

第二讲 电小天线原理和分析

一、电小天线的概念

电小天线就是指最大几何尺寸远远小于波长（ 0.1λ 以下量级）的天线。所有手机内置天线都是电小天线。

当天线的尺寸与波长相比很小时，其实质就是一个带有少量辐射的电感器或电容器。它仍然是整个天线系统的一个分支，与一般大天线相比并无本质差别，只是其电尺寸小，所以有特别需要注意的一些方面。

二、电小天线电特性分析

1. 方向性

在上一讲介绍天线基本原理时曾介绍天线的辐射方向系数 D 的概念。它反映了辐射能量的集中程度。假设在最大辐射方向上某点上某一实际天线与各向同性天线在该点产生相同的场强，则方向系数等于：

$$D = \frac{P_{\Sigma \text{各向同性天线}}}{P_{\Sigma \text{实际天线}}}$$

其中 P_{Σ} 表示辐射功率。电流元或磁流元的方向图都呈苹果状 8 字型，方向系数为 1.5。而电小天线的电尺寸很小，因此其方向图接近电流元或磁流元的方向图，因此其方向系数接近 1.5。半波偶极子天线的方向系数则为 1.64。

2. 辐射效率

辐射效率的定义是：

$$\eta_A = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_L}$$

其中 R_{Σ} 是辐射电阻， R_L 是损耗电阻。在损耗电阻中包括天线自身的欧姆损耗还包括馈线和匹配网络中的损耗电阻，即：

$$R_L = R_{L1} + R_{L2}$$

其中 R_{L1} 是天线上的损耗电阻， R_{L2} 是馈线和匹配网络中的损耗电阻。

一般来说在提到天线效率时并不考虑 R_{L2} ，但由于小天线和匹配电路密切相关，比如一个小的电容性天线，由于天线输入容抗很高，电阻很小，如果要求此天线和发射机匹配，则在匹配电路中必然要求引入一个串连的大电感使之调谐，并通过变换将低阻值变换为所需的电阻值。这是匹配电路必然带来可观的损耗，所以考虑电小天线的效率必须将 R_{L2} 计入，以便于对比各种电小天线的性能。

[注意] 上式中的各项电阻应归算于同一电流，或者是波幅电流或者是平均电流。

从辐射效率的定义式可知，提高辐射效率的途径不外乎从提高辐射电阻和降低损耗电阻入手。

[思考] 为什么手机天线设计中提倡尽量不使用匹配电路，或匹配元件尽量少？

3. 增益

根据天线增益公式：

$$G = \eta_d D$$

要提高增益则应设法提高辐射效率 η_d 和方向系数 D ，但对电小天线来说，由于 $D \approx 1.5$ ，所以提高增益的途径，主要依赖于提高天线的辐射效率 η_d 。

同时由此也可以看出，在电小天线中，提高增益和提高辐射效率是等效的。在手机天线中，有时也使用总辐射功率（TRP）的概念，即天线的总辐射功率，可以通过天线在空间各方向上的增益求积分得到。电小天线中的增益（G）、辐射效率（ η_d ）和总辐射功率（TRP）是三个相互关联的概念，当其中一个性能得到改善时，另外两个性能也随之改善。

4. 输入阻抗

天线输入阻抗 Z_d 定义为天线输入端的电压和电流之比。 Z_d 的有功和无功分量分

别用 R_A 和 X_A 表示，称为输入电阻和输入电抗。

在一个频带内的几个频率上测量或计算天线输入阻抗的数值，可以作出输入阻抗和频率的关系曲线，因为输入阻抗是复数，一般必须分别作出 $R_A \sim f$ 和 $X_A \sim f$ 两组曲线。还有一种显示阻抗轨迹曲线的方法是使用史密斯圆图工具。

电小天线的 R_A 通常很低，它由天线的辐射和天线的损耗两方面的因素形成。

[注意] 在直流和低频电流情况下，金属导体是等势体，导体上的电位和电流分布处处相同。但在天线导体上，同一导体上的电位和电流分布却是处处不同的。因此天线上各点的阻抗值也不同。理论上，在天线上改变馈点的位置可以实现与馈线的匹配。不过由于制造工艺难于实现，所以这个结论并不实用。但应当清楚这一概念。

5. 工作频带

天线的工作频带定义为天线在辐射方面的特性基本满足所提出的要求时的频率范围。由于电小天线方向性在工作频段内类似电流元特性，在整个波段变化不显著，所以主要变化特性一般指输入阻抗的变化，工作频带也都是指阻抗带宽。手机天线一般要求阻抗带宽在 $VSWR < 2.5$ 附近。

容性天线等效为一个 R_A 和 C_A 的串连电路，此时天线的品质因数 Q 值：

$$Q = \frac{1}{\omega C_A R_A}$$

其中 R_A 在天线包含匹配电路时需要将匹配电感中的电阻部分计入。由高频电路理论知串联电路失谐时输出的电压幅度和谐振时的输出电压幅度之比（即归一化选频特性）为：

$$S = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{\Delta f}{f_0}\right)^2}}, \text{ 其中 } \Delta f \text{ 为失谐频带宽度, } f_0 \text{ 为谐振频率。}$$

令上式等于 $1/\sqrt{2}$ ，可以得到：

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

由此式可以看到，天线的 Q 值与带宽成反比， Q 值越大，带宽越小。

三、电小天线的固有缺陷及解决方法

1. 电小天线的固有缺陷

| 辐射效率低

由于电小天线电尺寸很小，因此其辐射电阻将降低，假定天线本身不存在损耗，尽管其辐射电阻降低，总可以通过适当办法消除天线的输入电抗成分，并变换其电阻为适当的数值使其与发射机或接收机匹配，从而有效完成能量转换功能。但遗憾的是，不仅天线本身存在热损耗，而且匹配电路也会引入损耗。当天线的辐射电阻很低时，这些损耗就会更加突出，从而降低了天线的辐射效率，因此对小天线来说，**辐射效率低**是其突出的问题。

| 工作频带窄

既然小天线相当于电容或电感，并且其电阻成分低，亦即其具有一定的高品质因数 Q ，而 Q 值反比于带宽，因此小天线的工作频带比较窄，这就意味着工作频带宽度也是在设计小天线中应当重视的问题。

辐射效率和带宽在电小天线设计中比其他指标突出，因此有时将 $G \cdot \Delta f$ 或 G/Q 作为电小天线的特定指标。在增益一定的情况下，应设法降低 Q 值， Q 值一定时则应设法增大 G 。对发射天线来说，如果在满足带宽的要求下确定 Q ，则此时增益或辐射效率高成为主要设计依据，而对接收天线来说，只要满足噪声的要求下，辐射效率的高低并不像发射天线那么重要。

2. Chu 极限定理

Chu 极限定理认为，电小尺寸天线的 Q 值取值范围由以下公式表达：

$$Q \geq \frac{1}{(kr)^3}$$

式中 k 为波数， r 为天线最大方向上的尺寸。

根据 Chu 极限定理，我们可以得到如下重要概念：由于 Q 值与带宽成反比，与天线最大尺寸的三次方也成反比，而天线尺寸的三次方又反映天线占用的空间大小。因此**电小天线所能达到的最大带宽与天线占用的空间成正比**。因此，对电小天线设计而言，要获得大的带宽，必须保证为电小天线预留足够的空间。

由前面提到的电小天线的特定设计指标 G/Q 以及有关实验证实，在电小天线的带

宽和辐射效率之间存在一种近似的折中关系。因此 Chu 极限定理反映的是极限带宽与占用空间的关系，也可以说是极限辐射效率与占用空间的关系。

在手机天线设计中，这一点具有非常重要的含义。我们设计天线的结构时，最容易犯的错误就是以为内置天线附近空间很大，可以放些马达、音腔、摄像头、金属圈进去，因为那里有足够的空间，而手机板上其余部分空间已经不足。这些情况在天线设计中应尽量避免，或做慎重考虑。

[说明] 事实上，当在电小天线附近放置具有金属材料等物体时，它不仅缩小了天线实际占用的空间，导致极限带宽的下降；而且增大的损耗电阻，造成辐射效率的降低。因此天线占用空间的缩小会直接导致天线性能的急剧恶化。

Chu 极限定理的概念对手机结构设计来说非常重要，而在天线设计中的指导作用并不大。因为在天线设计中很难给出一个复杂电磁环境下的天线等效尺寸 r 的准确值。

3. 提高电小天线辐射效率的途径

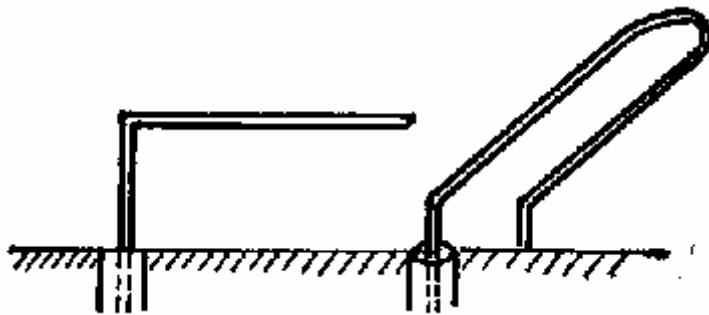
提高电小天线辐射效率，或减小天线尺寸的途径，概括起来不过有以下几种：

- (1) 提高辐射电阻；
- (2) 降低损耗电阻：包括降低天线本身的热损耗和降低匹配电路的损耗；
- (3) 保证功率有效馈送到天线上，减少天线邻近物体及地面条件变化对天线的影响，保证匹配。

当然，采取以上各种措施减小天线尺寸时，必须满足工作频带的要求。

1 提高辐射电阻

最常使用的提高辐射电阻的途径是加顶和加载。比如列车顶部的天线高度受到限制，为增加垂直部分的有效高度，可以在天线顶部加装水平部分使天线类似 Γ 型。当水平部分和垂直部分之和接近 $\lambda/4$ 时，有效高度最大，同时可以使天线的输入电抗分量大大减小。



手机天线使用变形单极子天线作为内置天线时，也常采用类似的措施。手机外置天线使用的螺旋天线是一种连续加载天线，为缩小天线的尺寸，将谐振长度一定的天线绕成螺旋状。

| 降低天线和匹配电路的损耗电阻

当天线的电尺寸较大时，天线的热耗相对天线的辐射而言不大，因为其效率高，但当天线尺寸减小时，其辐射较弱，天线本身的损耗也就相应突出。当然，可以设法使用低耗元件（如电容）来降低其损耗。

手机设计时降低匹配电路损耗电阻的措施有：尽量不使用匹配元件或使用低耗匹配元件；尽量使 RF 模块靠近天线馈点，缩短馈线的长度；尽量使用 PCB 阻抗线而不要使用同轴电缆等。

| 减小邻近物体的影响

在手机天线中，对天线性能影响最严重的环境因素就是 Speaker、马达和金属装饰环。Speaker 不仅由于其中的旋磁物质改变辐射场结构，而且对接收频段是一种强烈的噪声源。如果使用 PIFA 内置天线形式，应尽量避免将 Speaker、马达装在天线辐射单元下方，绝对不允许将两个 Speaker 同时装入天线辐射单元和地面之间。金属装饰环不能在天线的投影面上方，并且与天线的最小间距应大于 6mm。

四、电小天线常用的分析方法

对电小天线进行分析的方法，常见的方法有：

1. 集总参数分析法

这种分析方法的基本思想是，将天线看作终端开路的传输线，并用集总电感或电容等效传输线的分布参数。这种分析方法不很严格，并且对复杂形状的天线往往较难

于分析,但是较为直观,可以帮助我们作出定性的判断。当天线的尺寸小于弧度长 $\frac{\lambda}{2\pi}$ 时,天线就相当于一个电容或电感,忽略热损耗,则等效阻抗中的实部就表示天线的辐射。匹配带宽正比于谐振带宽。

2. 模式分析法

即将天线辐射看作 TM 传输模,求解麦克斯韦方程。这种分析方法较复杂,需要求解较为烦杂的积分方程。

3. 电流分布分析法

即将天线上的电流划分为若干条细小的线电流,分别求解每条线产生的阻抗然后求解积分方程,这也是一种近似方法,计算也比较复杂。

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>