

电子科技大学

硕士学位论文

移动通信中低剖面天线的研究与开发

姓名：王林

申请学位级别：硕士

专业：无线电物理

指导教师：王秉中

20060501

摘 要

随着移动通信的高速发展,手机天线也向内置多频段、低剖面方向发展。与传统外置天线相比,内置天线有着非常诱人的好处,如不易跌破,低特定吸收率(SAR),易实现大规模批量生产。本文将重点放在线倒F型和平面倒F型天线的研究与开发。典型倒F天线包括充当地面的印刷线路板,辐射贴片,馈电探针和短路结构。短路结构可以通过短路金属面或短路棒。与传统单极天线相比,贴片长度大约能够缩减50%。此外,顶部贴片划分为两个或者更多的小贴片能够使天线在双频、三频甚至多频工作。

在序论中首先概述移动通信的发展,并回顾了通信发展对手机天线的影响和挑战。然后综述了线单极天线和平面倒F型天线的基本类型。

论文第二章将考虑手机系统对天线的要求,介绍了天线的主要参数如VSWR、回波损耗和辐射效率。SAR值对人体健康的影响对天线设计的考虑也在这章中引入。

第三章详细研究了移动通信中的三频段线天线。天线印刷线路板的尺寸等参数对天线谐振频率和带宽的影响在本章中详细研究,一个详细的实际设计例子也在本章中介绍,测试结果表明天线获得了较高的增益和较宽的带宽。

第四章重点介绍平面倒F型天线。在分析多种贴片形状和技术后,引入了一种新颖的三频PIFA天线。这个天线通过一个缩减天线尺寸的裂缝取得三频段工作。一些典型附件如扬声器、USB接口和电池的影响也做了讨论。良好的全向辐射特性和低SAR值使这个天线能够应用在实际的手机中。

本文最后对天线的开发和生产也做了简单的讨论,实际生产加工的工程经验也做了介绍。

关键词:平面倒F型天线,单极天线,线倒F型天线,特定吸收率

ABSTRACT

With the rapid progress of modern wireless communication systems, mobile handsets demand low-profile multi-band internal antennas for different standards (DAMPS, GSM, DCS, PCS...). Comparing to traditional external antennas, internal antennas offer several advantages, such as less broken off, low specific absorption rates (SAR), easy mass production. The internal planar inverted-F antenna (PIFA) and wire inverted-F antenna (WIFA) are good candidates for a compact multi-band operation.

The typical IFA includes a circuit ground, a radiation patch, a feed pin and a shorting mechanism. The shorting structure can be realized through a shorting wall or pin. Comparing to the traditional quarter wavelength monopole, the patch size can be reduced at least 50%. Moreover, cutting the top patch into two or three sub-patches can meet the dual-band even multi-band operation. The effects of mobile handsets case and bandwidth are investigated

Chapter 2 gives system concerns of mobile antenna design. The main parameters of mobile antenna, such as VSWR, return loss etc., are introduced. Furthermore, the radiation problems by SAR are considered in the chapter.

Chapter 3 is devoted to an introduction of tri-band wire antennas for mobile communication. Antenna parameters studies are presented and practical design considerations for achieving high gain and wide bandwidth are given.

In chapter 4, a novel PIFA with high radiation efficiency is designed for a tri-band mobile handset application. The design mainly consists of a slit patch to achieve the antenna size reduction and multi-band operation. Furthermore, A circular slit on radiation patch reduces the coupling between the antenna and speaker. The chapter also presents experimental results of the impedance bandwidth and radiation efficiency.

In Chapter 5 and 6, the development and production of antenna are reviewed. Some basic engineering experience has been proposed to meet these manufacturing challenges.

Keywords: PIFA, monopole, WIFA, SAR

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

签名：王林 日期：2006年5月30日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签名：王林 导师签名：王秉中
日期：2006年5月30日

第一章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 移动通信发展概况

第一代移动通信系统是模拟移动通信系统,在 20 世纪初开始了商业运营试验。它对移动通信的最大贡献是使用蜂窝结构,频带可重复利用,实现大区域覆盖;支持移动终端的漫游和越区切换,实现移动环境下不间断通信。第一代移动通信系统的出现和发展,最重要的特点是体现在移动性上,这是其他任何通信方式和系统不可替代的,从而结束了过去无线通信发展过程中时常被其他通信手段替代而处于辅助地位的历史。

第二代移动通信系统是目前广泛使用的数字移动通信系统 GSM 及窄带 CDMA,数字信号处理技术是其最基本的技术特征,提供了更高的频谱效率更先进的漫游。它对移动通信发展的重大贡献是使用 SIM 卡,轻小手机和大量用户的网络支撑能力。使用 SIM 卡作为移动通信用户个人身份和通信记录的载体,为移动通信管理、运营和服务带来极大便利。

第三代移动通信系统是正在全力投入开发的系统,其最基本的特征应当是智能信号处理技术,实现基于话音业务为主的多媒体数据通信,更高的频谱效率、更高的服务质量及低成本。实现全球无线覆盖,真正实现“任何人,在任何地点、任何时间与任何人”都能便利的通信。

第四代移动通信系统是多功能集成的宽带移动通信系统,是宽带接入 IP 系统,现在处在概念阶段,可提供的最大带宽为 100Mbps。第四代移动通信将以宽带、接入因特网、具有多种综合功能的系统形态出现,很可能到 2010 年就会出现相关的实验系统和手机模型^[1,2]。

1.1.2 移动通信发展趋势

移动通信技术飞速发展,从应用和技术角度,呈现出以下的几个重要趋势:

- (1) 网络覆盖的无缝化,即用户在任何时间、任何地点都能实现网络的接入。

(2) 宽带化是未来通信发展的一个必然趋势, 窄带的、低速的网络会逐渐被宽带网络所取代。

(3) 融合趋势明显加快, 包括: 技术融合、网络融合、业务融合。

(4) 数据速率越来越高, 频谱带宽越来越宽, 频段越来越高, 覆盖距离越来越短。

(5) 终端智能化越来越高, 为各种新业务的提供创造了条件和实现手段。

(6) 从两个方向相向发展: 一是移动网增加数据业务: 1xEV-DO、HSDPA 等技术的出现使移动网的数据速率逐渐增加, 在原来的移动网上叠加, 覆盖可以连续; 另外, WiMAX 的出现加速了新的 3G 增强型技术的发展; 二是固定数据业务增加移动性: WLAN 等技术的出现使数据速率提高, 固网的覆盖范围逐渐扩大, 移动性逐渐增加; 移动通信、宽带业务和 WiFi 的成功, 促成 802.16/WiMAX 等多种宽带无线接入技术的诞生^[1, 2]。

1.2 移动通信终端天线概述

1.2.1 研究目的

近年来, 移动通信市场和技术在全球已经取得高速发展, 同时移动终端设备也逐渐趋于小型化。目前, 为了满足手持终端小型化的要求, 手机天线也必须做相应的缩微化设计。微带和印制板天线等平面天线由于有着天然的低剖面、小尺寸、易于加工和安装等特点, 非常适合手机等终端设备的应用。2000 年以来, 许多满足特定带宽、新颖的平面天线被应用在移动通信系统的终端中。这些典型的移动通信系统包括全球移动通信系统 (GSM 890 - 960 MHz), 数字通信系统 (DCS 1710 - 1880 MHz), 个人通信系统 (PCS 1850 - 1990 MHz), 表 1-1 给出了常见的移动通信系统所用的占有的频段。

由于 PIFA 天线结构的复杂性, 目前暂时还没有相对成熟的理论去分析。但是由于当前各种场计算器软件的成熟, 分析电小尺寸的手机天线能够取得比较好的结果。目前比较效率比较高的实施方案是先在印刷线路板上刻出三频 PIFA 天线的原型, 在接近预定目标的情况下通过仿真软件实施优化。通过优化观测各个参数对手机天线电流分布的影响, 从而对实际手机天线加上外壳, 扬声器、电池、振动器和 USB 接口后的调试做到心中有数。

本文最终目标是设计一款在工程中实用的 PIFA 天线, 此天线具备低轮廓紧

凑多频段特性，满足工程中 GSM, PCS 和 DCS 频段的需要^[3, 4]。

表（一）常见无线通信系统所适用的频段

英文全名	英文缩写	中文名	频段
Global Positioning System	GPS	全球卫星定位系统	L1 band: 1575.42 MHz L2 band: 1227.60 MHz
Global System for Mobil Communication	GSM *Enhanced GSM	全球移动通讯系统	890 ~ 960 MHz *880 ~ 960 MHz
Digital Communication System	DCS	数字通讯系统	1710 ~ 1880 MHz
Personal Communication Services	PCS	个人通讯服务系统	1850 ~ 1990 MHz
Integration of Mobile and Fixed Network	IMT-2000 (3G)	移动通讯与固网整合系统（第三代移动通讯）	1920 ~ 2170 MHz
Bluetooth	Bluetooth	蓝牙	2400 ~ 2484 MHz (IEEE 802.11b)

1.2.2 研究方法和现有设计介绍

1.2.2.1 手机中的超低剖面单极天线

传统的棒状单极天线工作在四分之一波长，这就意味着当手机工作在 GSM 900MHz 频段时，单极天线的谐振长度大约是 83mm。如此长的高度，导致天线很难和载体集成到手机壳内部。为了突破如此高度限制，并最大可能的减小天线的外在损坏，以螺旋形、圆环形^[5]和折叠环^[6]为代表的单极天线在文献中被大量研究。同时，许多工作在 GSM900 和 GSM1800 MHz 频段的单极天线也被报道^[7-11]。图 1-1 给出了一种传统工作在 GSM 900 和 1800 MHz 的双频螺旋天线^[7, 8]，注意到此螺旋

有两个不同的螺距。而图 1-2 表明了其它两个可能的双频设计。其中图 1-2(a) 采用了不同半径的同心螺旋组合在一起，而图 1-2(b) 的设计在螺旋单极天线的中心引入一根工作在 GSM 1800MHz 频段直线型单极天线，但两种设计都能满足双频工作。事实上，在第一种类型设计中，工作在 1800MHz 的小螺距天线嵌入谐振频率为 900MHz 的大螺距天线中。第二种类型是把里边的小螺距天线用直棒单极天线替代达到谐振在 1800MHz 的目的。与此同时，采用两个折叠环形式的单极天线也在文献中报道过^[11]。虽然这些新颖的单极天线能够显著的降低天线高度，但是仍然大于最低谐振频率波长的 10%。

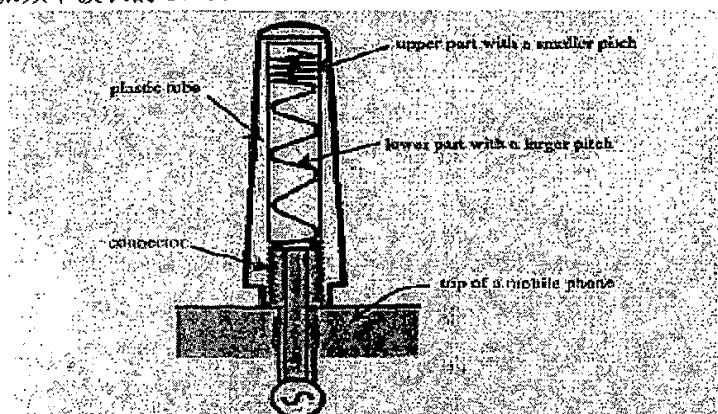


图 1-1 一种工作在 GSM 和 DCS 频段的传统螺旋天线

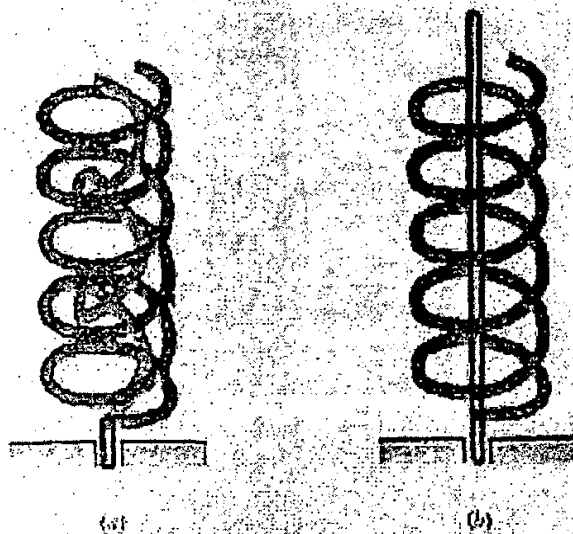


图 1-2 双频螺旋形单极天线 (a) 同心双螺旋天线 (b) 同心单螺旋和直线棒单极天线

为了进一步减小天线高度，最近的文献报道了一些新颖的单极天线变种^[12, 13, 14]。其技术通常还是采用弯曲、折叠和缠绕方法把二维的平面单极天线变换到三维结构当中。这些方法大大的降低了天线离印刷线路板地平面的绝对高度。文献中报道的典型天线高度大约为 15mm，即 900MHz 波长的 4%，甚至提到过工作在 900MHz 而高度只有 7mm 的设计。手机内置天线的设计对大规模生产有非常大的吸引力。事实上，市场上的摩托罗拉 V3 的手机天线就是一种典型代表。

图 1-3 到图 1-6 列出了一些文献上出现的低剖面单极天线^[12, 13]。图 1-3 的天线由在介质上的两个分支蜿蜒线构成，左边的长分支工作在 GSM 频段，右边的短分支谐振在 DCS 频段。

因为蜿蜒线特殊的形状，天线距印刷线路板地面的高度被大大缩减。更进一步的是，如图 1-4，通过在载体的四周缠绕蜿蜒线，天线的整体尺寸能够进一步的降低。需要强调的是，这个设计采用了三条蜿蜒分支，分别对应三个不同的频段。

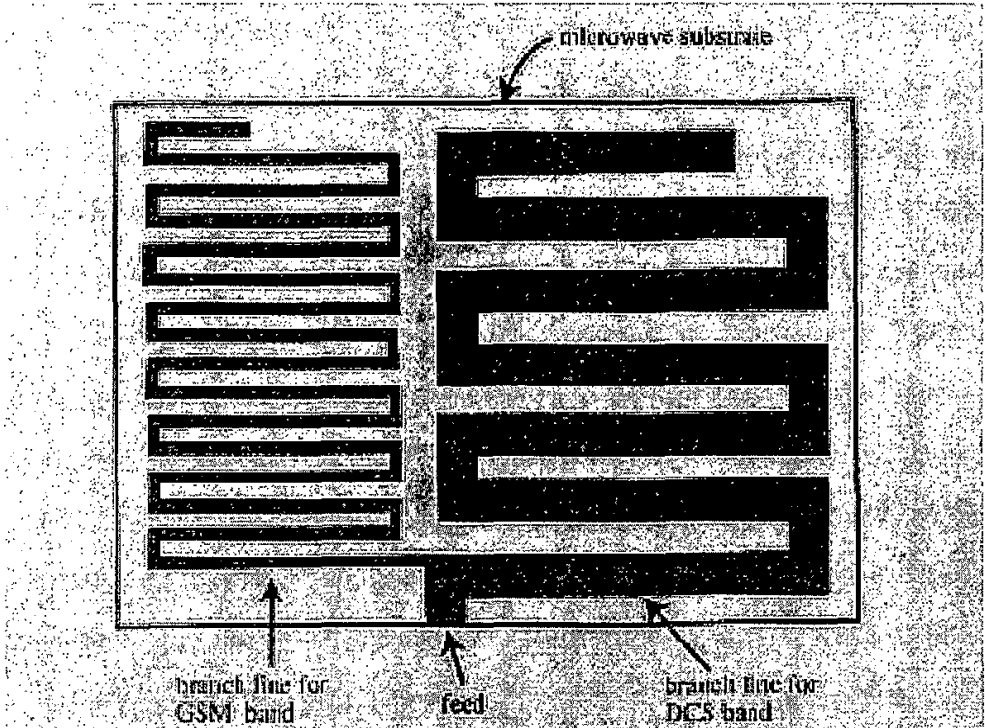


图 1-3 在介质基板上的双频 GSM/DCS 天线

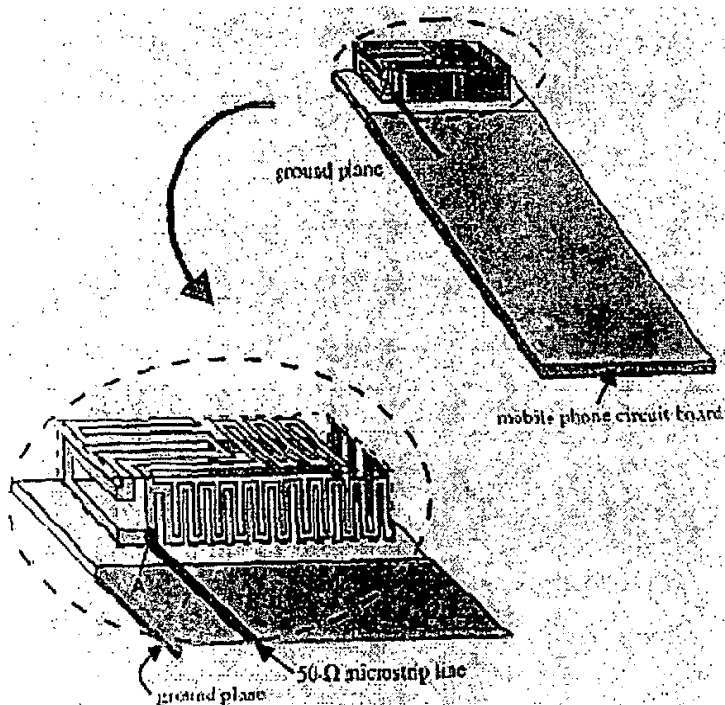


图 1-4 缠绕形蜿蜒天线

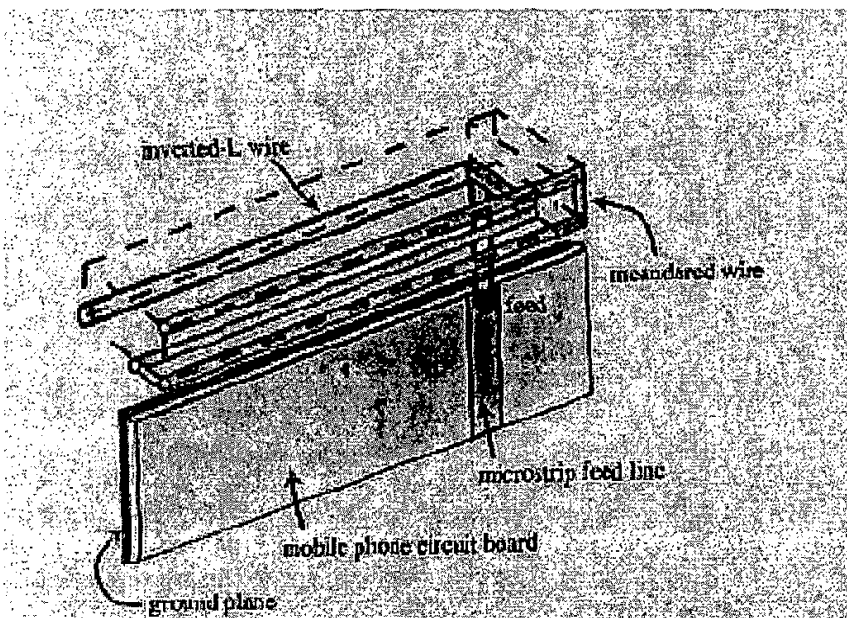


图 1-5 一个双频倒 L 型单极天线示意图

另外，如图 1-5 所示，通过在倒 L 金属线天线上加载一个蜿蜒分支也能取得双频段工作。在这个设计中，倒 L 是作为一个 GSM 频段分支，而蜿蜒分支则工作

在 DCS 频段。需要再次说明的是，图 1-2 到图 1-5 的设计都是采用两个不同长度的谐振路径取得的双频工作。

当然，也可以采用天线的前两个谐振频率实现 900MHz 和 1800MHz 双频的操作。图 1-6 给出了一种垂直于手机印刷线路板的双频螺旋型单极天线。印刷在载体上的矩形螺旋带状单极天线大大缩小天线的尺寸，因此得以内置在手机中。同时注意到，带线的宽度是不一致的，这恰是影响天线前两个谐振频率的关键因素。

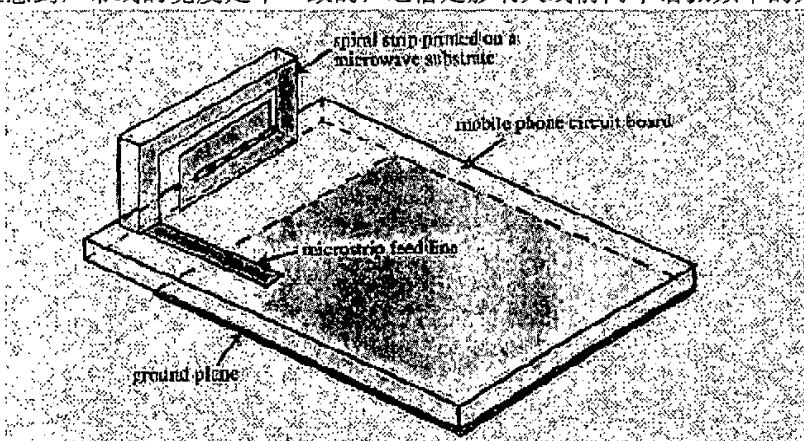


图 1-6 双频螺旋型单极天线示意图

1.2.2.2 平面倒 F 型天线

通过一个短路金属平面或者短路金属线，平面倒 F 型天线能够谐振在一个相对小的天线尺寸^[4]。由于其紧凑的设计尺寸，因此非常适合在移动终端设备中应用，许多新颖的双频、三频甚至多频被报道在文献当中^[13-34]。

图 1-7 给出了典型安装在手机印刷电路板上 PIFA 天线的示意图。图 1-8 列举了文献中报道的一些能够工作在双频的 PIFA 天线辐射贴片。这些设计有个共性就是紧凑的尺寸，容易固定在天线载体上，因此非常适合在手机内置天线中应用。与传统外置式单极棒状或者鞭状手机天线相比，PIFA 天线的这些设计能够避免外在的损坏，如擦刮、磨损等，内置 PIFA 天线现在已经是手机天线的主流选择。PIFA 天线另外一个显著优势在于非常小的后向辐射，降低了用户的头部对辐射能量的吸收，与此相反，鞭状天线的全向辐射特性对于手机用户，特别是头部的安全不利。这些好处导致了許多新颖的 PIFA 天线设计，其中大部分工作在双频、三频甚至四频段手机中，取得了大规模的应用和显著的经济效益^[35-46]。

仔细观察图 1-8 中所示的双频 PIFA 天线，主要有两个设计概念：一是通过两个不同的天线片长度产生两个独立的谐振模式来实现双频工作；另外一种是通过

一个谐振长度的两个谐振频率实现双频工作。在前一个例子中，具体的设计技术实现包括倒 L 缝或者折叠缝^[18, 30]，如图 1-8a 和 1-8b，或者 U 型槽（图 1-8c）^[20, 29]，芯片电感电容（图 1-8d）^[22]，芯片电感加载（图 1-8e）^[24]。在第二设计概念当中，主要通过分支线取得加长的谐振路径（图 1-8f）^[23]，蜿蜒形贴片（图 1-8g）^[17-32]，螺旋形贴片（图 1-8h）和折叠蜿蜒形贴片（图 1-8i）。

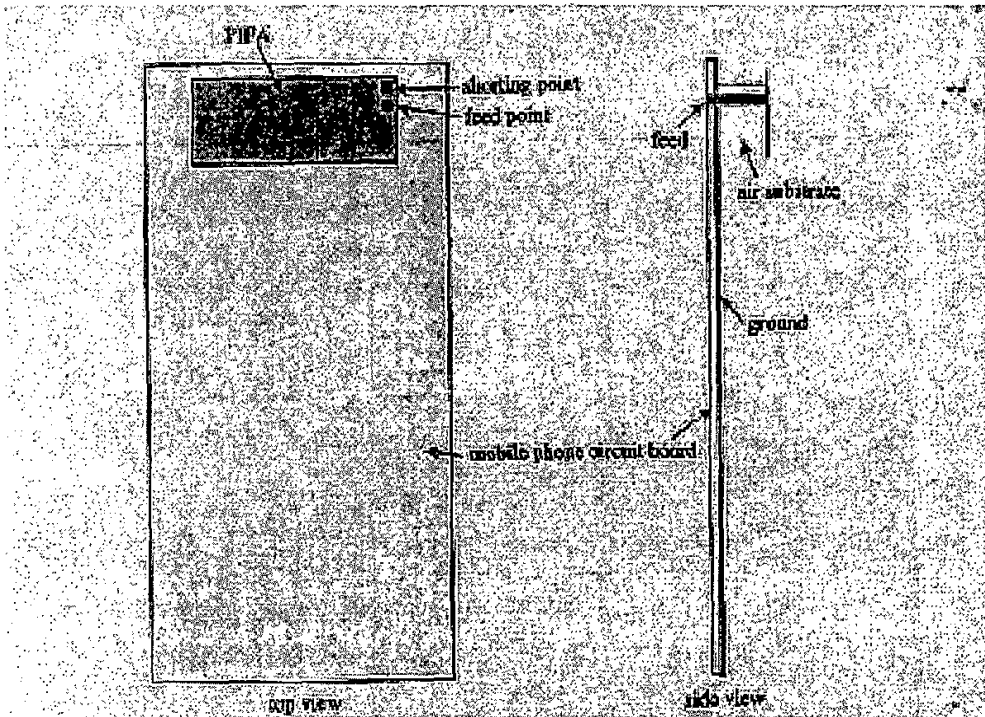


图 1-7 典型 PIFA 天线示意图

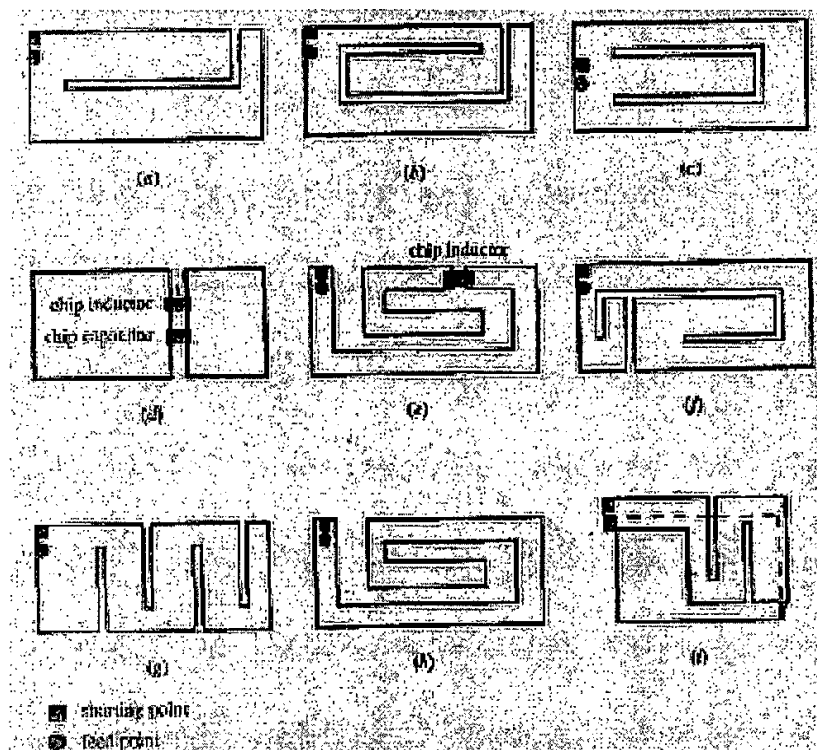


图 1-8 典型 PIFA 天线及其变形

1.3 本文论文结构安排

本论文所研究的课题全面细致的剖析了实际中移动通信天线研究与开发。第一章引言部分首先介绍了课题的研究背景，并介绍了典型移动天线的类型。第二章简单阐述了手机天线的主要辐射和电路参数，以及手机系统设计时需要考虑的问题。第三章主要工作体现在移动通信中的单极天线的基本原理，实际双频工作线单极天线的设计与开发，以及实验测试结果和样品。第四章重点讨论了当前广泛应用于手机天线设计领域的平面倒 F 型天线设计和开发技术。第五章给出了印刷电路板尺寸对天线的谐振频率和带宽的影响。论文的最后讨论了手机天线的开发与生产。

第二章 天线设计中的系统考虑

一般来讲，现在大多数手机中天线的系统考虑都由手机厂商来定义，而原始设备厂商只是根据手机厂商提供的天线标准来设计和加工天线。成功的天线解决方案需要手机公司和天线生产厂家共同来解决这些手机天线的系统考虑。

大部分情况下，手机系统考虑主要集中在手机的收发性能和人类健康因素。事实上，这正是两个矛盾的因素。也就是说，在提高手机性能的时候往往伴随着对人类辐射能量的增加，因而人类健康受威胁的程度明显增大。我们将具体考虑上面的两个因素。

2.1 手机性能

在天线设计初始阶段，将从手机厂商得到设计需求，其中对天线工程师相当重要的是手机天线主要电参数定义和手机原型机械指标。天线设计初始阶段，主要考虑的是天线的增益、辐射方向图和电压驻波比有时是回波损耗。而在后阶段，重点为总辐射功率(TRP)和全向灵敏度(TIS)的两个指标。

天线主要被用作发射和接受能量的器件。它这种接受和发射能量性能的能力主要体现在天线的设计和传播环境。一般来讲，手机天线的能量是在整个空间全向传播，除非遇到某个障碍物，导致某些方向没有辐射能量。手机覆盖距离的能力可以由一个很重要的参数定义，这就是有效辐射功率(ERP)，数学上严格的定义是

$$ERP_{\max} = P_m G_{pk} \quad (2-1)$$

这里， ERP_{\max} 是最大有效辐射功率， P_m 是天线输入功率， G_{pk} 是天线峰值增益。相关各国都规定了手机的传输功率等指标，这些规范然后强加给服务提供商，最终由手机和天线供应商实现。从方程 2-1 我们看到 P_m 是手机系统设计者需要考虑的重要指标，对天线设计工程师来说，天线峰值增益 G_{pk} 是非常重要的参数。为了考虑所有覆盖区域，有效辐射功率(ERP)通常被定义为

$$ERP(\theta, \phi) = P_m |E(\theta, \phi)|^2 G_{pk} \quad (2-2)$$

这里 $|E(\theta, \phi)|$ 是天线在 (θ, ϕ) 方向上的辐射强度。从方程 2-2 可以看到，一个完全的有效辐射区域需要天线的辐射强度决定。然而，做一个全空间的测试将耗费

大量的时间，所以实际中辐射特性往往通过做仰角和方位角平面的平均增益近似计算。

另外一个影响天线有效辐射功率的是天线的输入功率 P_m 。这里需要区别的是天线的输入功率 P_m 和系统供给功率 P_s 。由于天线的阻抗不匹配，导致系统供给功率不一定全被天线传播。一般用反射系数来表示来表达阻抗的不匹配，

$$\Gamma = \frac{Z_r - Z_o}{Z_r + Z_o} \quad (2-3)$$

这里 Γ 是反射系数， Z_r 是负载阻抗， Z_o 是特性阻抗。当系统供给功率 P_s 遭遇阻抗不匹配时，一部分能量被馈入天线，一部分被反射，因此传输入天线的能量被输入功率 P_m 来定义，

$$P_m = \Gamma^2 P_s \quad (2-4)$$

方程 2-4 中的反射系数决定了系统供给能量 P_s 馈入天线的百分比。电压驻波比 VSWR 和回波损耗一般用来定义天线的这个性能，

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2-5)$$

$$RL = 20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (2-6)$$

2.2 健康风险

但是，随着手机通讯的发展，天线如此接近与靠近人体，主要是头部，潜在的辐射危险不可避免。手机在接收和发送信号时，射频部分会向外发送电磁波，人体在电磁场的作用下会产生一定的反应。原因是在外电场的作用下，人体将产生感应电磁场，由于人体各个器官均为有耗介质，因此体内电磁场会产生电流，导致吸收和耗散电磁能量。

各国政府对无线通信终端的这项指标一直十分重视，欧洲、美国、澳大利亚、新西兰、日本和韩国等都已制定了本地区或本国的“射频和微波辐射管理”法规或指令。

国际上在确定电磁辐射的基本限制时，采用比吸收率 (Specific Absorption Rate, SAR)。定义为生物体单位时间 (s)、单位质量 (kg) 所吸收的电磁辐射 (照射) 能量，其单位是 W / kg。ICNIRP (国际非电离辐射防护委员会) 导则中限值的根据：

(1) 4 W / kg 是热效应的基本限值，当 SAR 达 4 W / kg 时会对人体产生显著的不良效应。

(2)在该基本限值的基础上,采用 10 倍的安全系数作为职业人群接受照射的限值为 0.4 W/kg 。

(3)在该基本限值的基础上,采用 50 倍的安全系数作为普通人群接受照射的限值为 0.08 W/kg 。

目前,特定吸收率 SAR 被各国广泛接受为人体暴露在射频辐射下的度量。因此如何全面的理解 SAR 的产生机理对于改善 SAR 性能非常重要。当然,射频辐射是产生 SAR 的源头,能量越大,SAR 值问题越突出。辐射能量增加引起电流密度增大,高电流密度对人体组织的影响就必须考虑,SAR 问题本质上是电流密度的管理问题。反应在天线上就在两方面:一是天线上的电流分布,另外一个电流源产生的辐射。要是 SAR 值得到改善,一是通过改变天线结构使天线的辐射性能发生变化,如方向图的变化。另外本身天线上的电流分布也会发生变化。更加详细的信息可以参考 FCC 相关文档 <http://www.fcc.gov/cgb/sar/>。

第三章 移动通信中的单极天线

本章将主要讨论应用在手机上的单极天线。主要内容将围绕单极天线理论和移动通讯多频段单极天线展开。

第一节主要介绍了线天线的基本分析方法。在目前众多有效的数值方法中，矩量法（MoM）被广泛应用在分析线状天线模型的电路和辐射参数。随着天线技术和设计的发展，接下来将要讨论倒 L 型单极天线以及其各种变形。馈地点的位置和地板效应将在第二节中讨论，不同的馈点位置对 S 参数的影响例子被研究，一些实验结果也将报道。第三节将要讨论用于手机中的三频天线。天线的主要参数如长度、位置和高度等被研究。

3.1 单极天线的基础理论和分析

3.1.1 单极天线理论基础

因为线天线有非常好的全向辐射特性，所以早期的手机外置天线主要是采用线天线的形式。单极线天线的研究历来有着深入的研究，基本上提供了整个线天线理论的框架和细节。当前移动通信的发展要求手机一般工作在 2 个、3 个甚至多个频段。同时，手机尺寸越来越小，给传统单极线天线设计带来巨大的缩微化压力，因此天线必须设计得非常紧凑才行。事实上，天线得缩微会导致天线效率和带宽得下降。

一般来讲，印刷线路板的尺寸参数，如宽度和长度，单极线天线的半径。手机印刷电路板的大小、单极天线的长度、馈点的位置都将影响天线的辐射性能。对一个典型在理想地表面的细圆柱单极天线，在谐振点的特性是：

- 输入阻抗大约为 36.5 欧姆，即偶极子天线的一半
- 全向辐射。

另外，当单极天线在形状发生改变，如成圆锥性、折叠性时，天线的输入阻抗和带宽能够得到提高，但是其全向辐射特性不会改变。

在印刷线路板上的四分之一波长单极天线的辐射特性在这一节中被研究。研究表明，当天线的馈电点从印刷线路板的中心移到边上，天线的导纳会有一个下

降。因此，天线安装的位置就增加了手持天线在负责环境应用的灵活性。然而，当单极天线缩减到低剖面时，天线的效率会有一个显著的下降，为了使天线正常工作，就需要提高输入功率，反过来限制在手机上的应用。

倒 L 型单极天线和倒 F 型单极天线是两种应用在移动通讯终端设备上的典型低剖面天线。由于天线距离地板的高度大约为工作波长的百分之一，因此手机印刷电路板的大小，以及天线主要附件如电池、扬声器在设计初期需要适当考虑。

积分方程是最基本的计算线天线表面电流分布方程。一般来讲，通过矩量法能够顺利解出积分方程。当然，也有很多计算机辅助设计软件有助于工程上设计线天线。在接下来小节中，将要重点分析一类经典的倒 L 型单极天线及其变种。相关的天线参数如带宽、增益和辐射图也将在这一节中描述。

3.1.2 单极天线分析方法

虽然工程使用上的单极线天线有各种不同的结构，但是为了得出天线边值问题的封闭解，还是采用了简化线天线结构，并将单极天线置于正交曲线坐标系中。最近三十年来，积分方程法主导线天线的研究，这里也将采用这种技术。

假设同波长相比半径很小的线天线置于线性、均匀和各向同性介质中，那么它的电流将沿着线的方向流动。电场 \mathbf{E}' 通过磁矢位 \mathbf{A} 能够被表达成，

$$\mathbf{E}' = -j\omega\mu\mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\varepsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) \quad (3-1)$$

在这里

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint J(\mathbf{r}') \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d\mathbf{r}' \quad (3-2)$$

这里波数， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ， λ 为波长。 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 是需要确定的未知电流，把它可以表示成如下所示的有限个展开函数 $\mathbf{J}_m(\mathbf{r}')$ 之和

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = \sum_{m=1}^M \mathbf{I}_m \mathbf{J}_m(\mathbf{r}') \quad (3-3)$$

一旦确定了未知系数 \mathbf{I}_m ，就能计算出感兴趣的参数，例如输入阻抗和电场。

3.2 倒 L 型线天线

图 3-1 所示结构的天线称为倒 L 天线，它由作为垂直单元的短单极子和附加在单极子末端的水平单元组成。由于倒 L 天线垂直单元的高度被限制在一个波长

的一小部分上，因而基本上是一个低剖面结构。水平单元可变形为各种形状，总长度通常为工作波长的四分之一。

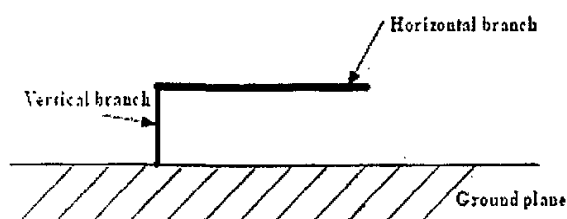


图 3-1 倒 L 天线的基本结构

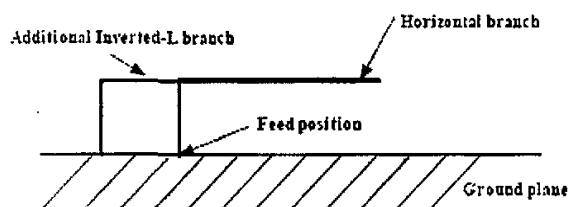


图 3-2 典型倒 F 型天线的结构

倒 L 天线本身有一个低阻抗值。因为它基本上是在单极天线末端增加了一段水平的垂直短单极天线，天线的输入阻抗几乎等于短单极天线的阻抗加上与地面接近的水平线的电抗。为了增加辐射电阻，在垂直单元的末端附加另外一段倒 L 型线段，就成了如图 3-2 所示的倒 F 天线。这种变形非常重要，因为对于倒 F 天线，不需要在天线和负载之间附件任何电路的情况下，调整它的几何尺寸就能让其输入阻抗具有与负载阻抗匹配的值。当然细导线制成的倒 L 天线的缺点是频段比较窄，典型的只有中心频率的百分之一或者更低，为了展宽带宽，一般用金属贴片来代替细导线，这将重点在下一章讨论。

3.3 移动通讯中的双频段线天线

3.3.1 介绍

内置单极线天线是一种非常好的手机备选天线。通过天线形状的改变能够使天线工作在双频、三频甚至多频段上。本章将通过计算机仿真技术和实验结果讨论一种双频段内置线天线。

3.3.2 天线结构

图 3-3 给出了安装在手机原型上类似于回形针的内置单极线天线。这个天线有低剖面、紧凑双频段工作的特性。图 3-4 给出了天线从顶端和侧面的结构示意图。

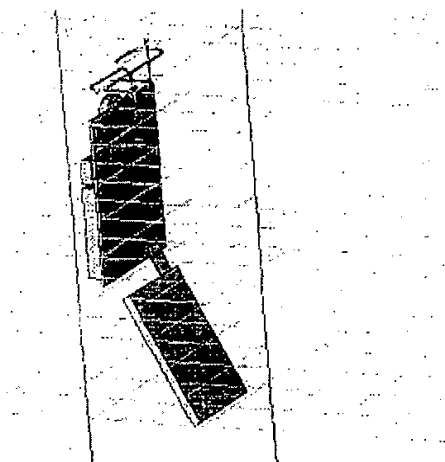


图 3-3 回形针单极线天线

这个单极天线安装在手机末端，由六个的平行或者垂直线段组成，总长度为 $0.5 \times \pi \times H + \pi \times (W3 + W5) + W2 + W4 + W6$ ，其中上端水平部分类似与一个方形螺旋。这里，印刷线路板的厚度是 $T1$ ，相对介电常数为 ϵ_r ，天线由 50 欧姆电缆馈电，扬声器、USB 接口，电池和震动器依次分布在印刷线路板上。下一节将对主要参数做敏感型研究。

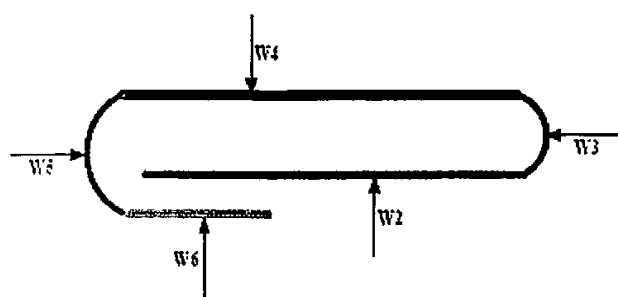
3.3.3 天线参数研究

单极天线的长度、馈点位置等参数在本节中被仔细研究。电磁仿真软件 CST 用在这个参数研究中。一般地，馈点位置不会对单极天线的谐振频率产生大的影

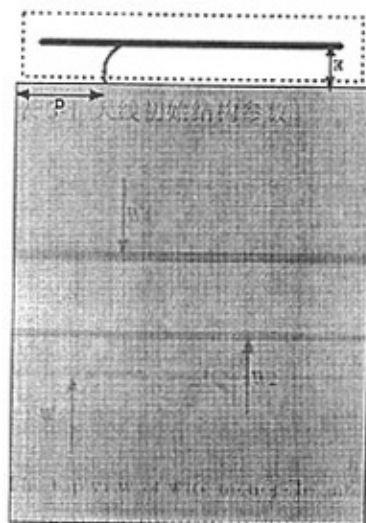
响，但是会引起天线的阻抗值的变化。馈点位置变化对天线的回波损耗的影响在本节中被建模和分析。表 3-1 给出了天线初始配置的结构参数。

D/mm	H/mm	W2/mm	W3/mm	W4/mm	W5/mm	W6/mm	Rdius/mm
10	10	20	3	40	6	10	0.5

表 3-1 天线初始结构参数



(a) The top view of wire monopole antenna.



(b) The front view of wire monopole

图 3-4 回形针天线研究

图 3-5 给出了回波损耗随不同馈点位置 D 的变化图。天线谐振在 800MHz 和 1850MHz 两个频率点上，并且取得了足够的带宽。图 3-6 给出了随着不同馈点位置，天线前两个谐振模式的变化。从图中可以看出天线围绕在 800MHz 和 1850MHz 波动，并且在最左边和中间谐振频率最高，而当馈点移到最右边时，天线的谐振

中心频率最低。

图 3-6 做了对天线段 W5 的参数分析。W5 线段参数从 3mm 延长到 6mm，从图中可以观察到天线的谐振中心频率发生轻微的改变，而当 W5 为 5mm 时，天线取得最佳的匹配。

而图 3-7 表明了当 W5 长度线性增加时，天线前两个模式的谐振中心频率以同样的趋势线性下降。

图 3-9 表明了当水平分支的最后一端 W6 发生变化时回波损耗图。图 3-10 暗示了两个模式的谐振频率与天线的 W6 的长度线性相关。

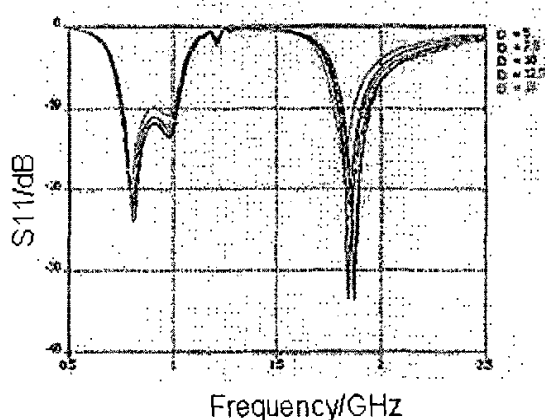


图 3-5 不同馈点位置的回波损耗图

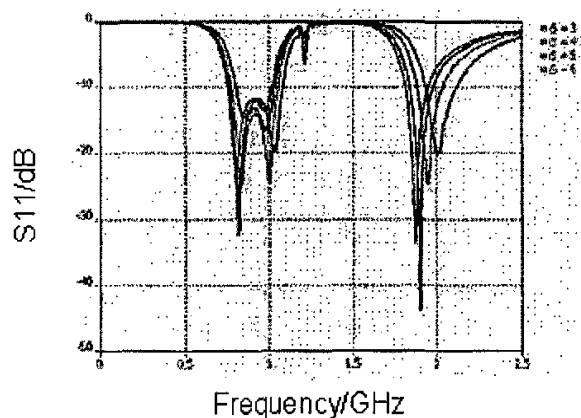


图 3-6 W5 段值取不同值时的回波损耗段

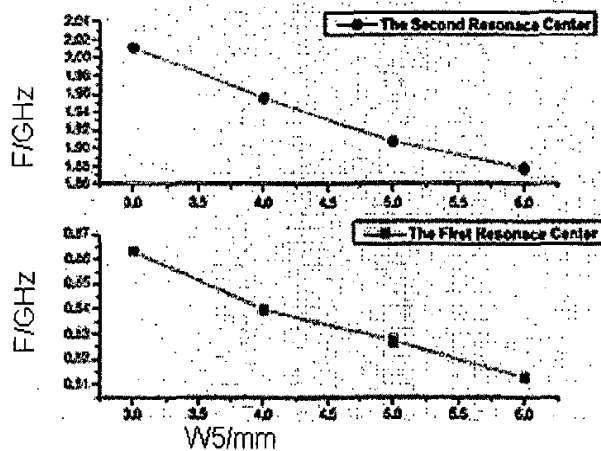


图 3-7 W5 段长度变化时谐振中心的变化图

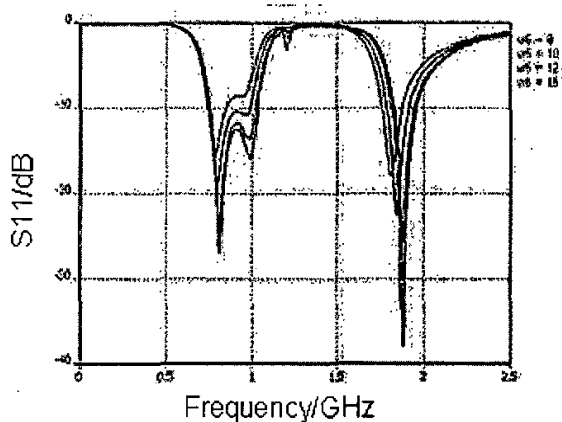


图 3-8 W6 段取不同长度值的回波损耗图

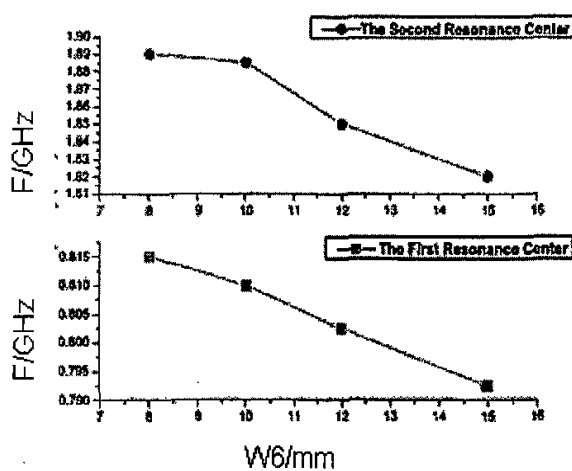


图 3-9 不同 W6 长度的中心频率变化图

3.3.4 实验结果和讨论

依据 CST 仿真的结果, 经过仔细分析, 我们加工出图 3-11 所示的一种回形针型单极线天线和变形的线倒 F 型天线。图 3-11 a 是一个单极天线安装在翻盖式仿真的手机上, 图 3-11 b 采用了一个馈地分支成为线倒 F 天线。天线电路参数回波损耗在 HP8753 上完成, 并且在暗室中做了效率测试。

图 3.10 给出实测的回波损耗值。其中图 3-10 a 和 b 分别表示了手机合上和打开状态的回波损耗值。从图 3-10 a 可以得出, 对于普通单极线天线, 当手机处于打开状态时, 天线获得了良好的阻抗匹配; 但是对于线倒 F 天线, 手机在打开和闭合状态对天线的回波损耗影响不大。

单极线天线和线倒 F 天线的效率在暗室被测量, 如表 3.2。首先可以发现单极天线和线倒 F 天线两者在 DCS 和 PCS 频段的效率都能达到 50%, 然而在闭合和打开状态下 GSM 频段的效率都不高, 最多才达到 28%。因此进一步改善天线的阻抗匹配, 提高效率是此两类型天线设计未来的主要任务。

表 3-2 线单极天线和线倒 F 天线的效率

	WIFA		Monopole	
	open	close	open	close
GSM	0.13	0.16	0.11	0.28
DCS	0.56	0.46	0.52	0.62
PCS	0.42	0.45	0.51	0.59

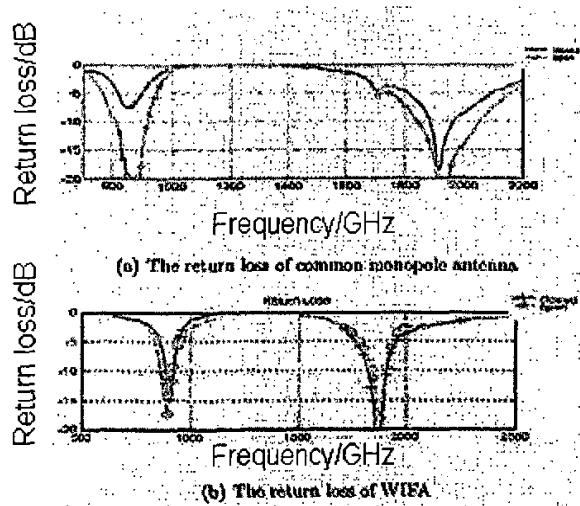
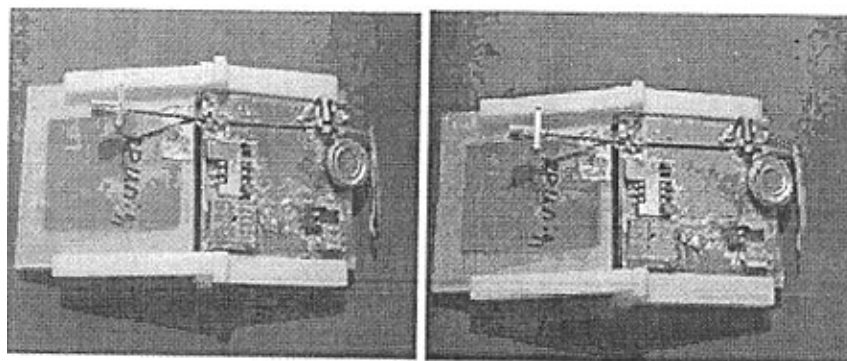


图 3-10 (a) 单极天线回波损耗图 (b) 线倒 F 型天线回波损耗



(a) The monopole antenna

(b) WIFA

图 3-11 回形针天线 (a) 回形针单极天线 (b) 回形针线倒 F 型天线

第四章 手机中的 PIFA 天线研究与开发

我们在序论中已经提到, PIFA 天线是与其侧面结构与倒反的英文字母 F 外观雷同而命名。PIFA 天线的操作长度只有四分之一操作波长, 而且在其结构中已经包含有接地金属面, 可以降低对模块中接地金属面的敏感度, 所以非常适合用在 RF 模块装置中。另一方面, 由于 PIFA 天线只需利用金属导体配合适当的馈入及天线短路到接地面的位置, 故其制作成本低, 而且可以直接与印刷线路板电路板焊接在一起。

PIFA 天线的金属导体可以使用线状或是片状, 若以金属片状制作则可设计为 SMD 组件来焊接在电路板上达到隐藏天线的目的。此时为了支撑金属片不与接地金属面产生短路, 通常会在金属片与接地面之间加入绝缘的介质, 如果使用介质常数较高的绝缘材质还可以缩小天线的尺寸。

本节我们首先介绍更多的 PIFA 天线类型, 重要围绕贴片的形状来讨论, 最后给出一个实际制作、测试并成功在手机中应用的天线。

4.1 常见 PIFA 天线贴片类型

采用 U 形槽贴片 (图 4-1) 取代 L 形和折叠型缝贴片的一种 PIFA 在文献中被报道^[16, 17]。在这个双频设计中, 一个 U 型槽嵌入在矩形贴片的中心, 把 $L_1 \times W_1$ 大小的矩形贴片 (谐振在 900MHz) 中分割成出一个 $L_2 \times W_2$ 的小矩形 (谐振在 1800MHz)。由于内置的小矩形贴片谐振在 1800MHz, 这种设计有利于降低 SAR 值, 从而也减小了人体大脑对电磁能量的吸收。这种 PIFA 天线的谐振频率计算有一个经验公式,

$$f_1 \cong \frac{c}{4(L_1 \times W_1)}, \quad (4-1)$$

$$f_2 \cong \frac{c}{4(L_2 \times W_2)}, \quad (4-2)$$

这两个方程有利于设计双频 PIFA 天线, 其中 c 是真空中光速。

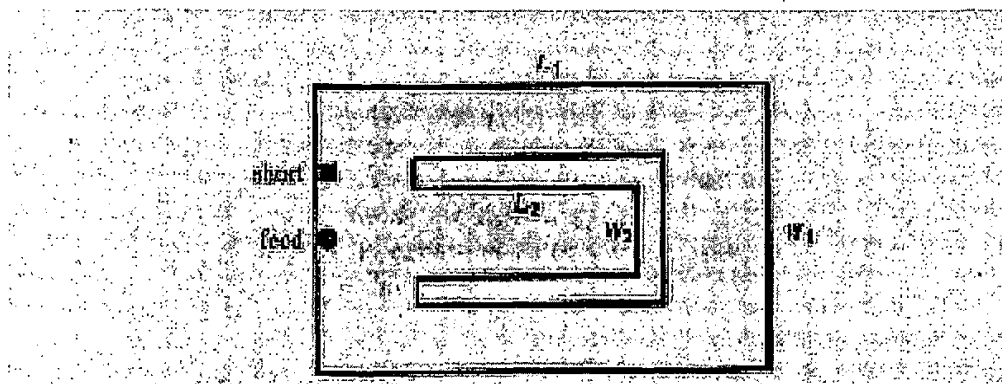


图 4-1 U 型槽嵌入式 PIFA 天线

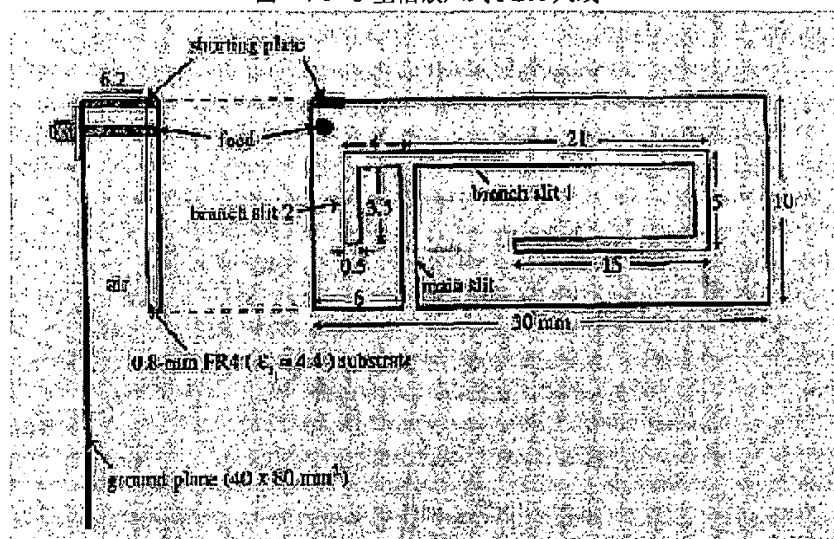


图 4-2 有分支线缝的双频 PIFA 天线

分支线缝 PIFA 天线也是通过分支线缝实现两条不同的谐振路径来实现 900MHz 和 1800MHz 双频操作。图 4-2 列出了一种非常有诱人的设计。通过分支线缝造成表面电流蜿蜒的流向，延长了谐振长度，从而实现双频操作。此设计原型的构造和测试也被报道。贴片被印刷在 0.8mm 厚的 FR4 介质上，并且用长为 2mm 的短路面短路。贴片上的分支线缝由一条主缝，一条折叠缝 1 和一个倒 L 缝 2 组成。主缝在贴片的终端开路，折叠缝 1 起到蜿蜒外面电流的作用，而倒 L 缝 2 主要为了改善前两个谐振频率的阻抗匹配。需要指出的是，倒 L 缝 2 的长度小于折叠缝 2 的长度。另外，馈点和短路平面都在短的倒 L 缝所在贴片的边缘，并且馈点和短路面相隔很近。在这个例子中，贴片的表面电流以开始在馈点，然后沿着由折叠缝 2 分出来的蜿蜒线流向端点，因此长蜿蜒线路径导致了尺寸的缩减。

需要指出的是，这个 PIFA 天线设计中的前两个谐振波长分别对应着蜿蜒线表

面电流路径的 4 倍和 2 倍，就可以说是此天线的蜿蜒贴片工作在对应频段四分之一波长和二分之一波长。这个特性可以方便的利用来设计 900 MHz 和 1800 MHz 的双频天线。此外，由于蜿蜒线的末端处于矩形贴片的中心处，所以可以预期很少一部分电磁能量被人体头部吸收。图 4-2 天线结构的 SAR 测试值为 900 MHz 为 0.21 W/kg，1800MHz 为 0.11 W/kg，符合设计的预期。

图 4-3 表示的是此天线测试和仿真的回波损耗图。从图中可以看到，用 IE3D 仿真的结果和实验结果在谐振点和回损值都吻合的很好。并且，还可以得处，天线在 900MHz 和 1800MHz 有很好的阻抗匹配特性，基本满足移动通信双频工作的带宽。以回损值为 7.3dB 参考，在 900MHz 和 1800MHz 下的带宽分别为 24MHz 和 123MHz。事实上，在蜂窝移动通信中，通常 GSM 和 DCS 频段的带宽分别为 70MHz (890—960MHz) 和 170MHz (1710—1880MHz)。因此，并一步通过优化分支线缝，是此类天线提高带宽的一种重要而有效的途径。

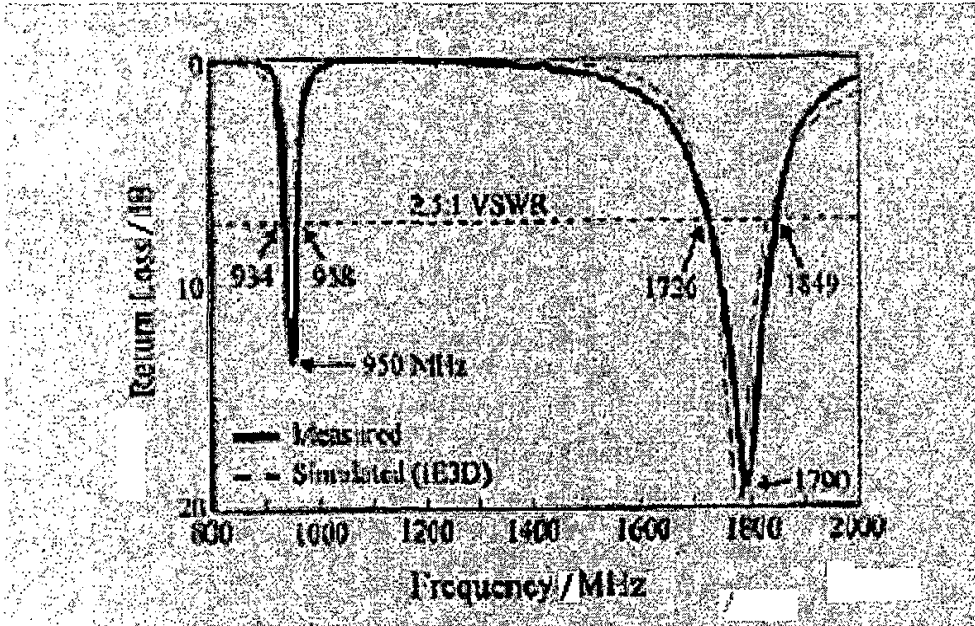


图 4-3 测量和仿真的回波损耗图

贴片上不同谐振频率下的电流分布也被研究。图 4-4 分别表示的仿真 950MHz 和 1790MHz 贴片上的表面电流分布。从图中可以清晰的看见，表面电流的路径决定了天线的谐振频率。

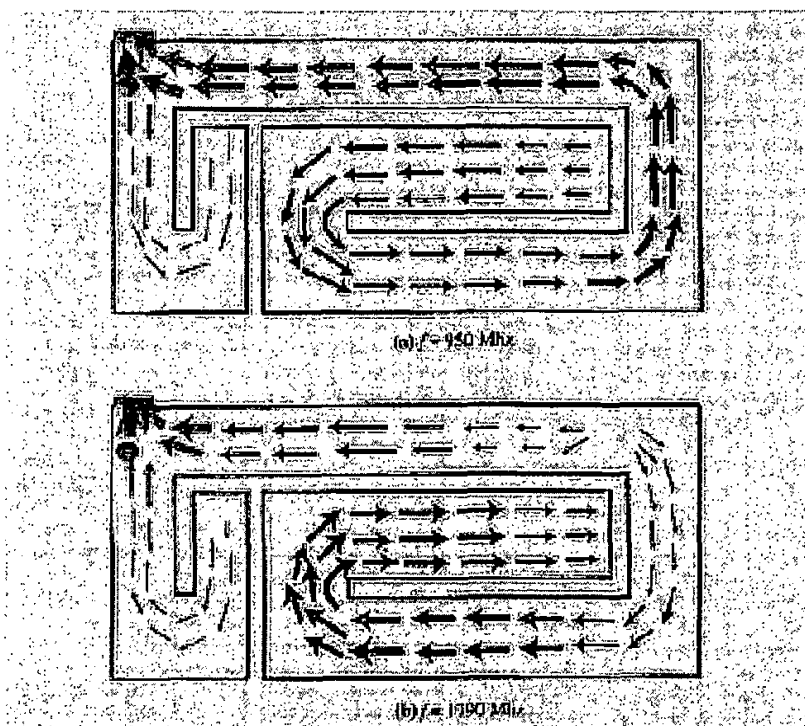


图 4-4 不同频率下天线贴片表面电流分布

图 4-5 和图 4-6 分别给出了两个频点的测量辐射方向图。对这两个谐振点来说, 可以看到, 在 X-Y 平面有非常好的全向辐射特性存在, 因此适合与手机天线的应用。另外, 在低频段和高频段的增益分别为 0.5 和 1.5dBi。

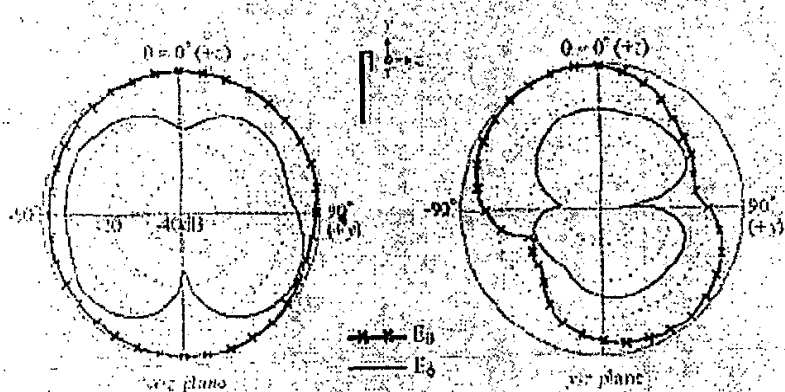


图 4-5 950MHz 测量辐射方向图

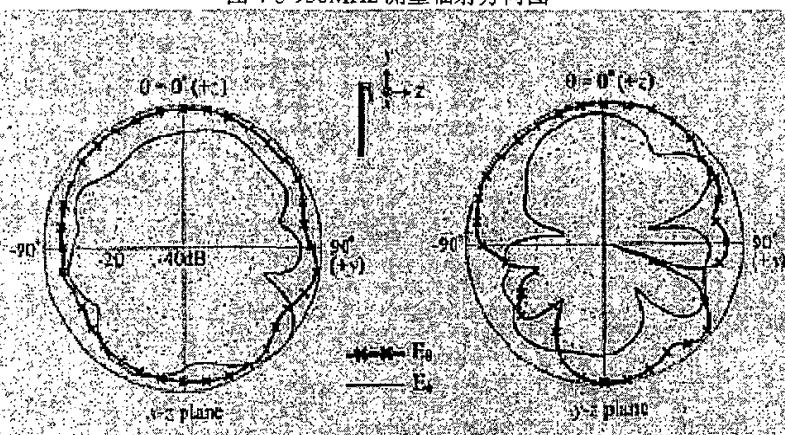


图 4-5 1790MHz 测量辐射方向图

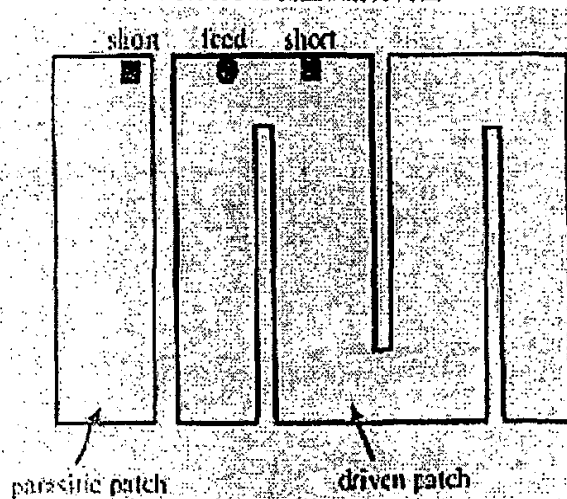


图 4-6 寄生贴片 PIFA 天线

如图 4-6, 对于寄生短路贴片的蜿蜒贴片天线, 通过适当调节蜿蜒贴片的大小

和长度, PIFA 天线的前两个谐振频率比, $\frac{f_h}{f_l}$ 之比大约为 2, 因此非常适合工作在移动通信中的 900MHz 和 1800MHz 频段。进一步的调查发现, 通过附加一个寄生的短路贴片, 高频段的带宽能够得到显著的提高。文献中报道的是在一个大小为 $40 \times 110 \text{ mm}^2$ 的印刷线路板上, 尺寸为 $40 \times 30.4 \times 7.2 \text{ mm}^3$ 的寄生短路贴片 PIFA 天线在高频段取得了 533MHz (驻波比为 3:1) 的带宽, 覆盖了整个 PCS 和 DCS 频段。这主要是因为短路贴片感应了一个谐振频率, 导致了天线在高频的带宽得到了提高。同时, 这个设计在低频段也获得了 115MHz 的带宽, 满足 GSM 频段的工作要求。实际上, 此天线设计覆盖了 GSM、DCS 和 PCS 三个频段。

在这个设计中, 折叠贴片 1 和一个折叠贴片 2 共享一个短路针。两个贴片都印刷在相对介电常数为 4.4, 厚度为 0.8mm 的印刷线路板介质上。同时, 贴片 2 围绕着贴片 1 设计取得一个 $18 \times 32 \text{ mm}^2$ 的紧凑设计。一个大约为 6.4mm 的空气层填充在天线和印刷线路板之间, 因此实际的天线到地板的距离是 7.2mm。两个贴片都有靠近馈点的探针激励。用短路针或者短路面短路更多大小不同的贴片可以在低频段区域和高频段区域都取得带宽的拓展, 图 4-7 展示了这种设计。

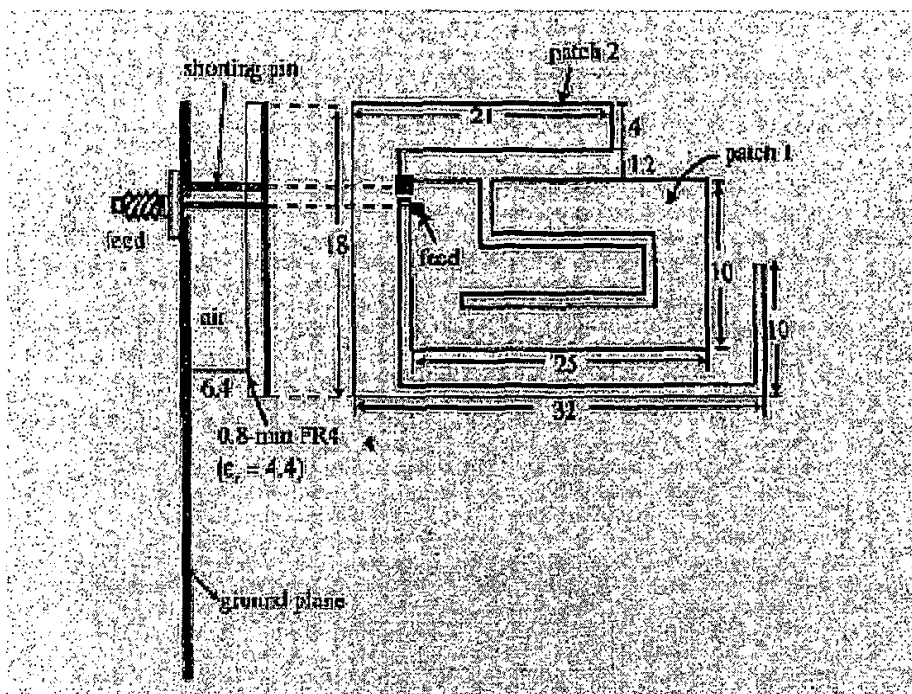


图 4-7 多寄生贴片的 PIFA 天线

4.2 三频 PIFA 天线设计

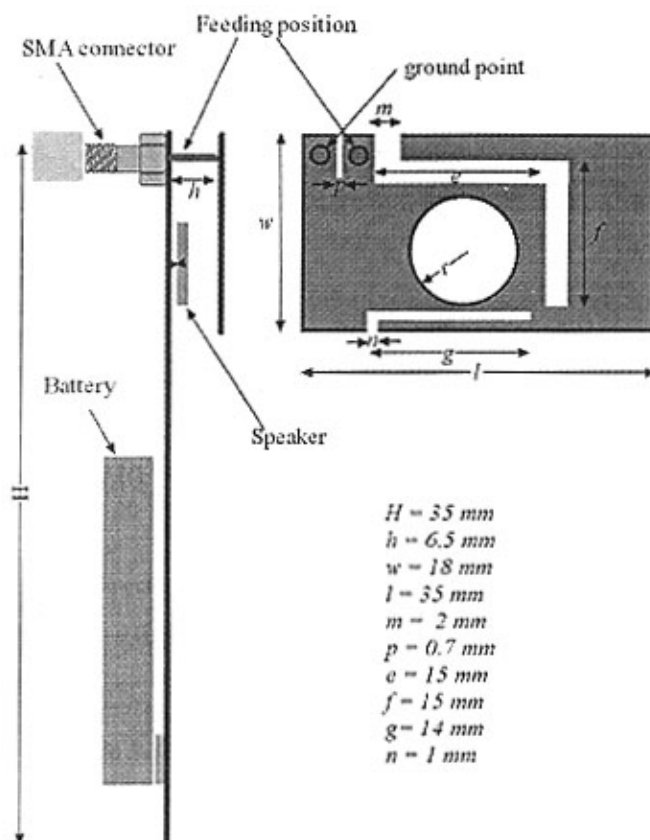


图 4-8 三频 PIFA 天线结构示意图

我们提出了一种工作在三频段的 PIFA 天线。在这个设计中，天线主要通过折叠缝取得尺寸缩小和 DAMPS 850, DCS 1800 and PCS 1900 频段操作。更进一步的是，圆形的空缝减小了天线和扬声器之间的电磁耦合，由于天线效率的提高。所提出的天线应用在手机上有诸多的好处，如尺寸紧凑、低剖面、低花费、宽带、全向辐射、高辐射效率 and 低 SAR 值。图 4-8 出这种天线的结构图，由一个馈点探针、一个接地探针和两个 L 型细缝。天线被安装在大小为 $l \times s$ 的印刷线路板上，天线离印刷线路板高度为 6.3mm。整个个印刷线路板大小为 $15 \times 35 \times 1$ 。半径为 5mm 的圆形孔处于天线贴片的中间。

除了天线贴片，真个手机原型还有电池、扬声器、天线载体和构成地面的印刷线路板。研究发现，天线的扬声器的位置和大小严重影响手机的匹配，因为造成天线效率的下降，利用孔洞回避了扬声器的影响，普通探针激励用在实验中。

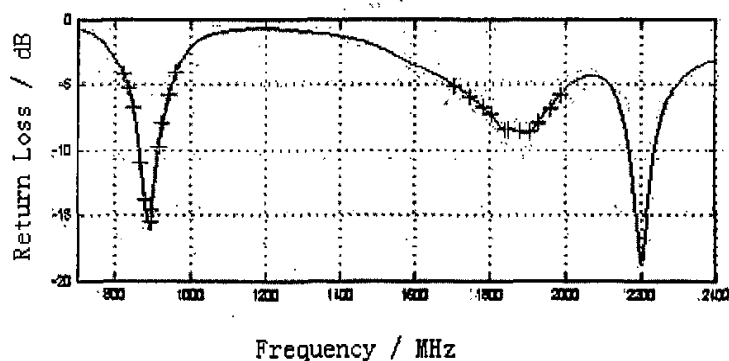


图 4-9 测试的回波损耗图

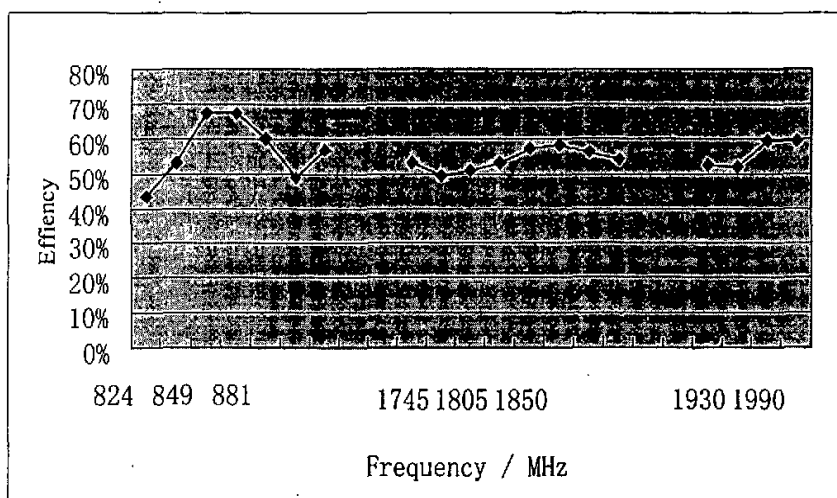


图 4-10 测试的效率图

实验已经验证测试了所提出的天线。为了仿真实际的手机应用环境, 天线高度被固定在 6.3mm。当然印刷线路版的长度和宽度也决定天线的电流分布, 是影响天线性能的重要参数。

图 4-9 测试的回波损耗图。从图中很明显看到天线覆盖了 DAMPS, DCS 和 PCS 频段。事实上, DAMPS 的带宽能够到 150MHz。图 4-11 到 4-13 给出三个频段下测试的方向图, 获得了非常好的 Y-Z 平面全向辐射图。通过标准增益喇叭天线测试的效率也被得到, 如图 4-10, DAMPS 频段大约为 57%, DCS 为 54%, PCS 为 56%, 满足典型的手机厂商制订的天线规范。

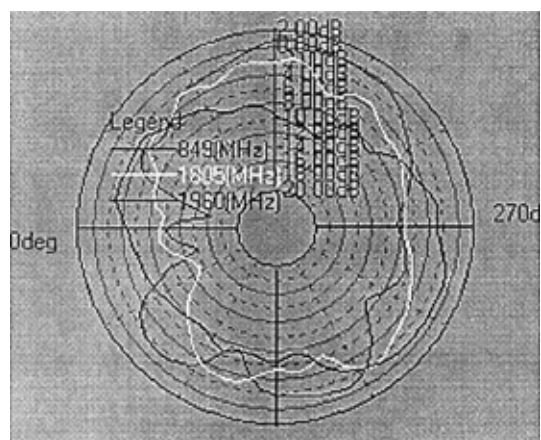


图 4-11 X-Z 平面的辐射方向图

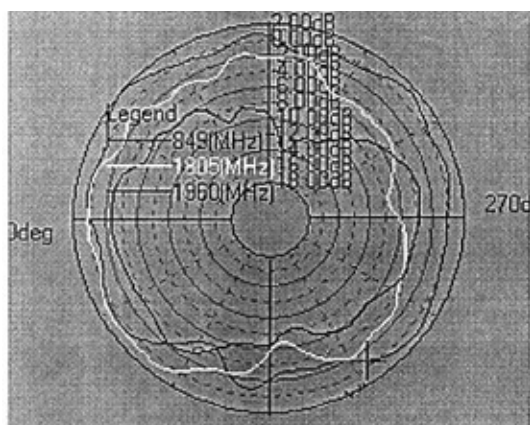


图 4-12 Y-Z 平面的辐射方向图

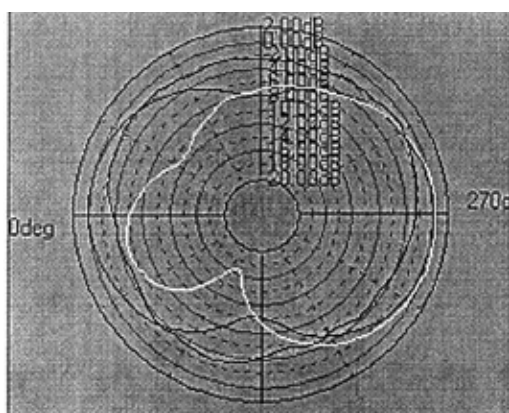


图 4-13 X-Y 平面的辐射方向图

第五章 地平面和馈点对天线带宽的影响

一般的讲，馈点位置对天线的输入阻抗有着不可忽略的影响，因此研究馈点的位置对于手机天线设计有着重要的参考价值。同时，由于手机的印刷线路板与工作波长可以相比，因此印刷线路板也是重要的辐射源。本节将主要讨论印刷线路地板的大小对天线的阻抗和带宽的影响。

5.1 天线结构

如图 5-1 所示的 PIFA 天线。天线被放置在印刷线路板的中心上方，并通过一个短路贴片和中心短路针接地。印刷线路板长度为 L ，宽度为 W ，矩形贴片为长为 18，宽为 24，采用 SMA 接头中心馈点。

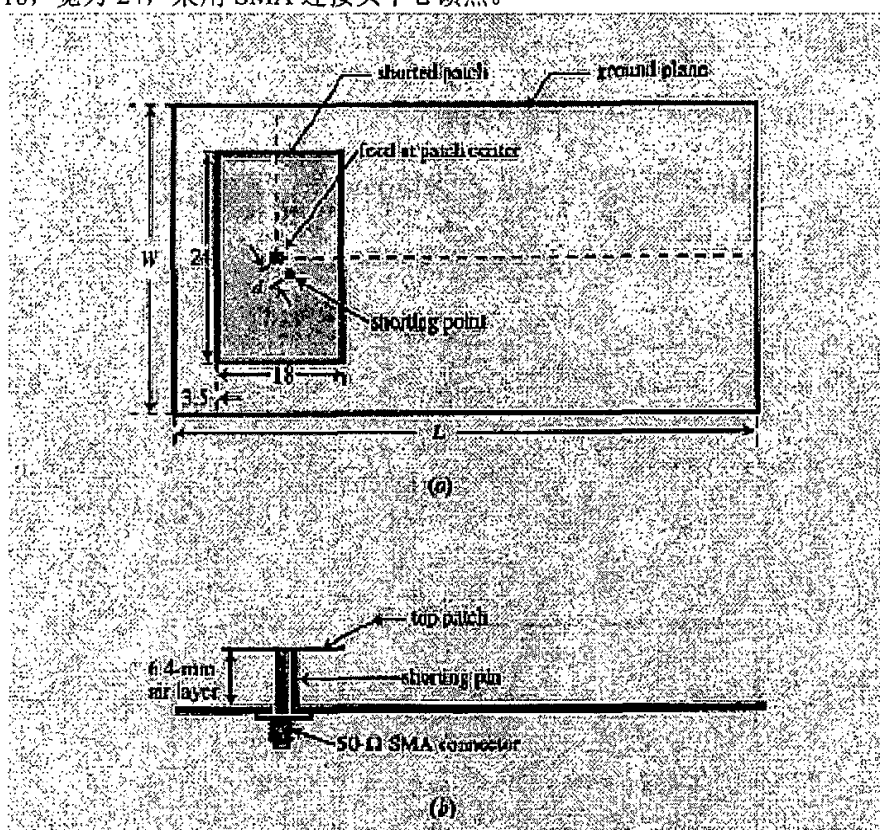


图 5-1 中心馈电 PIFA 天线

5.2 实验结果

回波损耗值随印刷线路地平面大小变化的影响被实验研究。在这个研究中,印刷线路板的初始宽度被固定在 30mm,图 5-2 给出了回波损耗值随印刷线路板长度的变化。从图中可以看到,印刷线路板的长度对测量的回波损耗有非常大的影响。同时,10dB 点定义的阻抗带宽和中心频率与印刷线路板长度的函数关系被描绘在图 5-3 当中^[35]。研究结果发现,通过改变印刷电路板的长度和宽度,天线阻抗带宽也发生相应的变化。在 UMTS 应用的 2GHz 频点上,印刷线路板的大小最大影响在带宽上反应约有 300MHz,并且有一个最优的印刷线路板长度使 PIFA 天线获得最大阻抗带宽。另外,印刷电路板的宽度还有一个临界值。当印刷电路板的宽度小于这个临界值,阻抗带宽的变化就会变得非常敏感。

我们再来回顾图 5-1 给出了一个安装在长度为 L , 宽度为 W 印刷线路板的 PIFA 天线。当天线工作在 UMTS 频段时,要求中心频率 2050MHz 上的带宽为 250 MHz。PIFA 天线长为 24mm, 宽为 18mm, 空气介质高度为 6.4mm。一个处于贴片中心的探针激励 PIFA 天线。靠近馈电的短路针以一个微小间距 d 短路天线。在这个研究中,为了取得最佳的阻抗带宽,间距 d 并没有被固定在一个值,而是从 0.75mm 到 2mm 变化。

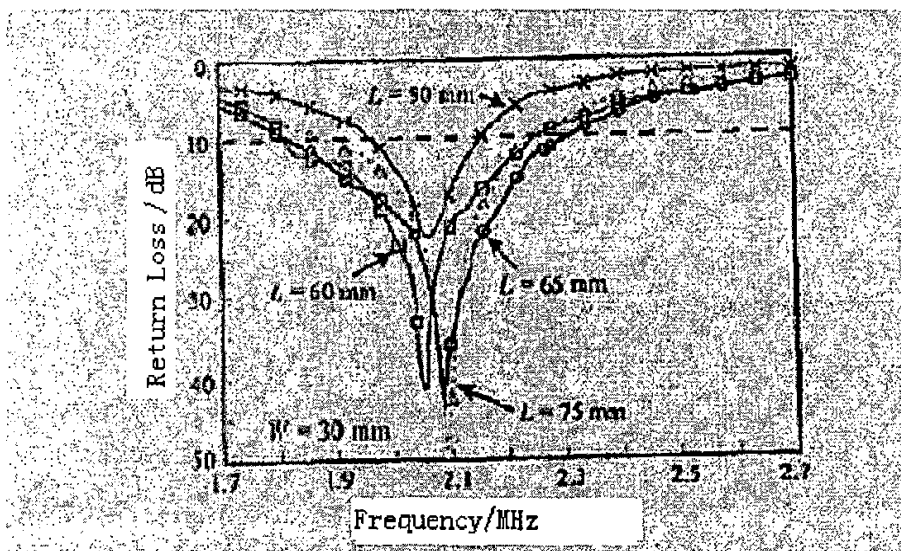


图 5-2 不同印刷线路大小的测量回波损耗值

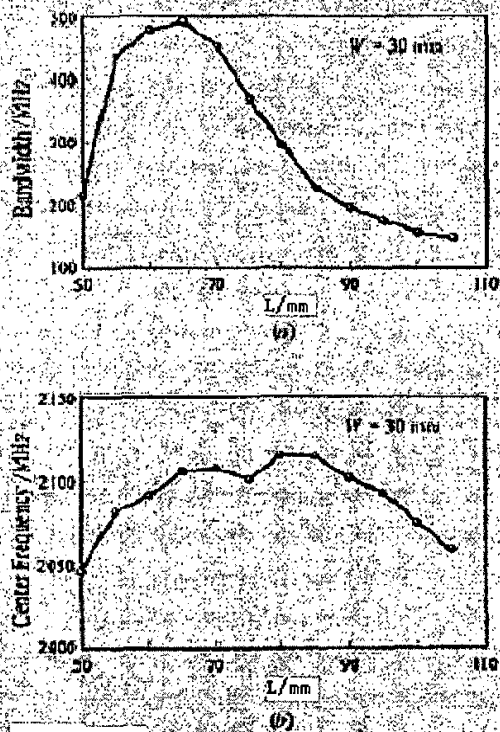


图 5-3 (a) 不同印刷线路长度的带宽变化图 (b) 不同印刷线路长度中心频率变化图

从图 5-3 (a) 观察发现, 印刷电路板的长度从 50mm 到 105mm, 阻抗在 150 到 490MHz 之间变化, 变化超过 300%。获得最佳阻抗值的印刷线路板长度为 $L=65\text{mm}$, 此长度大约为 UMTS 频段中心频率 2050MHz 对应波长的 45%。进一步观察发现, 当长度 L 在 51mm 到 83mm 变化时, 所获得带宽大约为 250MHz, 满足 UMTS 频段工作需求。图 5-3 (b) 所示, 长度的变化也引起中心频度从 2045 到 2115MHz 的约 70MHz 变化。

另外, 图 5-4 给出了当印刷线路板长度 L 固定为在图 5-3 研究得出的最佳值 $L=65\text{mm}$ 时, 印刷线路板宽度 W 和中心频率的变化关系。实验结果表明, 中心频率和带宽都随着印刷线路板的宽度减小, 变化趋势明显不同于中心频率和印刷线路板长度的关系。同时也发现, 当印刷线路板宽度小于 40mm 变化时, 如从 40mm 到 30mm, 中心频率会从 1945 变化到 2105MHz, 带宽会从 240MHz 拓展 490MHz。

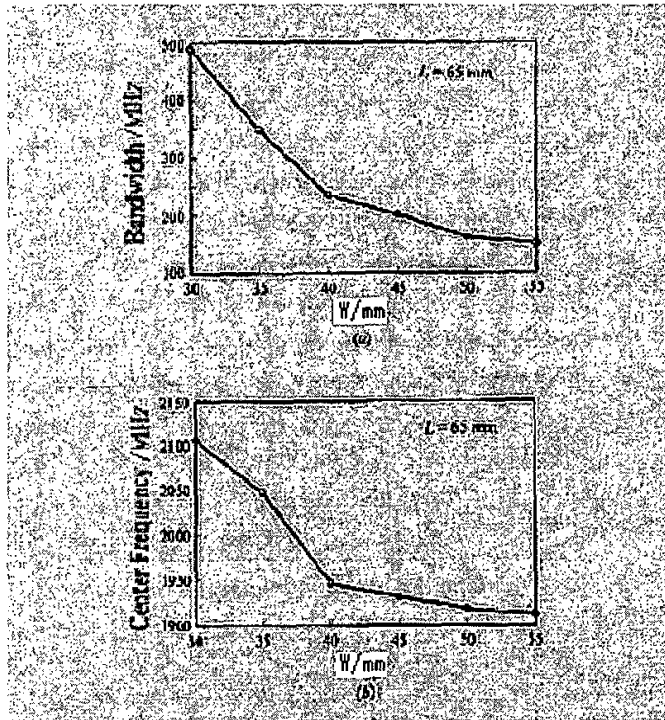


图 5-4 (a) 不同印刷线路宽度的阻抗变化图 (b) 不同印刷线路宽度中心频率变化图

第六章 手机天线开发与生产

对于手机的射频性能来讲，天线的性能极为重要。网络运营商也会测量手机的发射和接收性能。如果性能达不到标准，这样的手机根本就卖不出去，因为，他们在网上的表现太差。

性能差的天线还会影响功耗，缩短电池的使用寿命。效率较低的天线在基站上所产生的功率较低，闭环功率控制系统需要对它进行补偿。基站就会要求手机发射更大的功率。这就是说，在通话时，天线会影响手机的功耗。

手机的款式，用起来是否舒适和安全，也是很重要的。如果有得选择的话，用户会选择集成了内置天线的手机，因为，把这样的手机放在口袋里，会比使用外置天线的手机更舒适，而且，机壳的款式也可以设计得更吸引人。从机械方面讲，内置天线更结实、更可靠。然而，手机的一些新功能，比如，照相功能，会使手机在电气方面变得更加复杂，而且，在加入新功能之后，留给天线的空间就更少。所有手机设计师将要面对的难题是：如何迎合消费者的需要，把内置天线纳入时尚的手机中。

对手机设计师而言，把内置天线用到手机上，需要解决三个主要的问题：第一、天线所要放置的位置；第二、天线可以使用的空间；第三、如何安排在手机内的其它元器件，避免带来问题。

如果了解提高产品的集成度的难点所在，可能对设计会有所帮助。一般言之，有两种天线可供选择：平衡天线和不平衡天线。平衡天线是独立工作的，与周围的环境无关。而不平衡天线必须接地。不平衡天线产生电流流到地，而且，在总的辐射功率中，包括这些电流所产生的功率。汽车上经常使用的单极天线就是一个很好的例子，它的车身就是地。天线的性能也与它的尺寸大小有关。天线的尺寸是用波长来表示的。不平衡天线的地是有效尺寸的一部分，因此，实际的天线尺寸可以做得更小些。

移动电话的天线是不平衡天线的一个实例。它们的地是在手机里的金属结构，一般就是印刷电路板和它四周表面镀有金属材料的部件，这就是我们常说的印刷电路板总成。在手机里往往使用不平衡天线，这是因为它的尺寸比较小。对于低频带手机而言，例如 GSM900 手机和 CDMA800 手机，在用波长表示时，手机里能留给天线的空间狭小。于是，在这么狭小的空间里装一个高效率的平衡天线，

是不可能的，所以一定要用不平衡天线。

对于频率较高的手机来说，位置对天线的限制就少得多了。例如，GSM1800 的波长是 GSM900 的一半，因此，能给天线留出的空间也就更大些。在频带较宽的手机中可以使用平衡天线。最近，WCDMA 手机的内置天线和 GPS 的外置天线都用了平衡天线。这么做的好处是：天线不会产生大电流在手机上流过。这就是说，天线的设计和手机的设计，关系不那么大。

然而，问题是：大部分手机都必须能够同时用于高频带和低频带。这就是说，只要把高频天线结合到低频天线里，把他们都做成不平衡天线就可以了。

6.1 天线开发

6.1.1 天线种类

在移动电话中使用过许多种天线。大致上可以把它们分为两类。第一类天线，和单极天线非常相似。像螺旋形天线（normal-mode helices）、蜿蜒形（meanders）天线和拉杆天线这些外部天线就属于这种类型。近来，把这类天线放在手机的里面，但是，这样的天线不是太普遍。在它们下面有地线时，它们就不工作，因此，在它下面的那部分印刷电路板装了很多元件，就不能工作。

第二类天线，例如，倒置 F 型平面天线（PIFA），它装在地线上面。由于这种天线使用印刷电路板上面的空间，因而，这类天线用得最普遍。混合绝缘体天线就是把绝缘体天线和 PIFA 结合在一起，它和 PIFA 一样，装在接地面的上方时，能够工作。（图 6-1）

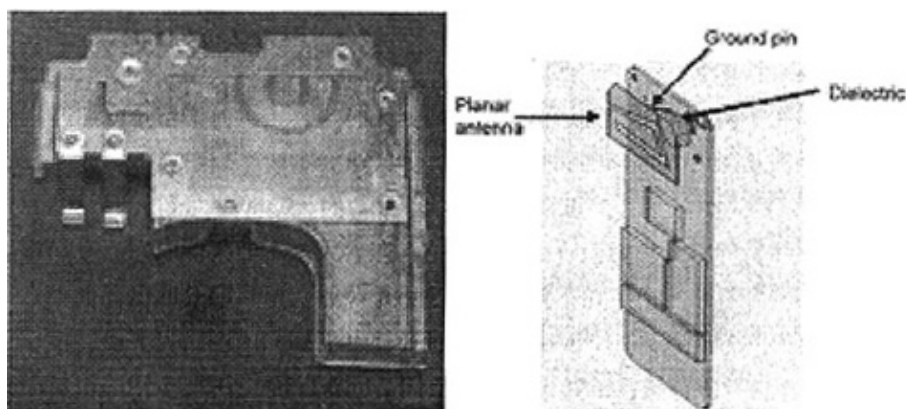


图 6-1 (a) PIFA 天线 (b) 天线位置示意图

6.1.2 天线的位置

电讯产业多年来在长条型手机上的经验告诉我们：最好还是把天线安装在手机的顶部。这么做的原因是：如果你的手把天线挡住时，你发会发现手机的性能会迅速下降，而如果天线装在手机的顶部，那它几乎就不会被挡住了。

如今，情况已经发生了变化，我们需要用新的思路去设计新手机的外型。通常情况下：现在只有两种类型的手机——长条型手机和翻盖型手机，或者折叠型手机。最近，又出现了新型的手机，比如，滑盖型手机和旋转型手机。旋转型手机的两个部分可以围绕着一个轴转动。所有这种由两个部分组成的手机使问题变得更复杂了：他们都必须打开和合上两种状态下工作，而这种问题不会出现在长条型手机上。从电气的角度讲，这两种状态是不一样的，这就是说，在这两种状态下，手机的性能都必须符合要求。

天线设计师一直非常关注天线周围的元器件。现在的手机都做很紧凑，因此，像电池和照相机部分常常紧挨着天线。相邻的元器件一般在很大程度上是决定产品性能的关键。对于不同的手机，它们的影响是不一样的，但是，都会严重地降低天线的性能。结果是，在开发过程的后期，设计师不得不对部分手机的零部件重新进行设计。

天线会在任何紧挨着天线的导体里感应电流。手机里的导体分为两种。第一种是印刷电路板总成，它包括了印刷电路板和它的屏蔽。这些互相连接的导体形成一个大导体，构成一个能改善天线性能的地。第二种导体由更小的分立元件组成，他们通过像导线和柔性印刷电路板这些连接件连接到印刷电路板上。应当避免在这些元件上产生激励电流，因为元件或者关联电路会有能量损失。由于在设计时，往往没有把这些元件或电路考虑进去，因此，能量损失通常都比较大。

6.1.3 连接方法

需要用许多导线的内部连接通常用柔性印刷线路板来完成的。例如，柔性印刷线路板往往用来连接照相机。当把 F 印刷线路板放到天线附近时，我们就要特别小心，因为柔性印刷线路板和天线二者之间的耦合，可能会影响天线的性能。但是，只要对柔性印刷线路板或是对天线做一个很小的改动，就能够解决这个问题。只要柔性印刷线路板的位置固定好，问题也许不大。但是，如果柔性印刷线路板没有固定好的话，那么，问题就会很严重。举一个例子，和一个可以自由旋转的照相机的连接时，如果其中的柔性印刷线路板可以弯成许多不同的形状，那

么, 评定其效果的任何实验都是不能重复的。在这种情况下, 要在柔性印刷线路板上面做点什么就非常困难。

只需要几根导线进行的连接, 就像连接到扬声器那样, 往往用很简单的方法进行连接, 例如, 在每个端点焊上弹性触点或金属线。通常情况下, 天线设计师更喜欢使用弹性触点。如果一个零件是用弹性触点来连接天线的话, 那么, 在每个手机里, 它形成的电路长度是一样的。如果使用金属线来连接天线的话, 那么, 在各个手机里, 它形成的电路长度可能就会有些不同。即使在制造时, 电路的长度都是一致的, 它可能和原型手机不一样。因此, 在第一部手机中, 频率为 1600MHz 时出现的问题, 在第二部手机中可能是在 1800MHz 时表现出来。如果有问题的手机使用 GSM1800 频带, 那么, 第一部手机是工作正常, 但是另一部手机却不能正常工作。

手机的电池会对天线的性能产生巨大的影响。电池会降低天线的谐振频率, 同时还会降低它的效率。因此, 最好的方法是:

- 电池应尽可能放在远离天线的位置 (建议最小距离为 5mm)。
- 使用 15pF 至 33pF 的并联电容器, 让电池和控制电路在射频时接地。
- 由于金属弹簧夹是造成天线损失的一个因素, 因此要使用塑料电池夹。

在大部分的手机中, 扬声器是安放在印刷电路板上, 与天线相对的另一边, 这不会带来任何实际的问题。然而, 在许多新的超薄型手机中, 为了节省原本由扬声器所占用的印刷电路板的面积, 把扬声器移到了天线那里。如果耦合到扬声器上, 天线的效率就会明显下降。在这种情况下, 最好是用一个非常短的弹簧片来连接扬声器, 避免使用活动的导线。由于扬声器紧挨着天线, 在设计的早期, 天线设计师就应该拿到扬声器的样品, 这点非常重要。如果无法避免使用活动的导线, 那么, 就应该在扬声器的两条连接导线中串联电感器作为保护。表面安装电感器一般会防止出现射频信号耦合。要给串联电感器留下焊盘, 如果不需要的话, 在最后设计印刷电路板时把它去掉。

射频屏蔽盒或者电磁干扰 (EMI) 涂层一般能够将手机的射频电路屏蔽起来。如果使用电磁干扰涂层, 就要确保它涂层在印刷电路板上形成一个封闭的空间。如果电磁干扰屏蔽盒有一边是开放的, 他们会产生空腔, 而且, 天线有可能会耦合进去。最后, 在设计原型机的过程中, 电磁干扰屏蔽涂层通常是用手涂上的。由于经手工涂上电磁干扰涂层的电话不是完全一样的, 因此, 不能用来对天线进行比较。

6.1.4 天线所占用的空间

手机天线所占用的空间大小是一个非常重要的参数。大家知道，天线的性能和它的体积大小有关。然而，天线周围的环境必须与之协调。若非如此，天线的空间大小也就无关紧要了，而天线的性能便取决于它周围引起损耗的机制。

关于天线需要占用的空间大小，很难给一个准确的意见。现在，还没有任何计算公式能够计算出这个空间的大小。大多数天线设计师依靠的是他们的经验。要做出一个正确的估计，需要了解以下几项：

- 天线必须覆盖的频段；
- 每个频段要求达到的性能；
- 手机的外形尺寸；
- 在安装天线的空间还有什么其它零部件；
- 印刷电路板总成的长度和宽度。

在缺少所有这些信息的情况下，我们可以做一个粗略的计算，虽然，这些数据通常并没有什么用处，但用户往往要求提供这些估算的数据。一个简便的办法是：如果天线要覆盖更多的频段，那么它就需要体积更大的空间。如果天线需要同时覆盖两个低频段，它的尺寸显然会比只覆盖一个频段的天线大得多。这是由于在低频时，用波长表示的体积，相对较小，而且，在这些频率下，存在的困难也更多。所以四频带天线实现起来会遇到更多的难题。虽然我们可以做出任何尺寸的天线，但是，天线的性能和效率会随着体积的减小而明显降低。

地线的尺寸大小会影响天线的性能。对于同样的天线，印刷电路板总成的尺寸会把它的频带宽度改变一倍。天线设计师必须知道地线的尺寸大小，由此，来估算天线的尺寸。一般来说，对天线而言，是为了在低频带时得到优良的性能，最适宜的长度是 130mm，而最适宜的宽度是 40mm 左右（图 6-2）。

就 PIFA 和混合绝缘体天线的外形尺寸而言，最重要的是它的厚度，而它的长和宽就比较不重要。大部分的手机使用的是 PIFA，但是，还有一小部分手机使用了倒置 F 型平面天线，在他们的下面没有地线。正因为他们更像是单极天线，所以无需遵守这个规则，但是其他的外形尺寸同样也是很重要的。

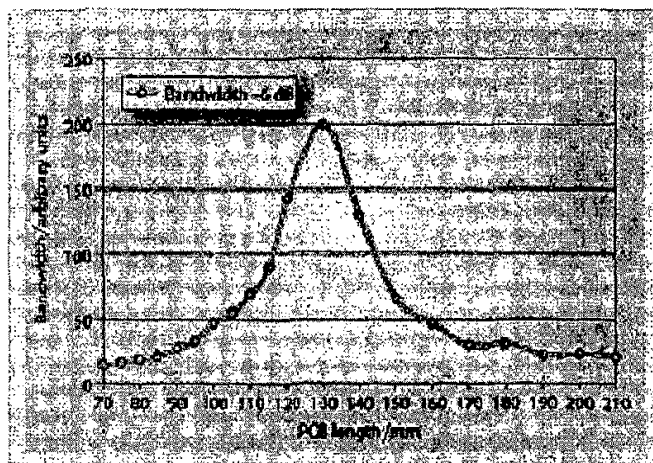


图 6-2 图中是混合绝缘体天线的带宽与印刷电路板长度的关系。

6.2 手机天线的生产

现在国际上有一种趋势是手机天线将作为手机整机的一个标准独立元件，也就是说以后可以将手机天线类似与一颗螺丝那样对同一类型的手机用标准的天线。为了做到实用化和商用化，手机天线的生产需要从整体上考虑其电性能和机械特性。本章简单介绍了手机天线的电性能规范和相关的生产过程。

6.2.1 手机天线电性能规范

表 6-1 小结了典型手机天线的电性能规范表，包括各频段发射和接受的频率范围，以及生产时定义的标准中心偏移量。图 6-3 给出了典型双频天线谐振频率 f_1 和 f_2 的定义。

表 6-1 典型手机电性能规范

参数	EGSM900	GSM1800
频率范围 / MHz	880-960	1710-1880
发射频率范围 / MHz	880-915	1710-1785
接收频率范围 / MHz	925-960	1805-1880
归一化阻抗 Ω	50	50
中心频率偏移量/ MHz	± 7	± 15

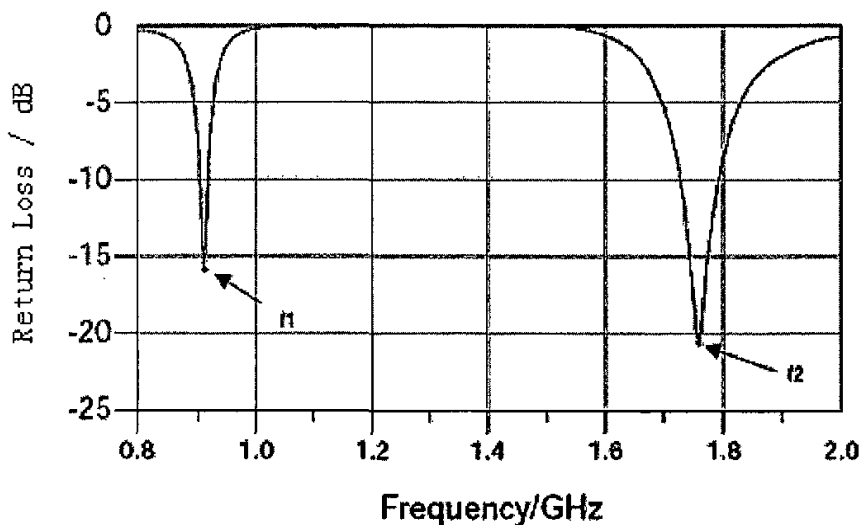


图 6-3 双频天线谐振频率 f_1 和 f_2 的定义

f_1 是低频段谐振频率的峰值； f_2 是高频段谐振频率的峰值。一般的，在低频段谐振频率 f_1 公差为 $\pm 7\text{MHz}$ ， f_2 的公差为 $\pm 15\text{MHz}$ 。另外双频天线谐振频率 f_1 和 f_2 对控制天线大规模生产的 Cpk 和 Ppk 有重要作用。

天线的辐射性能即平均效率是通过参考天线在测试平台比较得出的。对每一个频段测四个点，然后对四个点做平均得到一个频段平均效率。测量程序和测试平台将在下节中介绍。

对于额定功率，根据规范，手机中的天线应该能够承受至少 10 分钟 2W 的连续功率。在回损测量做完后，应该立即测试对应发射频段的功率。一般说来，手机天线测试不需要做介电常熟和损耗正切等材料参数测量，

6.2.2 电测试和手机验证程序

6.2.2.1 测试方案

从手机天线测试规范中可以看出，至少有两个测量是必须的。

1. 回波损耗的测量。因为整个手机某个附件的改变都会导致回波损耗的改变。
2. 平均效率的测量。一般说来，按照规范定义的平均效率基本反应了的天线的辐射性能。

两个测量都必须满足表 6-1 的规范值。

6.2.2.2 爬坡准备(Ramp-up)

在每个生产阶段前，必须测量至少 100 个天线的回波损耗值，而且生产的容量也在这个时候适当评估。并且也必须在每个过程完后测试天线的平均效率。

这个过程具体就是选择 30 个天线测量回波损耗值，然后从中选出 6 个特定的天线，这 6 个分别是 2 个谐振点最低的，2 个谐振点最高的，2 个靠近参考天线的。然后这 6 个天线做效率测试。

6.2.2.3 大规模生产

由于天线对手机厂商来看已经是作为一个标准器件来看，所以手机厂商不会单独去做天线的测量，因此天线的所有回波损耗测量都是在生产厂商的测试模具上进行。首先必须监测材料或者工具引起天线效率下降的平均效率，而且每个月必须测量 30 个天线的回损值。

6.2.3 生产能力

为了验证产线的生产能力，在第一期天线生产阶段，必须连续评估测试模具的 Cpk 和 Ppk 能力。当产线移动，维修或者材料，工具改变时，Cpk 和 Ppk 必须重新做。做 Cpk 的样品天线必须在 10 小时内均匀测完 100 个天线的回波损耗值。

6.2.4 参考手机，参考天线和测试夹具的定义

为了保证天线生产的质量，我们会预先定义一个“黄金手机”，然后在这个“黄金手机”焊上一根预先定义好的电缆方便测试。当需要手机更新的时候，这个“黄金手机”也相应更新。在爬坡生产阶段前，参考手机是用在天线效率和回波损耗测量中的，并且用来做测试夹具回波损耗的相关性检查。

黄金天线是一个名义上的天线，主要是利用测试夹具来寻找新的参考天线。显然，参考天线是黄金天线的一个副本。用来做测试夹具的效率测量和回波损耗测量。回波损耗测试夹具是用来测试大规模生产中天线的频率偏差。效率测试夹具是测试大规模生产中天线的效率对比参考天线的偏差。

6.2.5 回波损耗测量和回损测试夹具准备

在测量当中参考手机必须放在一个无源自由空间中，而且回波损耗测试必须

采用标准的矢量网络分析仪。为了保证测试的准确性，每开始一次测试行动，需保证仪器开机至少一个小时才开始进行校准和测量。一般测试设置是每隔 1MHz 测一个值。而回损测试夹具本生是个屏蔽的盒子，但是也需要外围不要有其它材料的干扰。

6.2.6 环境和质量要求

要保证生产的天线质量，要求射频参数的 Cpk 要大于 1.67, Ppk 也要大于 1.33。另外，为了满足环境要求，表 6.2 给出了一个环境测试的规范。

表 6.2 环境测试规范

Measurement	Requirement
Low temperature	-40°C
High temperature	+85°C
Humidity	95% RH @ +25°C for 12 h and 55°C for 12h, 6 cycles (= 6 days)
Temperature cycling	2h @ +85°C \Rightarrow 2h @ -40°C, 5 cycles
Random vibration	5-10 Hz; 10dB/octave 10-50 Hz; 5.58 m ² /s ³ (0.05588g ² /Hz) 50-300Hz; -10dB/octave duration 3x1h 3 axes
Drop test	120@0.5m and 80@1m
Drop test, repeated	300 random drops
Free Fall	1.5 m
Saltmist test	5% NaCl spray for 2h @ +35°C then 7 days in 95% RH @ +40°C, 2 cycles

第七章 结论

7.1 全文工作总结

近年来,移动通信市场和技术在全球已经取得高速发展,同时移动终端设备也逐渐趋于小型化。目前,为了满足手持终端小型化的要求,手机天线也必须做相应的缩微化设计。微带和印制板天线等平面天线由于有着天然的低剖面、小尺寸、易于加工和安装等特点,非常适合手机等终端设备的应用。2000 年以来,许多满足特定带宽、新颖的平面天线被应用在移动通信系统的终端中。本论文重点研究新颖的低剖面单极天线和平面倒 F 型天线设计和开发。

本论文以手机天线为研究对象。研究从仿真分析和实验测试两方面着手,提出了新的线倒 F 型天线和平面倒 F 型模型,同时,实验测试了这种新的天线。

本论文采用传统单极天线分析方法,给出了手机线单极天线的设计方法。

另外,使用仿真软件对印刷线路板尺寸与天线谐振频率、阻抗和带宽等特性进行了研究,得到阻抗的频率特性,由于天线工程实践中的应用。

本文也对手机天线设计时的对系统的要求做了综合性的分析。同时,辐射安全的规范也在这章中被阐述。

最后本文对商用手机天线的开发与生产做了总结性的陈述。提出天线产品的生产流程,给出了生产中重要的阶段。

7.2 对后期工作的思考

本文工作跨天线设计、计算机仿真技术和生产管理等多学科交叉的工程研究领域,是一个非常诱人的产业。通信技术和产业的发展,手机新产品的快速突出,这些必然会给下一代天线设计和生产带来新的问题,有待研究解决。本研究工作重点分析了线倒 F 型天线和 PIFA 天线,同时给出了一般的天线生产过程。虽然所做了基本的手机天线研究,但仍有很多工作可以展开,可从以下几方面着手:

1. 如果以后微小型手机出现,这就要求天线更加紧凑,传统 PIFA 天线和单极天线不适应这种发展,因此高介电常数的陶瓷天线可以成为新兴的研究方向等。
2. 目前的天线大多工作在双频或者三频,研究四频甚至宽带天线是以后工作

的重点。

3. 从数值分析方法来考虑，目前基于各种算法的仿真软件只能解决有限计算规模的模型，如何改进算法和改善建模接口对于仿真实际复杂手机模型有着重要的意义。

4. 由于天线的特殊结构，研究天线生产也是非常必要的。设计新的快速测试方法，部署高效的生产线，保证安全和质量对于天线生产有及其重要的意义。

致 谢

本论文是在导师王秉中教授的悉心指导下完成的。王老师知识渊博，对科学研究具有满腔热忱和创新精神，我很幸运能在这样一位治学严谨、平易近人的老师指导下从事科研工作。谁言寸草心，报得三春晖。感谢王老师对我的无微不至的关心和帮助，在此向老师致以深深的谢意。

在课题研究期间，杨雪松、邵维和肖绍球给了我很大的帮助，在此深表谢意。也感谢教研室的毕晔海、洪劲松、蒋家胜、孙树辉、邵晓婷、王建朋、吴炜霞、王晓华、杨雪松、张秋菊、张运传、张泳等同学给予的无私帮助。

最后，衷心感谢亲爱的父母、朋友，正是他们一直以来的关心、鼓励和全力支持，使我有勇气面对一切困难。

参 考 文 献

- [1] Jochen Schiller. Mobile Communications. London: Pearson Addison Wesley, 2003, 5-25
- [2] Juha Korhonen. Introduction to 3G Mobile Communications. New York: Artech House Publishers, 2003, 56-85
- [3] Wong K L. Planar Antennas for Wireless Communications. New York: John Wiley & Sons, 2003, 15-89
- [4] Taga T, Tsunekawa K. Performance analysis of a built-in planar inverted-F antenna for 800MHz hand portable radio units. IEEE J. Select. Areas Comm., 1987, Vol.5:921-929
- [5] Kraus J D. Antennas. New York :McGraw-Hill Book Co., 1988, 75-120
- [6] Katsibas K D, Balanis C A, Tirkas P A, Birtcher C R. Folded loop antenna for mobile hand-held units. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1998, Vol.46:260-266
- [7] Haapala P, Vainikainen P, Eratuuli P. Dual frequency helical antennas for handsets. Proc. 1996 IEEE Vehicular Technol. Conf., 1996, 336-338.
- [8] Ying Z. Multi-band non-uniform helical antennas. U.S. Patent, No. 6112102, 2000-8-29
- [9] Haapala P. Antenna operating in two frequency ranges. U.S. Patent, No.6054996, 1998-4-25
- [10] Maldonado D. Dual band antenna. U.S. Patent, No. 5812097, 1998-9-22
- [11] Lee E, Hall P S, Gardner P. Dual band folded monopole/loop antenna for terrestrial communication system. Eletron. Lett., 2000, Vol.36:1990-1991
- [12] Teng P L, Wong K L. Planar monopole folded into a compact structure for very low- profile multi-band mobile phone antenna. Microwave Opt. Technol. Lett., 2002, Vol.33:22-25
- [13] Rutkowski K, Hayes G J. Multiple frequency band branch antennas for wireless communications. U.S. Patent, No. 6198442, 2001-3-6
- [14] Wong K L, Su S W, Chiou T W, Lin Y C. Dual-band plastic chip antenna for GSM/DCS mobile phones. Microwave Opt. Technol. Lett., 2002, Vol.33:330-332
- [15] Liu Z D, Hall P S, Wake D. Dual-frequency planar inverted F antenna. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1997, Vol.45:1451-1458
- [16] Rowell C R, Murch R D. A compact PIFA suitable for dual-frequency 900/1800 MHz operation. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1998, Vol.45: 596-598
- [17] Ollikainen J, Lehmus O, Fischer M, Vainikainen P. Intenal dual-band patch antenna for mobile phones. Proc. Millennium Conf. on Antennas Propagat., Davos, 364

- [18] Tarvas S, Lsohatala A. An internal dual-band mobile phone antenna. 2000 IEEE Antenna Propagat. Soc. Int. Symp. Dig., 266-269
- [19] Viratelle D, Langley R J. Dual-band printed antenna for mobile telephone applications. IEE Proc. Microwave Antennas Propagat., 2000, Vol.147: 381-384
- [20] Salonen P, Keskilamm M, Kivikoski M, New slot configurations for dual-band planar inverted-F antenna. Microwave Opt. Technol. Lett., 2001, Vol.28: 293-298
- [21] Manteuffel D, Bahr A, Heberling D, Wolff L. Design considerations for intergrated mobile phone antennas. Porc. 2001 Int. Conf. on Antennas Propagat., 252-254.
- [22] Lui, Murch R. D. Compact dual-frequency PIFA designs using LC resonators. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2001, Vol.49: 1016-1019
- [23] Hsiao E R, Chen H T, Lee G Y, Chiou T W, Wong K L. A dula-band planar inverted-F patch antenna with a brach-line slit. Microwave Opt. Technol. Lett., 2002, Vol.32:310-312
- [24] Yeh S H, Wong K L. Compact dual-frquency PIFA with a chip-inductor-loaded rectangular spiral strip. Microwave Opt. Technol. Lett., 2002, Vol.33:394-397
- [25] Korisch L A. Planar dual frequency band antenna. U.S. Patent, No. 5926139, 1999-7-20
- [26] Geerert F. Dual band antenna for a hand portable telephone and a corresponding hand portable telephone. European Patent, No. 1018777, 1999-12-10
- [27] Pankinaho L. Double resonance antenna structure for several frequency ranges. U.S. Patent, No. 6140966, 2000-10-31
- [28] Ying Z. Printed twin spiral dual band antenna. U.S. Patent, No. 6166694, 2000-11-26
- [29] Chiba N, Amano T, Iwasaki H. Multi-frequency inverted F-type antenna. U.S. Patent, No.6195048, 2001-1-27
- [30] Tarvas S, Mikkola J, Kivela S, Isohatala A. Planar dual-frequency antenna and radio apparatus employing a planar antenna. U.S. Patent, No. 6252552,, 2000-6-26
- [31] Song C.T, Hall P S, Ghafouri-Shiraz H, Wake D. Triple band planar inverted F antennas for handheld devices. Electron. Lett., 2000, Vol.36:112-114
- [32] Dou W P, Chia Y W. Novel meandered planar inverted-F antenna for triple frequency operation. Microwave Opt. Technol. Lett., 2000, Vol.27:58-60
- [33] Hsiao F R, Wong K L. Comapct planar inverted-F patch antenna for triple frequency operation. Microwave Opt. Technol. Lett., 2002, Vol.33:459-462
- [34] Martinez-Vazquez M, Geissler M, Heberling D. Volume considerations in the deisgn of dual-band handset antennas. 2001 IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.Dig., 2001:112-115.

- [35] Wu T Y, Wong K L. On the impedance bandwidth o a planar inverted-F antenna for mobile handsets. *Microwave Opt. Technol.Lett.*, 2002, Vol.32: 249-251
- [36] Taga T. Analysis of planar inverted F antennas and antenna design for portable radio equipment. *Electronics Letters*, 2001, Vol.21:121-124
- [37] Grant Andrew Ellis. Active Planar Inverted-F Antennas for Wireless Applications. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2003, Vol.51:598-612
- [38] Liw S I, Ellis G A. Active planar inverted-F antenna for wireless applications. *Proc. URSI Int. Electromagnetics Symp.*, 2001, 22(1):56-59
- [39] Kin-Lu Wong, An-Chia Chen, Yen-Liang Kuo. Diversity metal-plate Planar Inverted-F antenna for WLAN operation. *Electronics Letters*, 2003, Vol.39:1121-1124
- [40] Chu H S, Dubard J L, Staraj R. Integrating microgenetic algorithms with TLM method for dual-band planar inverted-F antenna design. *Electronics Letters*, 2003, Vol.39:1324-1327
- [41] Shih-Huang Yeh, Kin-Lu Wong, Tzung-Wern Chiou, Shyh-Tirng Fang. Dual-Band Planar Inverted F Antenna for GSM/DCS Mobile Phones. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2003, Vol. 51:569-575
- [42] Salonen P, Keskilammi M, Kivikoski M. New slot configurations for dual-band planar inverted-F antenna. *Microwave Opt. Technol.Lett.*, 2003, Vol.28:293-298
- [43] Liu Z D, Hall P S, Wake D. Dual-frequency planar inverted-F antenna. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1997, Vol.45: 1451-1458
- [44] Rowell C R, Murch R D. A compact PIFA suitable for dual frequency 900/1800-MHz operation. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1998, Vol.46: pp. 596-598
- [45] Soras C, Karaboikis M, Tsachtsiris G, Makios V. Analysis and Design of an Inverted-F Antenna Printed on PCMCIA Card for the 2.4GHz ISM Band. *IEEE Antenna's and Propagation Magazine*, 2002, Vol.44:255-267

作者攻硕期间取得的成果

- [1] Lin Wang, Bing-zhong Wang. A Tri-band PIFA Antenna for Mobile Handset Application. 2006 China-Japan Joint Conference on Microwaves. Accepted

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)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 门视频培训课程和 1 本图书教材, 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 软件设计进行天线设计...

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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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)，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>