0.4 + \pi^2 a^2/S^2)] \quad (2-18)$$

当圈数为 N 时, 辐射阻抗近似为 $N^2 R_{r0}$ 。

2.4 本章小结

四分之一波长鞭状天线和法向模螺旋天线都可用作手机天线, 但是由于电磁波沿螺旋轴线传播的相速比鞭天线慢, 故用螺旋天线, 谐振长度可以缩短^[11]。

合理的选择参数, 可使法向模螺旋天线成为一种高效率的辐射机构, 其方向图和增益类似于半波振子。但螺旋天线的带宽比半波振子的带宽窄, 这是由于它的高 Q 因子造成的, Q 因子由天线线圈的匝数和直径决定。

谐振的四分之一波长的螺旋天线在便携无线电设备外壳上能激励起很强的射频电流, 设备外壳成为辐射系统的组成部分, 使用者手部认为是围绕无线电设备外壳的有耗介质材料。因而在设计手机天线时应充分考虑系统和人为因素的影响。

第三章 天线传播特性

3.1 移动环境中天线性能的估算

3.1.1 影响天线性能的主要因素

800MHz 频段随着用户的增加已经变得十分拥挤,就得开发更高频段的移动通信系统。随着频率的提高,无线电波随距离的衰减显著增加,因此必须提高天线增益或缩小小区规模以使系统的经济效益最大。

陆地移动通信的传播主要受以下因素的影响:

1. 特征地貌结构,如平地、丘陵、水、山脉、谷地和沙漠;
2. 人造结构,如开阔地、郊区和市区、大都市区;
3. 人为噪声,如汽车打火噪声和机器噪声;
4. 引起频率选择衰落和时间延迟扩散的色散介质;
5. 当移动天线高出地面 1.5~3.0m 时,移动设备所接收的信号是由直射路径信号和一个由地面形成的反射波信号构成。这两个波在合成时,在移动接收端产生严重的路径衰耗;
6. 因为移动天线接近人体而对天线方向图有影响。

3.1.2 天线性能的估算方法

在多路径传播环境中,移动天线的性能主要决定于天线的有效增益,因为天线的增益会影响到无线电区域的大小,移动站的发射功率。因此,在设计移动天线时,对于移动环境,必须使有效天线增益最大。但只从天线方向性增益来考虑,不能充分精确地估算出移动天线的有效增益,因为

接收信号要经历瑞利衰落^[12]，并且由于反射、绕射和散射的影响，还存在着随机的多路径现象。因此通常都是利用实验方法^[13]来估算，即在一确定路径上，测量平均接收信号来估算有效增益。方法为测量一组天线沿相同选择路线运动时的信号接收电平，取平均值得到被测天线与标准天线的平均功率电平，就可找出未知天线的平均有效增益（MEG）^[14]与标准平均有效增益的关系。一般用半波振子作为标准天线。这种方法对测量实际环境中的移动天线的 MEG 是有效的，但反映的是与测量路线有关的 MEG。

3.1.3 移动天线的平均有效增益

首先必须建立计及多路径环境中垂直极化波（VP）和水平极化波（HP）的 MEG 理论表示式。

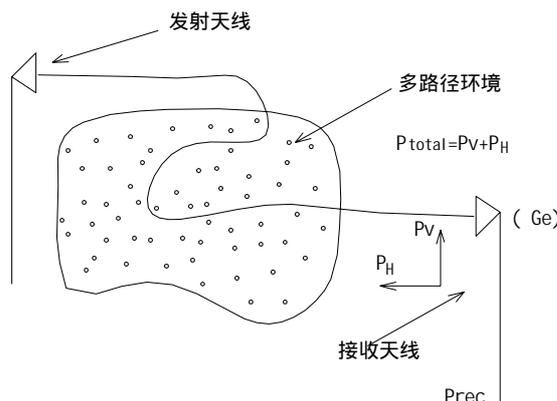


图4-1 多路径环境中到达接收天线的平均功率

图中 P_V 和 P_H 分别是天线在环境中沿一随机路径运动时所接收到的 VP 和 HP 入射无线电波的平均入射功率。在同一路径上天线的总平均入射功率是 $P_V + P_H$ 。

在一随机路径上的天线平均接收功率 P_{rec} 与总平均入射功率 $P_V + P_H$ 之比，被认为是该环境中的移动天线的 MEG，用符号 G_e 表示。

$$G_e = \frac{P_{rec}}{P_V + P_H} \quad (3-1)$$

平均入射功率比 P_V / P_H 代表交叉极化功率比 (XPR)。

$$XPR = \frac{P_V}{P_H} \quad (3-2)$$

当发射无线电波是水平极化时，XPR 表示交叉极化耦合；而当发射波是垂直极化时，XPR 表示交叉极化耦合的倒数。

3.2 蜂窝移动电话天线的设计考虑

3.2.1 总体设计思想

对于蜂窝式移动电话手机天线有两个设计特性：

1. 天线必须装载在移动电话机壳上，由于天线非常靠近话机壳体，所以不仅在天线单元上，而且也在机壳上感应出电流。电流的耗散将改变原来天线辐射图的形状。

2. 在工作期间人手握着电话机的指向不定。而且由于天线必须靠近人体使用，所以人体效应会影响天线性能，进一步恶化天线的辐射效率。使用人的运动也会改变天线方向引起辐射图极化方向的改变。

为了适应当前蜂窝式移动电话超小型化，便于携带的要求，必须研制尺寸非常小的天线单元，这样使上述困难变得更加复杂，而且随着天线尺寸的减小，辐射效应和带宽都要变差。设计移动电话既要考虑上述约束条件，还必须考虑系统提出的设计要求。

综上所述，蜂窝式移动电话天线的主要设计思想是在使用的频段范围内，使天线的有效增益尽可能大。在保持高有效增益的前提下，还要允许缩小尺寸和减轻重量，以及提高使用寿命。高效率的天线设计可以降低手机发射功率，降低移动电话本身功耗，延长电池使用寿命。因此，为了研

制小型化蜂窝移动电话，保证天线具有最大增益是非常重要的。

3.2.2 天线平均有效增益的简单估算

多路径传播环境中的移动天线的平均有效增益由天线方向图和环境中的随机入射波确定。但计算平均有效增益需要入射波的统计分布，而且还需要三维辐射方向图，这在实际测量中并非易事。现讨论一个简化方法来设计天线。

首先假定入射波集中于水平面，而且假定其角密度函数服从下列分布：

$$P_\theta = P_\varphi = \frac{1}{2\pi} \delta(\theta - \frac{\pi}{2}) \quad (3-3)$$

式中 P_θ 和 P_φ 分别是平面来波角密度函数的 θ 和 φ 分量。平均有效增益可用下式表示：

$$G_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{XPR}{1+XPR} [G_\theta(\frac{\pi}{2}, \varphi) + \frac{1}{XPR} G_\varphi(\frac{\pi}{2}, \varphi)] d\varphi \quad (3-4)$$

式中 XPR 为平均交叉极化功率比。 G_θ 和 G_φ 分别是天线增益方向图的 θ 和 φ 分量。

式中 XPR 值可假定为 9dB，可以用 XPR 值估算天线增益方向图的 φ 分量对有效增益的最小影响。目标天线相对于标准天线的平均有效增益可用下式估计估算：

$$G_p = \frac{G_\xi(\text{目标天线})}{G_\xi(\text{标准天线})} \quad (3-5)$$

因为假设入射平面波集中于水平方向，为了易于计算，可用垂直半波振子天线的平均有效增益作为标准平均有效增益 (2.0dBi)。

因为式 (3-5) 所计算的平均有效增益等于目标天线和标准天线在水平面辐射方向图平均强度之比，所以又称为方向图平均增益(PGA)，使用 PGA 可以简化对天线的实际性能的估算，主要集中在以下几个方面：

- 1.利用在无线电波暗室实际测得的方向图就可以容易地估算出目标天线的性能,无论方向图变化是由外壳还是由人为操作引起的,都能很容易地估算方向图变化引起的增益变化。
- 2.可估算出人体临近效应或人体对辐射功率的吸收所产生的输入阻抗的变化而导致辐射效率的劣化。
- 3.通过改变测量频率可以估算有效增益的频率特性。

3.2.3 蜂窝移动电话天线增益分析

蜂窝移动天线的有效增益会受到使用者临近效应的影响,工程上可以用 PGA 估算法近似地研究蜂窝式移动电话使用人员对天线方向图的影响。

测量方法为:首先应在电波暗室内测量装在测试用蜂窝移动电话上的天线的垂直极化和水平极化分量的水平方向辐射图,倾角设为 60 度,然后由使用者以 60 度倾角通话的姿态手持测试机再重复测量辐射方向图。由于没有条件实际测量,本文将直接引用文献的测试结果。

测试天线为 1/4 波长鞭状天线结构,天线置于机壳侧面,测试结果示于下图,其中 0dBd 表示半波振子的最大辐射强度。测量中使用人员的头部与手机机壳之间用 0.06 波长的泡沫塑料层隔开。

测试状态	测试结果
无操作者情况: $\alpha = 60^\circ$	-2.0dBd
有操作者情况: $\alpha = 60^\circ$	-4.6dBd
操作者影响	2.6dBd

3.3 天线设计的安全考虑

就蜂窝式移动电话而言,GSM 数字手机发射功率为 5 级,即 2W,模

拟手机要高于数字手机一般也不会超过 7W 的发射功率。由于人的重要器官（比如头部）距离射频源比较近，所以人体在使用移动电话的同时存在着被照射的可能。

人体处于如蜂窝电话这样的射频源近场区会产生吸收电磁能量的现象，对此现象的估算可通过测量人体的电场来取得。人体组织单位质量吸收的功率是：

$$P_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma}{P} |E|^2 \quad \text{W/kg} \quad (3-6)$$

式中 P_g 称为比吸收率 (SAR)，它给出了围绕一点的无限小量的射频功率与无限小量的人体组织质量 dm 之比，如果求某一器官吸收的射频功率 P ，则由积分式给出：

$$P = \int_M P_g dm \quad (3-7)$$

其中 M 为器官的质量，器官可以是整个人体。测量表明，微型蜂窝电话的 SAR 峰值小于 0.6mW/g，该值小于目前及将来使用的 ANSI 人体照射极限标准。即使当人靠近天线底部长时间通话（30 分钟），微型蜂窝电话的发射功率也能确保使用者的照射量低于 ANSI 规定的极限。

通用便携式双向通讯设备的射频功率最大为 7W，对使用者的照射时间平均峰值和平均 SAR 电平均低于广泛认可的射频能量照射人体的安全标准。

3.4 本章小结

蜂窝移动电话尺寸的减小迫使天线技术进步，利用传统的辐射器，其尺寸、增益等特性达不到要求。因此，新一代辐射器应进行优化设计，使之适用于蜂窝电话。设计时重点应该考虑的是使用者身体和机壳对天线辐射特性的影响，应合理利用具有某种形式方向性的辐射器来减少这种影

响。此外，还应设法避免使用者手部的高频吸收。通过慎重设计和选择辐射器尺寸和位置，就可改善微型蜂窝移动电话天线特性，继而进一步减小天线尺寸。

第四章 手机双频天线设计与测试

4.1 GSM 双频天线

为了满足移动电话用户迅速增长的需要，通常的解决办法是在现有的系统上增加新的频段。现在最普遍用的数字蜂窝移动通信网 GSM 通常包括 GSM900 和 DCS1800。

GSM900 是最早的 GSM 系统，它使用 900MHz 频段，在一个大的范围内提供蜂窝移动通信，手机的最大输出功率一般从 1W 到 7W。DCS1800 是 GSM900 的一个延伸，由于增加了一个新的频段，扩展了 GSM 的信道资源，加强了其在蜂窝通信产业的竞争。

如果 GSM 采用双频手机，则移动用户就可以自由地使信道在 GSM900 和 DCS1800 之间进行切换，而不影响话音质量。在这种情况下，手机需要一种新的双频天线，可同时工作在 900MHz 和 1800MHz 两个频段，满足一定的技术要求，在两个频段内天线增益均达到要求。

4.2 天线设计

4.2.1 技术指标

GSM 系统双频天线的设计指标与在单频段工作的天线一样，要求移动手机的体积非常小，对天线的外形尺寸、电性能以及机械性能提出了非常严格的要求。

GSM 系统的两个工作频段是：

1. GSM900 波段：890~960MHz

2. DCS1800 波段：1710~1890MHz

对双频天线的要求为：

1. 外形尺寸：长 25mm，外径 6mm 左右；

2. 电性能指标：

增益 8dB 左右；

驻波比小于 1.5。

4.2.2 设计考虑

首先考虑采用 1/4 波长鞭状天线，我们可以计算出所需辐射元件的实际长度：

$$\text{GSM 波段 } \lambda_1 = \frac{c}{f_1} = 0.33m \quad \text{取 } f_1 = 900\text{MHz}$$

$$\text{DCS 波段 } \lambda_2 = \frac{c}{f_2} = 0.15m \quad \text{取 } f_2 = 1800\text{MHz}$$

求出 GSM 波段的天线长度 $l_1 = \frac{1}{4}\lambda_1 = 0.083m$ ，

$$\text{DCS 波段的天线长度 } l_2 = \frac{1}{4}\lambda_2 = 0.04m。$$

可以看出，若采用 1/4 波长鞭状天线设计，外形尺寸将无法全满足全长 25mm 的要求，问题集中在 GSM 波段。根据第三章叙述，螺旋天线是应用在蜂窝式移动电话的尺寸最小的电小天线，所以必须选择螺旋天线。

采用螺旋天线，在满足天线电性能指标的前提下，缩小天线尺寸，采用变螺距方法使天线具有很宽的频率响应带宽特性，可以通过调整螺距来调整天线在 GSM 和 DCS 波段各自的谐振点和阻抗特性。

4.2.3 设计计算

从第二章分析可知，螺旋天线辐射特性基本上取决于螺旋直径与波长之比 D/λ ，当 $D \ll \lambda$ ($D/\lambda < 0.18$) 时，最大辐射角垂直于螺旋轴向，称为法向模，在蜂窝移动电话天线应用中螺旋天线均为法向模。法向模螺旋天线是一种慢波结构的行波天线，由于电磁波沿螺旋天线传播的相速比光速慢，所以谐振长度可以缩短。

法向模螺旋天线的设计一般先取定直径 D 和螺距 S ，则可计算相应的沿螺旋轴传播波长 λ_2 [15] 为

$$\lambda_2 = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + 20(D/S)^{2.5}(D/\lambda)^{0.5}}} \quad (4-1)$$

则谐振于四分之一波长的螺旋天线长度为

$$l = \frac{\lambda_2}{4} = \frac{\lambda}{4\sqrt{1 + 20(ND)^{2.5}(D/\lambda)^{0.5}}} \quad (4-2)$$

若已知 D 和 l 可通过下式求得法向模螺旋天线的总圈数 N 为

$$N \approx \frac{\lambda}{10D} \left(\frac{l}{D}\right)^{0.2} \quad \text{或} \quad N \approx \frac{30}{f_{MHz} D_m} \left(\frac{l}{D}\right)^{0.2} \quad (4-3)$$

根据双频天线的技术指标、结构要求以及螺旋加工工艺综合考虑，选择螺旋直径为 4.9mm，天线直径 0.9mm，在螺距的选择上采用两种不同螺距的设计。

稍大的螺距为 3-4mm，用于调谐 DCS 波段的谐振点，稍小的螺距为 1.3mm，用于调谐 GSM 波段的谐振点。DCS 波段的谐振电长度小于 GSM 波段，所以天线结构形式为大螺距在下，小螺距在上。但是两个波段的天线电性能均受到螺旋线圈总长的影响，通过调整两个不同的螺距，可以达到很好的控制两个波段的谐振点。

选取两组螺旋设计参数：

1. 3.0mm 螺距 4.25 圈 1.3mm 螺距 5.25 圈
2. 4.0mm 螺距 4.25 圈 1.3mm 螺距 5.25 圈

4.3 天线测试

4.3.1 驻波比测试

一. 测试方法

1. 将天线装置置于测试手机上，内部无匹配电路，手机与天线固定于垂直于工作台面的木制支架上。
2. 测试频率范围：开始 700MHz，终止 2000MHz。
3. 设置观察频率点：890MHz；960MHz；1.71GHz；1.88GHz。
4. 每组参数天线需测两组数据，先测天线垂直置于台面的无干扰的自由空间状态数据。然后测由人手握测试机，仍使天线垂直于工作台面的使用状态数据。

二. 测试步骤

1. 按测试方法，放置好测试手机和天线。
2. 将激光打印机与网络分析仪的并行口相连。
3. 设置网络分析仪的扫描频率范围和观测频率点。
4. 将电缆一端与网络分析仪相连，在电缆的另一端进行 S_{11} 校准。
5. 完成校准后，将另一端与测试手机相连。
6. 开始测试。
7. 记录并打印数据。

三. 结果分析

网络分析仪测得的是一端口反射系数 S_{11} ，根据下面的公式可求得驻波比 Γ_{in} 的值。因为天线与电缆基本匹配，所以有

$$\Gamma_{in} \approx S_{11} \quad (4-4)$$

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma_{in}|}{1 - |\Gamma_{in}|} \approx \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (4-5)$$

现从两组天线设计参数中选择第二组进行分析。

1.3mm/4.0mm 螺距天线 (图附于论文后)

表 1 . 无干扰时自由空间测得的数据

	890MHz	960MHz	1.71GHz	1.88GHz
S_{11} (dB)	-8.0	-15.0	-10.1	-10.0
S_{11}	0.16	0.03	0.098	0.1
	1.38	1.06	1.217	1.22

表 2 . 人手持测试机时测得的数据

	890MHz	960MHz	1.71GHz	1.88GHz
S_{11} (dB)	-7.0	-14.8	-11.0	-8.0
S_{11}	0.20	0.03	0.08	0.16
	1.5	1.06	1.17	1.38

3.2. 增益测量

一 . 比较法测量原理

用一个增益已知的天线作标准天线^[16]，通过与标准天线的比较来测量天线的增益。根据互易原理，可以把被测天线用作发射天线，也可以作为接收天线。下图绘出了一种把被测天线与标准增益天线作接收天线使用来测量天线增益的方框图。

实际测量时，可按先后顺序把被测天线和标准增益天线接到选频放大器上，并调整它们分别与辅助发射天线最大辐射方向对准，调可变衰减器使选频放大器有合适指示。只要在两种状态下维持辅助天线发射功率和方向性不变，用功率计分别测得被测天线和标准天线的接收功率 P_{outx} 和 P_{outs} ，

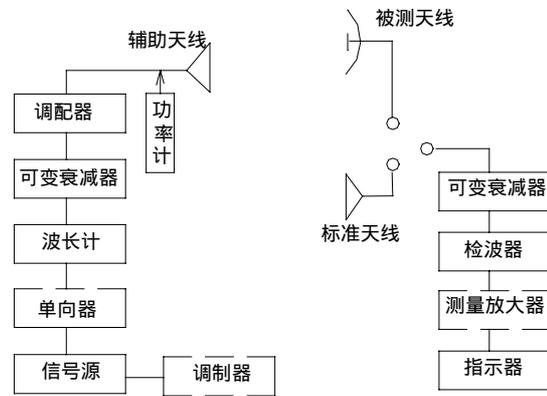


图4-1 被测天线作接收天线来测量天线增益的方向图

因为标准天线增益 G_s 已知，则被测天线的增益为：

$$G_x = \frac{P_{outx}}{P_{outs}} G_s \quad (4-6)$$

本文测量螺旋天线的增益是采用半波振子天线用作标准增益天线和辅助天线。

二．测试条件

- 1．使用仪器：900MHz 半波振子（一对）；1.8GHz 半波振子（一对）；选频放大器；信号发生器；样品手机天线；检波管。

三．测试步骤

- 1．辅助天线和标准振子天线均用 900MHz 波段的半波振子，记录选频放大器上的信号电平。
- 2．接收天线改用样品手机天线，旋转螺旋天线一圈并记录此过程中选频

放大器上的信号电平。

3. 辅助天线和标准振子天线均用 1.8GHz 波段的半波振子，记录选频放大器上的信号电平。
4. 接收天线改用样品手机天线，旋转螺旋天线一圈并记录此过程中选频放大器上的信号电平。

四．结果分析

1. 中心测试频率：900MHz

螺旋天线绕轴旋转一圈，数据如下。

$$\text{最大增益： } G_{\max} = 10\lg\left[\frac{46}{50} \times 10\right] = 9.64\text{dBd} = 11.8\text{dBi}$$

$$\text{最小增益： } G_{\min} = 10\lg\left[\frac{30}{50} \times 10\right] = 7.78\text{dBd} = 9.9\text{dBi}$$

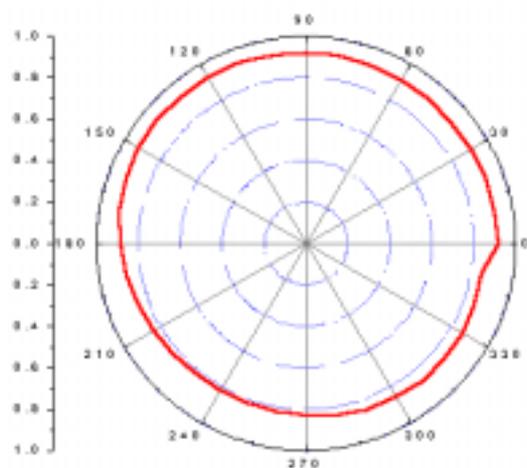
2. 中心测试频率：1.8GHz

螺旋天线绕轴旋转一圈，数据如下。

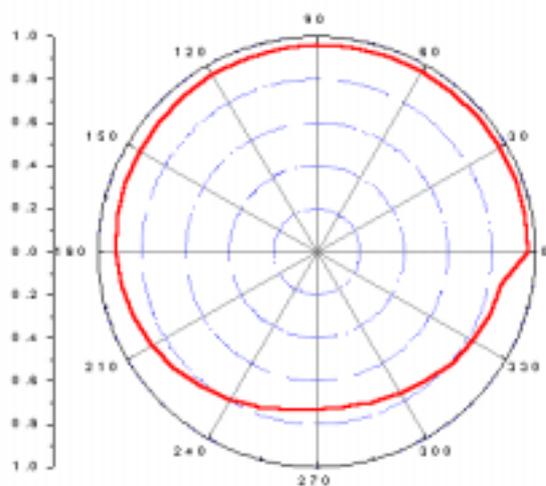
$$\text{最大增益： } G_{\max} = 10\lg\left[\frac{43}{58} \times 10\right] = 8.7\text{dBd} = 10.9\text{dBi}$$

$$\text{最小增益： } G_{\min} = 10\lg\left[\frac{33}{58} \times 10\right] = 7.55\text{dBd} = 9.7\text{dBi}$$

下页所附为螺旋天线在两个频段的归一化方向图。可以看出，在两个频段内，增益均满足 8dB 的要求，由前面驻波比的测试也可以看出，在两个频段内，驻波比满足小于 1.5 的要求，故设计是成功的。



900MHz 天线方向图



1.8GHz 天线方向图

结 论

现代移动通信事业以飞快的速度发展，移动通信系统也在不断扩展新的频段。作为应用最广泛的数字移动通信网 GSM 系统，在原有的 GSM900 频段外，扩展了 DCS1800 频段，使系统具有更强的竞争力。

主要目的是设计一种能在 GSM900 和 DCS1800 之间自由切换的新型双频天线，为此，分析了几种常用的全向天线。由于手机天线使用的特殊性，必须考虑人体效应对手机天线各项性能的影响，而且对天线的尺寸也有严格要求。因此，常规天线不能满足设计要求，必须寻找符合要求的天线，法向模螺旋天线就是其中的一种。

由于法向模螺旋天线是一种慢波结构的天线，谐振长度可以缩短，能够达到手机天线的尺寸要求，在合理选择参数后，在两个频段各项指标，如增益、驻波比及方向性均能符合要求。

本文研究的重点是蜂窝移动电话的特性与设计，在以下几个方面进行了研究：

1. 首先给出移动环境中天线性能的理论估算方法，提出了移动天线平均有效功率的概念。
2. 分析了人体临近效应和机壳的辐射对天线性能的影响。
3. 研究了蜂窝电话天线在使用时对人体的射频照射的安全性问题，结论是小于 7W 发射功率的天线对人体的射频照射强度低于国际安全标准。
4. 采用变螺距螺旋设计 GSM 双频天线，测试电性能均达到要求。又由于其生产工艺简单，成本低，适用于大批量生产。

参考文献

1. 蒋同泽．现代移动通信系统．电子工业出版社．1994
2. 郭梯云．数字移动通信．人民邮电出版社．1995

3. H.贾西克 [美] 著 . 茅于宽译 . 国防工业出版社 . 1993
4. 藤本共荣 J.R.詹姆斯著 . 杨可忠 井淑华译 . 移动天线系统手册 . 人民邮电出版社 . 1997:100-215
5. 叶尚辉 李在贵 . 天线结构设计 . 西北电讯工程学院出版社 . 1986
6. 马汉炎 . 天线技术 . 哈尔滨工业大学出版社 . 1997
7. 王朴中 石长生 . 天线原理 . 清华大学出版社 . 1993
8. 康行健 . 天线原理与设计 . 国防工业出版社 . 1995
9. 谢宗浩 刘雪樵 . 天线 . 北京邮电学院出版社 . 1992
- 10.T.S.M.Maclean . Principles of Antennas Wire and Aperture . Cambridge University Press . 1986
- 11.林昌禄 陈海 . 近代天线设计 . 人民邮电出版社 . 1990
- 12.Lee, W.C.Y., Mobile Communications Engineering . McGraw-Hill, 1982
- 13.Bach.Andersen.J . Antennas for VHF/UHF Personal Radio . IEEE Trans. Vehicular Technology. Vol. VT-26. No.4 Nov. 1992
- 14.Lee. W.C.Y. Estimate of Local Average Power of Mobile Radio Signal . IEEE Trans. Vehicular Technology. Vol. VT-34. No.1.Feb.1985
- 15.K.Fujimoto. K.Hirasawa 著 俱新德译 . 小天线 . 国防工业出版社 . 1991
- 16.毛乃宏 . 天线测量手册 . 国防工业出版社 . 1990

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

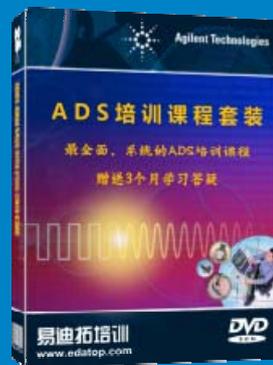
该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装



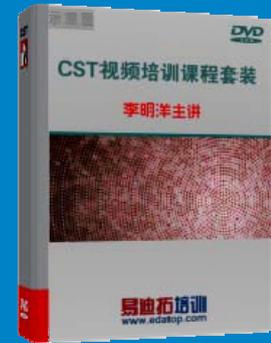
该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



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,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.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>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并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
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,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>