

## 第三讲 对称振子和接地短鞭天线

### 一、 概述

#### 1. 手机通常使用的天线有四种类型：

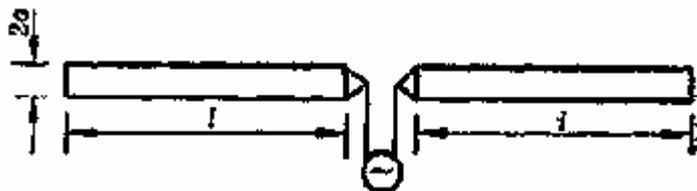
- (1) **PIFA 天线**：即平面倒 F 天线，这种天线的基本组成形式是互相平行的平面辐射单元和接地面，在辐射单元上彼此靠近的位置有一个接地的短路片和一个馈电片。
- (2) **单极子变形天线**：即类似于外置天线的变形，它只有一个馈电的接触弹片，内部可以有多种几何结构形式。
- (3) **PCB 板天线**：这种天线也可以认为是单极子天线的变形，只是将天线辐射体做在 PCB 板上。这种天线可以为外置，由 PCB 走线和过孔共同绕成螺旋状，也可以是内置形式，并允许多种几何结构。
- (4) **陶瓷介质天线**：即将天线做在高介电常数的陶瓷材料上，从而达到减小尺寸的目的。手机蓝牙天线多采用陶瓷介质天线的形式。

#### 2. 所有手机天线都可以认为是从对称振子和接地单极子天线的基础上发展而来，所以这一讲主要给出对称振子和接地单极子天线的理论分析。

### 二、 对称振子（Dipole）天线

#### 1. 对称振子的结构

对称振子由两根同样粗细、同样长度的直导线构成，在中间的两个端点馈电。每根导线的长度是  $l$ ，它又称为对称振子的臂长。在谐振条件下， $l$  为四分之一波长。



这种天线结构简单，适用于多个波段。它可以作为独立的天线使用，也可以作为复杂天线（如天线阵）的单元或面天线的组成部分（如馈源）。手机使用的所有天线都可以以这种天线为出发点作进一步的分析。

#### 2. 对称振子分析

对称振子的分析可以采用集总等效电路法。可以将它看做由终端开路的两根长导线的电流分布张开所形成。无耗开路长线上的电流是正弦分布的，对称振子上的电流也近似按正弦分布，波型与臂长的电长度有关。

取对称振子中心为坐标原点，振子轴沿  $x$  轴，则对称振子的电流分布可以近似表示为：

$$I(z) = \begin{cases} I_M \sin \alpha_e (l - z) & 0 < z < l \\ I_M \sin \alpha_e (l + z) & -l < z < 0 \end{cases} \quad (1)$$

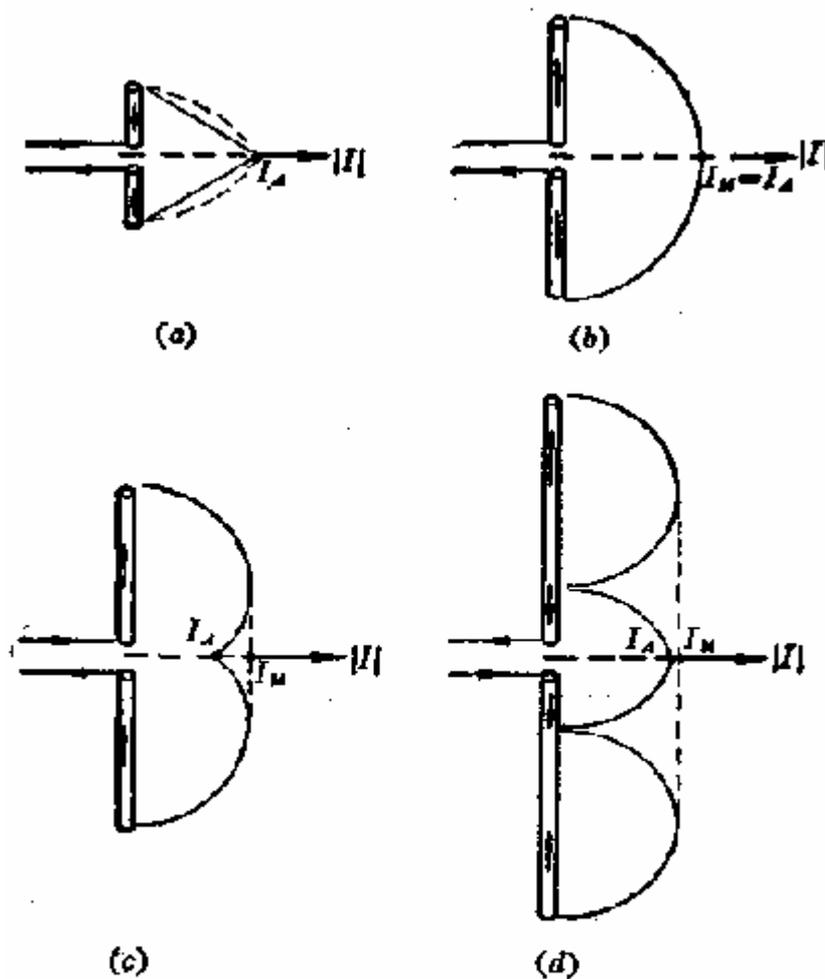


图2-2 对称振子的电流分布

(a)  $l \ll \lambda$ , (b)  $l = \lambda/4$ , (c)  $\lambda/4 < l < \lambda/2$ ,  
(d)  $\lambda/2 < l < 3\lambda/4$ .

其中  $I_M$  是波腹电流， $\alpha_e$  是对称振子的电流传输相移常数， $\alpha_e = 2\pi/\lambda_e$  ( $\lambda_e$  是振子上的波长)，如果不考虑损耗，则  $\alpha_e = k = 2\pi/\lambda$ ，其中  $k$  和  $\lambda$  分别是自由空间的相移常数和波长。

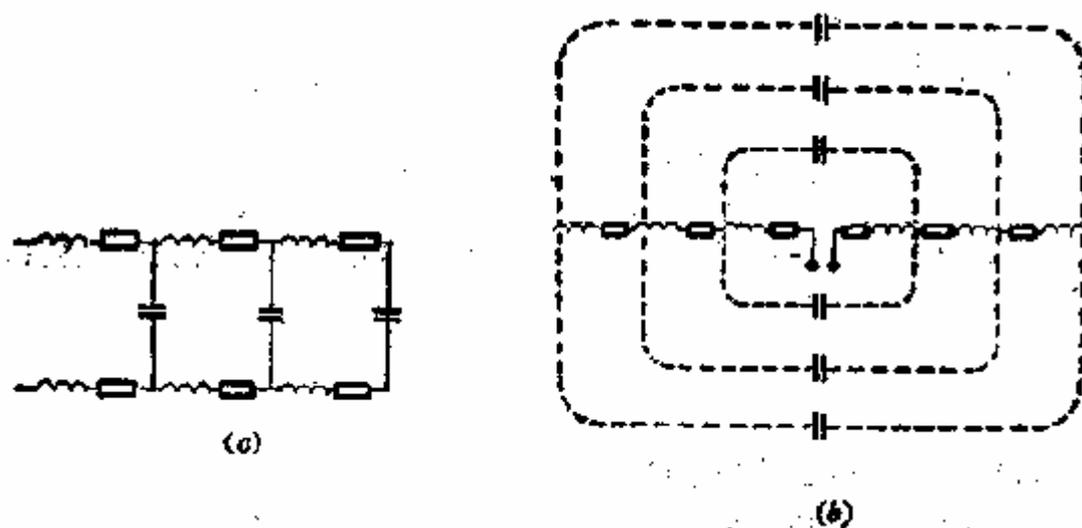
(1) 式还可以写成：

$$I(z) = I_M \sin \alpha_e (1 - |z|) \quad 0 < z < l, \quad -l < z < 0 \quad (2)$$

全长  $2l = \lambda$  的对称振子称为全波振子，全长为  $2l = 0.5\lambda$  的对称振子称为半波振子。实际使用的振子都是半波振子。

需要注意的是，在长线无辐射系统中沿线电流为严格的正弦分布，在有辐射的系统中的电流只是近似正弦分布。

对称振子的等效电路如下图所示。



根据对称振子的电流分布求解辐射场，可以得出为：

$$E(\theta) = \int_0^l (dE_{a_1} + dE_{a_2}) = j \frac{60I_M}{r} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} e^{-jkr} \hat{\theta} \quad (3)$$

$$H(\theta) = j \frac{I_M}{2\pi r} \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} e^{-jkr} \hat{\phi} \quad (4)$$

从中可以看出对称振子的辐射电场只有  $\hat{\theta}$  方向分量，磁场只有  $\hat{\phi}$  方向分量，它们都是空间方向  $\theta$  的函数，与方位角  $\phi$  无关。

在 (3) 式中令  $A_0 = 60I_M / r$ ，得到对称振子的场强方向函数：

$$f(\theta, \phi) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta}$$

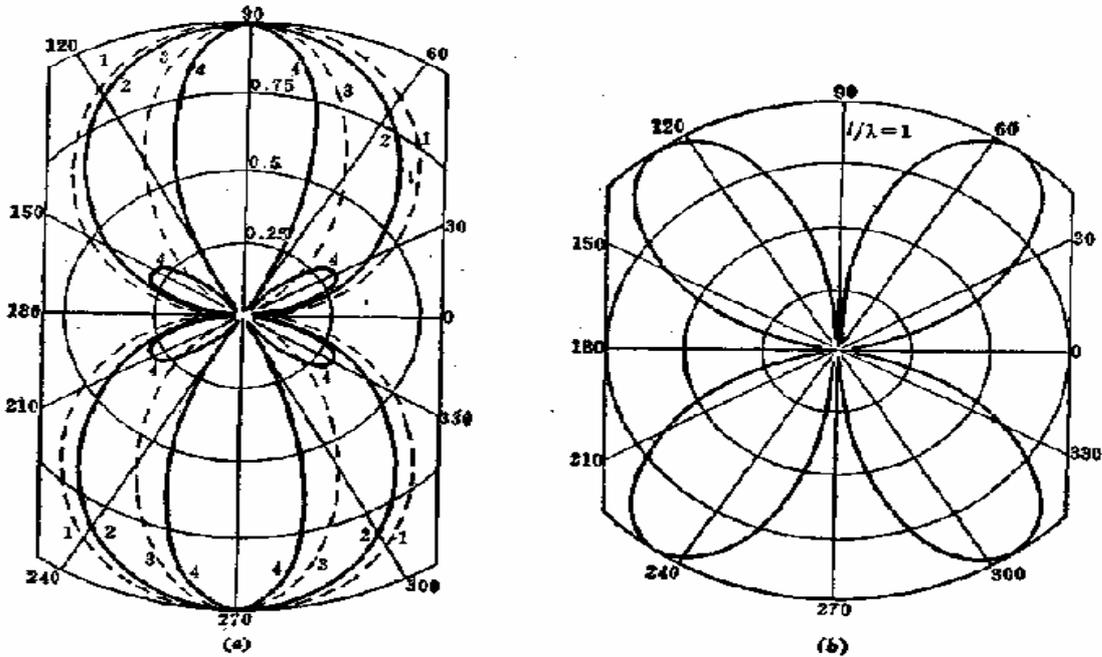
归一化场强方向函数为：

$$F(\theta, \phi) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{f_M \sin \theta} \quad (5)$$

归一化功率方向函数为：

$$P(\theta, \phi) = \left[ \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{f_{\max} \sin \theta} \right]^2 \quad (6)$$

场强方向函数和功率方向函数的空间图形就是对称振子的方向图。



对称振子方向图具有以下特点：

- (1)  $\theta = 0^\circ$  方向辐射场总是 0。
- (2) 当  $l/\lambda < 0.5$  时， $\theta = 90^\circ$  方向辐射强度最大，并且随着  $l/\lambda$  的增大，方向图变窄。
- (3)  $l/\lambda > 0.5$  时，方向图将继续变窄，并在一定方向上出现旁瓣。
- (4) 当  $l/\lambda > 0.7$  时，最大辐射方向已经不在  $\theta = 90^\circ$  方向。
- (5) 当  $l/\lambda = 1.0$  时， $\theta = 90^\circ$  方向辐射场为 0，方向图的主瓣将落在  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  范围内（大约为  $60^\circ$ ）。

### 3. 半波振子方向特性

实际常用的对称振子都是半波振子。它是全长为  $2l = 0.5\lambda$  的对称振子。半波振

子的归一化场强方向函数为：

$$F(\theta) = f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

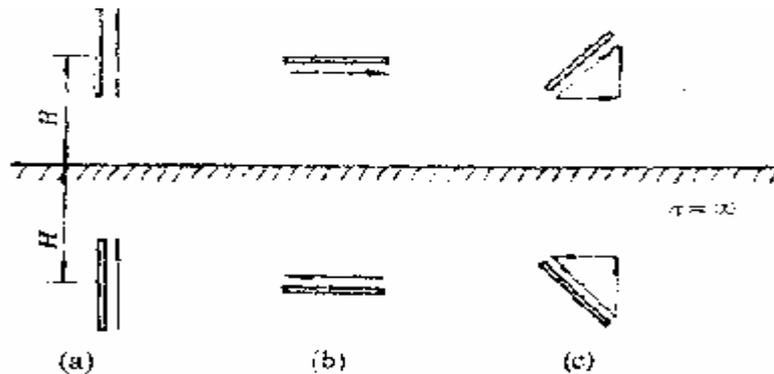
对应的半功率波瓣宽度为  $2\theta_{0.5\text{dB}} \approx 78^\circ$ 。另外，半波振子工作于串联谐振点，输入阻抗为纯电阻 73.1 欧。这是一个不大的纯电阻，并有很好的频率特性，这是半波振子被广泛使用的一个重要原因。此外，无耗半波振子的最大方向增益是 1.64 (2.43dB)，在上一讲中已经介绍。

### 三、 单波振子 (Monopole) 天线

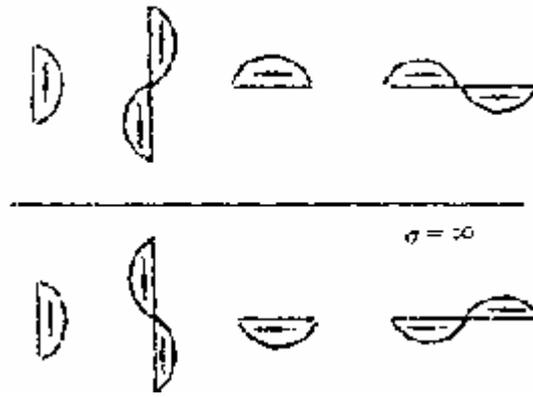
单波振子天线又称单极子天线。其基本原理是将对称振子的两个极性相反的馈点处使用接地面，利用天线对地的镜像与天线一起构成对称振子。这种天线本身的物理尺寸比对称振子缩小 1/2，但具有与对称振子相似的辐射特性，因此这是天线小型化的一种重要措施。

#### 1. 理想导体平面对天线性能的影响

不失一般，考虑电流元的镜像。垂直电流元、水平电流元和倾斜电流元的镜像分别如下图所示。

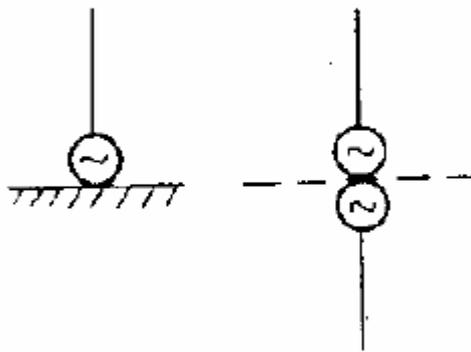


而对线天线，则其镜像可以表示为：



## 2. 接地单极子天线的特性

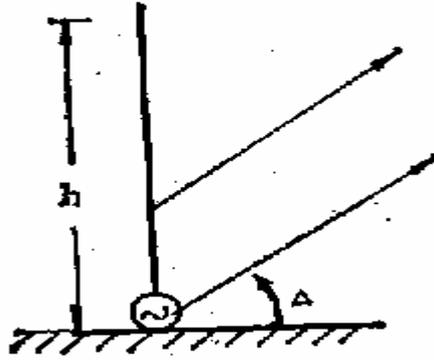
接地单极子是垂直于地面的天线，假设地为理想导体，地的影响可以用其镜像代替，并且仅在地面上半空间存在电磁场。单极底馈天线可以等效为直立对称振子。这种天线在早期的便携式设备和小型基站中被广泛使用，这种天线又称为鞭状天线。



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，可以知道单极天线和等效的双极天线有这样的关系：

- (1) 上半空间方向函数和方向图相同，主瓣宽度、极化特性、频带特性等都相同。
- (2) 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。
- (3) 单极天线的方向系数是双极天线的两倍，因为场强不变而辐射功率减半，只在上半空间辐射造成的。
- (4) 损耗电阻大，辐射效率低。

## 3. 接地单极子天线辐射效率分析



假设单极子天线在地面以上的高度为  $h$ ，则采用电流元积分法可以得到上半空间天线的辐射场为：

$$E_{\theta} = \frac{60 I_0 \cos(kh \sin \Delta) - \cos kh}{\cos \Delta}$$

其中  $I_0$  为输入端电流。

单极天线的特性阻抗和输入电抗的公式为：

$$Z_0 = 60 \left[ j\pi \left( \frac{4h}{D} \right) - 1 \right]$$

$$X_i = -jZ_0 \cot(2\pi h/\lambda)$$

其中  $D$  为天线的直径。辐射电阻的近似公式为：

$$R_{\Sigma} \approx 400 (h/\lambda)^2$$

损耗电阻的近似公式为：

$$R_L = A \frac{\lambda}{4h}$$

式中  $A$  为一个在 2—7 之间的一个常数。如果  $R_{\Sigma} \ll R_L$ ，那么：

$$\eta_A = \frac{400 (h/\lambda)^2}{400 (h/\lambda)^2 + A \frac{\lambda}{4h}}$$

$$\approx \frac{1600}{A} \left( \frac{h}{\lambda} \right)^3$$

此时提高  $h$  可以显著增大  $\eta_A$ ，几乎与  $h^3$  成正比。

[思考] 为什么天线长度越大，辐射效率越高？

## 射频和天线设计培训课程推荐

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,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](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。

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>