

# RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications



# 无线应用 射频微波电路 设计

[美] Ulrich L. Rohde 著  
David P. Newkirk

刘光祜 张玉兴 译

Actual Fundamental  
(One Tone)

$IM_3$

$IM_7$



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

应用电子教育系列

# 无线应用射频微波电路设计

RF/Microwave Circuit Design  
for Wireless Applications

[美] Ulrich L. Rohde 著  
David P. Newkirk

刘光祜 张玉兴 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

全书共6章。在第1章概述了调制类型及无线收发系统之后,第2章用大量篇幅深入讨论二极管、BJT和各类FET的模型及参数提取。第3章中微波放大器设计是本书的重点之一,涉及噪声、宽带匹配、高功率、线性化等放大器的诸多知识点和设计方法。第4章对无源和有源混频器进行详细分析。第5章阐述射频振荡器原理,深入分析相位噪声和高 $Q$ 振荡电路,示范大量成熟的电路是本章的一个特点。关于射频频率综合的最后一章重点阐述了整数 $N$ 分频PLL频率合成,对分数 $N$ 分频PLL方法及DDS也有一定深度的陈述。

本书适合从事射频微波电路设计的工程师、研究人员及高校相关专业的师生阅读。

Copyright ©2000 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文专有翻译出版版权由 John Wiley & Sons Inc. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-3685

### 图书在版编目(CIP)数据

无线应用射频微波电路设计/(美)罗德(Rohde, U. L.), (美)尼科(Newkirk, D. P.)著;刘光祜, 张玉兴译.  
—北京:电子工业出版社, 2004.8

(应用电子教育系列)

书名原文: RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications

ISBN 7-121-00153-5

I. 无… II. ①罗…②尼…③刘…④张… III. 无线电通信—射频电路: 微波电路—电路设计 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第073033号

责任编辑: 邓小瑜(dxym@phei.com.cn)

印 刷: 北京东光印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 48.75 字数: 1248千字

印 次: 2004年8月第1次印刷

印 数: 5000册 定价: 78.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 代 序

张玉兴和刘光祜教授是电子科技大学成都赛英科技有限公司的正、副总工程师。30年来,他们一直在电子科技大学从事射频/微波电路与系统领域的教学和科研工作,并有2~3年作为高级访问学者在美国的科研经历。

Rohde博士在相关网站和IEEE MTT-S上的很多文章使两位教授“认识”了这位研究领域与他们非常相近的国际知名专家。Ulrich L. Rohde于1978年在德国Darmstadt大学获得电气工程博士,1979年获无线通信理论博士。基于他在微波CAD、振荡理论和频率综合等方面的研究成果,被几所大学聘为客座教授。Rohde博士现为新泽西州帕特森市Synergy微波有限公司主席和Communications Consulting公司总裁。

2002年夏天,友邻公司因购买了Ansoft软件,Rohde博士的这本著作成为随软件的赠品。两位教授有幸得到Rohde博士的原版著作,该书将微波电路设计的理论与硬件实现完美结合,使他们印象深刻,遂决定翻译此书。Rohde博士的六本著作中最新的两本之一“Communications Receivers: DSP, Software Radio, and Design (3rd edition)”已经由王文桂、肖晓劲翻译,人民邮电出版社于2003年出版。另一本著作“RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications”正是刘、张两位教授的这本译著。可以说两本书相辅相成,互为姐妹篇。因此,相信《无线应用射频微波电路设计》一书将成为中国广大从事射频微波电路设计的工程师2004年收到的一份厚礼。

成都赛英科技有限公司是由电子科技大学教授、电子工程高级工程师和具有丰富营销管理经验的人员共同组建的民营有限责任公司,位于电子科技大学(成都)校园内。公司主要研制生产微波频率源、微波选频组件、微波滤波器、低噪声放大器、功率放大器、接收机前端等射频微波通信产品。本书的两位译者是公司的技术领导。公司有电子科技大学各类电子专家作为技术后盾,并有数十名硕士、博士研究生常年在公司从事项目研究开发。公司始终密切关注国内外电子领域的IC器件和各类电子产品的最新动态,使自己的产品保持在国际先进、国内领先的水平。公司成立3年来取得了令人瞩目的成绩。2001年公司被认定为国家级高新技术企业,同年“通用(宽带)接收机射频前端”项目获得科技部中小型企业创新基金;2002年完成ISO9001—2000版和GJB/9001A—2001版质量管理体系的认证。公司被成都市政府授予“先进科技企业”和“纳税大户”,被四川省政府授予“人才开发先进单位”。

值此Rohde博士这本著作的中译本出版之际,我代表赛英科技全体员工向全国电子科技领域的同仁问好!我们愿与全国广大电路工作者携手,用自己的辛勤劳动共创祖国电子科技事业的美好明天!

电子科技大学  
成都赛英科技有限公司  
总经理:郭刚  
2004年1月于成都

## 原 著 序

对于生活在这个时代的人来说，能够见证，甚至参与对社会和人们生活产生深远影响的重要科技变革是一件令人激动的事情。可以这样说，个人无线通信的出现是其中最伟大的一种。随之而来的便是多种多样的蜂窝电话及个人通信系统技术的开发成功，这包括 GSM、CDMA、无线数据、信息的传输系统，以及这些技术和系统的日益国际化。个人无线通信技术的兴起对人们生活有着极为重大的意义，它不仅使人们易于生活、工作上的交流，而且能够拯救生命，阻击犯罪。今天，某些从前连老式电话都没有使用过的人们，已经可以用最先进的卫星和数字移动通信技术进行远程通信。无线通信技术的发展包括新频率的使用，使通信协议和频率标准化，从而使个人无线通信更好地成为全球通信网络的一部分，进而产生许多新的无线应用。无线网络加之无线全球定位技术的发展，使我们可以更加准确快速地把援助送到需要的地方，以拯救更多宝贵的生命。

射频微波电路设计对无线通信的发展和成功起到关键的作用。通过一些极具才华的 RF 设计工程师的努力，使世界上很多地区已经能够大规模生产通信产品。这些工程师，有些情况是他们各自单独工作，更多的时间则是合作。通过过去几年时间里的诸多进步，使 RF 与微波电路开始渐渐揭开其神秘的面纱，RF 技术由原来被称为“黑色艺术”发展成为一门真正的科学学科。在此期间，Ulrich L. Rohde 博士一直是这个领域的技术领头人。

在《无线应用射频微波电路设计》这本书中，Rohde 博士帮助我们了解 RF 理论及其在实际 RF 电路中的应用。本书还将介绍半导体技术，使读者对其作出正确的选择和使用。另外，本书还讨论了无线通信应用的各种 RF 电路模块，包括放大器、混频器、振荡器、频率合成器，以及它们如何共同工作而达到在较差的噪声及发射信号环境中提取和放大信号的目的。在难度颇大的电路与系统设计中，Rohde 博士独特的 VCO 和 PLL 设计的专门知识是极具价值的。

很荣幸能为本书写序。Rohde 博士为 Motorola 工程师所做的客座演讲使他们受益匪浅，从中得到了一些方法及建议。这些极具价值的见解是无法衡量的，以至于我们不知道如何表达对 Rohde 博士的谢意。我们相信，Rohde 博士对大规模 RF “群体”的影响将会更为重要，本书也将使他的专业知识广为传播。

Eric Maass  
无线收发装置部总监  
摩托罗拉 SPS

## 前 言

当我在两年前开始写一本关于无线电技术，特别是涉及电路设计方面的著作的时候，当时认为这项技术的日新月异已经到了一个稳定的阶段。但令我吃惊的是，事实绝非如此，于是我必须不断地适应新的发展，使自己不会被时代抛下。这种对形势的追赶简直需要“协和飞机的高速发动机”的动力。



这项所谓“古老的”技术，其发展速度并没有被任何的商业机遇促使而突飞猛进。这一点告诉我们，为了应付今天的需要，仍然有很多设计技术需要被了解或改进。因为电路设计要求大量的计算工作，故本书大量运用了最先进的 CAD 工具。这里，要十分感谢惠普公司为我们提供的包含匹配综合法和宽带 CDMA 库的“高级设计系统”(ADS) 软件。遗憾的是，对软件的某些应用细节的推敲需要时间，这与一再推迟的本书的出版时间仍有冲突。因此在这里我们只能给出它们的功能作为参考，而没有实际演示。这些软件的使用，包括 Eagleware 公司提供的软件，只能在本书的新版本中出现了。为了保持本书形式上的一贯性，我们决定仍采用 Ansoft 公司的工具。为确保所有电路正确无误，我们在器件的建模方面花费了大量时间，以确保设计的电路能正常工作。然而，在很多的出版物上常常会有不完整或是不能工作的电路。

当然商业期刊也有积极的一面，它们能使我们了解现代化的设计。一些主要的出版物如下：

*Applied Microwave & Wireless*

*Electronic Design*

*Electronic Engineering Europe*

*Microwave Journal*

*Microwave & RF*

*Microwave Product Digest (MPD)*

*RF Design*

*Wireless System Design*

此外，我们还能从书上或 CD 中得到一些内容不错的会议资料，诸如：

GaAs IC 论坛（年会，由 IEEE-EDS，IEEE-MTT 发起）

IEEE 国际固态电路会议（年会）

IEEE MTT-S 国际微波论坛（年会）

当然，除此之外，在以上提到的商业期刊中也会提到其他一些有价值的会议刊物，而且一些会议和专题研究小组有着密切的联系。比如最近的“无线 RF 接收机设计”会议就与 IEEE MTT-S 有关。另外，课程培训也是很有用的途径，比如 Besser 协会的 4 天短期“射频微波设计入门”培训就是其中之一。无线设计可以分为数字部分和模拟部分。前者涉及各种性能不同的数字调制与解调。本书只讨论模拟设计。

在模拟部分存在 3 种相互竞争的技术，因而使之变得十分复杂。例如：手持或电池供电的设备，就需要考虑成本、体积及功耗这 3 个要素。CMOS 一直是无绳电话的最佳选择，因为它要求的信噪比指标较蜂窝电话低。CMOS 比双极型和砷化镓技术有更大的噪声，于是在 VHF/SHF 频率从输入级到输出级会出现问题。SiGe 晶体管与 GaAs 技术间有很激烈的竞争。大多数前置分频器是双极型的，而大多数基站功放都是用 GaAs FET 或 LD MOS 制成的。最具竞争力的技术是 SiGe 晶体管技术和 GaAs 技术。在上述 3 种竞争技术中，GaAs 的成本最高。在 SiGe 领域，IBM 和 Maxim 看来是傲视群雄，保持领先水平的制造商。

另外一个较重要的问题是手持或电池供电的设备与基站间的区别。大部分从事“电池供电”电路的设计者都无一例外地依赖于集成电路，而集成电路每 6~9 个月就会有新的设计产品出现。现在假设给出多种选择，我们仍然没有一个系统的方法来选择最合适的 IC 品种和 IC 器件。因此我们决定给出设计者一些选择 IC 时的准则，特别是在高性能设备设计时需要的准则。说到高性能的设备，低功耗并不是很大的问题，而不同形式的动态范围显得更为重要。大多数的这类电路都是被设计成若干分散部分的组合。任何人若要有个合适的天线，把它指向纽约并与一台频谱分析仪连接，他马上就会理解：包括无绳和蜂窝在内的电话、大功率传呼和其他通信设备的信号谱，以及它们的相互作用的频谱，这些会将频谱分析仪“淹没”。IC 应用于手持机及其他设备被证实不错。它们的三阶截断点优于 -10 dBm，但一个真正内行的人知道，要设计一个固定站，该指标至少不能小于 +10 dBm。这一概念不仅适用于放大器，而且适用于混频器与振荡器。因此，我们决定就该动态范围给出一些实例。在第 1 章中，现代 IC 的简述就是要告诉读者一些典型的性能和实际的需要。大的半导体器件公司既生产芯片，又生产手机或基站所需的分离设备，这样做很实用。我们坚信，本书选择的电路对各种应用都是非常有用的。

第 1 章介绍数字调制及其性能评估，这是无线通信的基础。我们决定把付诸实施的讨论留给更多的有实力的公司。因为现在调制的标准仍不固定，所以不能进行全方位的介绍。本章还包括各种源于教程的一些有价值的资料，它们来源于包括我们德国公司，即位于慕尼黑的 Rohde & Schwarz 公司，特别是它的辅导资料：“1998 年销售工程入门培训”光盘中的数字调制部分。注：本书中，我很少使用一个图例或是一次以上的方程，所以读者不必为了理解一个问题而回顾以前的章节。

第 2 章是对各种半导体技术的全面介绍。通过这些介绍，可以帮助设计者做出一个较科学的决定。相关的资料如 PIN 二极管也包括在内。在很多的应用中，晶体管往往用于性能受限的状态，比如既要低电压又要低电流的工作性能。对特征频率的依赖，噪声系数及大信号特性，这些都需要评估。除了二极管用做可变电容或调谐电容外，另一个主要应用就是用做

开关。为了使读者更好地理解不同半导体器件的参数含义，本书提供了各种数据表及少量应用实例，用来说明对某个特定的应用而言，如何选择最好的技术。对于线性应用而言，噪声系数是极为重要的；而在非线性应用中，则需要知道失真产物。因此，这一章不仅介绍半导体的线性特性，还有它们的非线性性能，甚至包括了参数提取的细节。设想一下，如果我们给了设计者若干的选择，但都没有完整的来自制造商的数据，那将是多么严重的问题。

第 3 章是本书最长的章节。这一部分对分离和集成放大器进行了详细的分析和介绍，使读者对半导体特性和使器件发挥最佳作用所需的电路有深入的了解。我们研究放大器性能，增益稳定性、匹配，以及评估内部直接耦合和带反馈的一、二、三级放大器，这些都是集成电路中的常见结构。在进行这些研究的同时，我们提供目前市场上最流行的 IC 例子，当然大家也知道，每 6 个月或更长一些时间，便有更成熟的新器件出现。本章的另一个重要问题是数字信号处理中的偏置点选择和匹配问题，我们可以使读者对诸如当放大器在特定模式工作时因失真所引起的邻近信道功率比这样的复杂问题有较深入的了解。在对这些放大器进行级联的时候，阻抗匹配是一个重要的问题。本章介绍一些有用的高频应用的耦合器和宽带匹配电路，另外还介绍用调谐二极管构成的跟踪滤波器作为高频预选器。本章接着讨论了差动放大器、倍频器、AGC、偏置和推挽/并联放大器，随后是关于功放的较深入的剖析，其中包括一些实例和稳定性分析的研究。本章最后是功放品种选择数据和推荐的制造商一览表。

第 4 章是关于适用于射频领域的混频器的详细分析。本章给出混频器设计及计算插入损耗和噪声系数的不同的数学方法。读者可以对有源和无源混频器、加法和乘法混频器的区别有深入的了解，并得到其他一些有用的启示。另外，我们还增加了一些来自 Motorola, Siemens 公司的非常巧妙的电路，它们和 IC 一样非常有效。

因为许多放大器都会出现振荡，所以关于振荡器的第 5 章就是一个合理的延续。本章在简要说明为什么需要压控振荡器（VCOs）之后，接着讨论包括微波振荡器和十分重要的基于陶瓷谐振器的振荡器在内的基本振荡条件和不同结构振荡器的相位噪声。本章将使读者了解产生各种噪声的因素，分离元件与集成振荡器的性能区别及性能特点。当然，本章也将给出大量最新的电路。

第 6 章涉及的是频率合成器，它主要依靠第 5 章所讲的振荡器及不同的系统结构来获得最佳的性能。合成器的所有组成部分，包括环路滤波器、鉴频鉴相器，以及它们实际的功能都会阐述。本章还提到商用合成器芯片的进一步应用，另外，分数  $N$  分频频率合成器和直接数字频率合成器的基本原理也被包含在这一章内。分数  $N$  分频频率合成器可能是最令人感兴趣的合成器之一。本章最后还附加了专利方面的信息，供创新设计者使用。

本书最后是两个附录。附录 A 是高频模型提取途径及 HBT 的集成参数提取途径的讨论。一个十分有效的噪声模型被开发出来，这样便大大改进了描述器件性能的准确性。

附录 B 是一个关于电路性能的 CAD 应用，特别介绍关于如何进行负载牵引的仿真。

需要重申的一点是，虽然每过几个月，更成熟的新的 IC 器件出现，一些功耗参数和应用也自然会在本书讨论的系统中发生变化，但任何新的设计所遵守的基本原理是不会改变的。

最后我们要感谢众多来自 Ansoft, Alpha Industries, Motorola, Natinal Semiconductor, Philips, Rohde & Schwarz 和 Siemens Semiconductor（现为 Infineon Techonologies）的工程师，感谢他们提供的最新信息，并让我们使用了他们拥有的一些有价值的资料。

谈到许可权的问题，National Semiconductor 公司特别要求我们在本书中进行如下申明：

生命维持政策！

未经 National Semiconductor 公司总裁的书面同意，本公司的任何产品不得授权作为生命维持设备或系统的关键元件使用。

被使用方面如下：

① 生命维持设备或系统是用于外科植入或直接维持生命的设备或系统，在按标签所说的方法正确使用时，一旦它出现不能正常工作的情况将会给使用者带来巨大的伤害。

② 对任何生命维持设备或系统而言，一旦关键元器件出现问题，将很可能导致整个设备或系统失效，以致影响到它的安全性和有效性。

最后还要感谢 John Wiley, Sons, 特别是 George Telecki, 由于这项工作的繁杂造成了几次出版延期，他们都表示谅解。

Ulrich L. Rohde

# 目 录

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| 第 1 章 无线电路设计基础 .....                    | (1)   |
| 1-1 概述 .....                            | (1)   |
| 1-2 系统功能 .....                          | (2)   |
| 1-3 无线信道和调制要求 .....                     | (4)   |
| 1-3-1 引言 .....                          | (4)   |
| 1-3-2 信道冲激响应 .....                      | (6)   |
| 1-3-3 多普勒效应 .....                       | (9)   |
| 1-3-4 传递函数 .....                        | (11)  |
| 1-3-5 信道冲激响应的时延响应和传输函数 .....            | (11)  |
| 1-3-6 研究总结 .....                        | (12)  |
| 1-3-7 无线信号举例: GSM 中的 TDMA 系统 .....      | (14)  |
| 1-4 关于比特、符号和波形 .....                    | (23)  |
| 1-4-1 引言 .....                          | (23)  |
| 1-4-2 数字调制技术基础 .....                    | (30)  |
| 1-5 无线系统分析 .....                        | (38)  |
| 1-5-1 模拟与数字接收机设计 .....                  | (38)  |
| 1-5-2 发射机 .....                         | (46)  |
| 1-6 框图组成 .....                          | (63)  |
| 1-7 系统性能及其与电路设计的关系 .....                | (67)  |
| 1-7-1 系统噪声和噪声基底 .....                   | (67)  |
| 1-7-2 系统幅度和相位特性 .....                   | (71)  |
| 1-8 测试 .....                            | (93)  |
| 1-8-1 引言 .....                          | (93)  |
| 1-8-2 发射和接收质量 .....                     | (93)  |
| 1-8-3 基站仿真 .....                        | (96)  |
| 1-8-4 GSM .....                         | (96)  |
| 1-8-5 DECT .....                        | (97)  |
| 1-9 $C/N$ 或 $SNR$ 到 $E_b/N_0$ 的变换 ..... | (97)  |
| 第 2 章 有源器件模型 .....                      | (102) |
| 2-1 二极管 .....                           | (102) |
| 2-1-1 大信号二极管模型 .....                    | (103) |
| 2-1-2 混频器和检波二极管 .....                   | (105) |
| 2-1-3 PIN 二极管 .....                     | (113) |
| 2-1-4 调谐二极管 .....                       | (127) |
| 2-2 双极型晶体管 .....                        | (161) |
| 2-2-1 晶体管的结构类型 .....                    | (161) |

|       |                              |       |
|-------|------------------------------|-------|
| 2-2-2 | 双极型晶体管的大信号性能 .....           | (162) |
| 2-2-3 | 正向有源区的大信号晶体管 .....           | (179) |
| 2-2-4 | 集电极电压对晶体管正向有源区大信号性能的影响 ..... | (184) |
| 2-2-5 | 饱和区及反向有源区 .....              | (185) |
| 2-2-6 | 双极型晶体管的小信号模型 .....           | (189) |
| 2-3   | 场效应晶体管 .....                 | (194) |
| 2-3-1 | JFET 的大信号性能 .....            | (202) |
| 2-3-2 | JFET 的小信号性能 .....            | (207) |
| 2-3-3 | MOSFET 的大信号行为 .....          | (210) |
| 2-3-4 | MOS 管饱和区的小信号模型 .....         | (216) |
| 2-3-5 | FET 的短沟道效应 .....             | (218) |
| 2-3-6 | MOSFET 的小信号模型 .....          | (223) |
| 2-3-7 | GaAs MESFET .....            | (251) |
| 2-3-8 | 小信号 GaAs MESFET 模型 .....     | (258) |
| 2-4   | 有源器件参数的提取 .....              | (270) |
| 2-4-1 | 引言 .....                     | (270) |
| 2-4-2 | 典型的 SPICE 参数 .....           | (270) |
| 2-4-3 | 噪声建模 .....                   | (271) |
| 2-4-4 | 缩尺器件模型 .....                 | (278) |
| 2-4-5 | 结论 .....                     | (294) |
| 2-4-6 | 器件库 .....                    | (295) |
| 2-4-7 | 在低电压和近夹断电压情况下的一种新的仿真方法 ..... | (295) |
| 2-4-8 | 实例: 改进 BR193W 模型 .....       | (304) |
| 第 3 章 | 基于 BJT 与 FET 的放大器设计 .....    | (308) |
| 3-1   | 放大器的特性 .....                 | (308) |
| 3-1-1 | 引言 .....                     | (308) |
| 3-1-2 | 增益 .....                     | (312) |
| 3-1-3 | 噪声系数 (NF) .....              | (316) |
| 3-1-4 | 线性特性 .....                   | (338) |
| 3-1-5 | 自动增益控制 (AGC) .....           | (350) |
| 3-1-6 | 偏置和电源电压与电流 (功耗) .....        | (357) |
| 3-2   | 放大器的增益、稳定性和匹配 .....          | (359) |
| 3-2-1 | $S$ 参数关系 .....               | (361) |
| 3-2-2 | 低噪声放大器 .....                 | (364) |
| 3-2-3 | 高增益放大器 .....                 | (379) |
| 3-2-4 | 低电压集电极开路设计 .....             | (388) |
| 3-2-5 | 灵活匹配电路 .....                 | (393) |
| 3-3   | 单级反馈放大器 .....                | (396) |
| 3-3-1 | 无损耗或无噪反馈 .....               | (400) |
| 3-3-2 | 宽带匹配 .....                   | (400) |

|              |                                             |              |
|--------------|---------------------------------------------|--------------|
| 3-4          | 两级放大器 .....                                 | (401)        |
| 3-5          | 三级或多级放大器 .....                              | (409)        |
| 3-5-1        | 多级放大器的稳定性 .....                             | (414)        |
| 3-6          | 一种压控调谐滤波器新方法及其 CAD 确认 .....                 | (414)        |
| 3-6-1        | 二极管性能 .....                                 | (414)        |
| 3-6-2        | VHF 例子 .....                                | (417)        |
| 3-6-3        | HF/VHF 压控滤波器 .....                          | (419)        |
| 3-6-4        | 改善 VHF 滤波器 .....                            | (421)        |
| 3-6-5        | 总结 .....                                    | (422)        |
| 3-7          | 差动放大器 .....                                 | (423)        |
| 3-8          | 二倍频器 .....                                  | (426)        |
| 3-9          | 有自动增益控制 (AGC) 的多级放大器 .....                  | (430)        |
| 3-10         | 偏置 .....                                    | (432)        |
| 3-10-1       | RF 偏置 .....                                 | (439)        |
| 3-10-2       | 直流偏置 .....                                  | (439)        |
| 3-10-3       | 集成放大器的直流偏置电路 .....                          | (443)        |
| 3-11         | 推挽/并联放大器 .....                              | (444)        |
| 3-12         | 功率放大器 .....                                 | (445)        |
| 3-12-1       | 实例 1: 输出为 7 W 的 1.6 GHz C 类 BJT 功率放大器 ..... | (446)        |
| 3-12-2       | 用于射频功率晶体管的阻抗匹配网络 .....                      | (457)        |
| 3-12-3       | 实例 2: 低噪声分布参数放大器 .....                      | (474)        |
| 3-12-4       | 实例 3: 用 CLY15 的 1 W 放大器 .....               | (479)        |
| 3-12-5       | 实例 4: 430 MHz, 90 W 推挽 BJT 放大器 .....        | (484)        |
| 3-12-6       | 能改善线性度的准并联晶体管 .....                         | (486)        |
| 3-12-7       | 分配放大器 .....                                 | (487)        |
| 3-12-8       | 功率放大器的稳定性分析 .....                           | (487)        |
| 3-13         | 功率放大器的数据表和厂家推荐的应用 .....                     | (494)        |
| <b>第 4 章</b> | <b>混频器设计 .....</b>                          | <b>(519)</b> |
| 4-1          | 概述 .....                                    | (519)        |
| 4-2          | 混频器的性质 .....                                | (521)        |
| 4-2-1        | 变频增益 (损耗) .....                             | (521)        |
| 4-2-2        | 噪声系数 .....                                  | (522)        |
| 4-2-3        | 线性 .....                                    | (526)        |
| 4-2-4        | 本振激励电平 .....                                | (527)        |
| 4-2-5        | 端口间隔离度 .....                                | (527)        |
| 4-2-6        | 端口 VSWR .....                               | (529)        |
| 4-2-7        | 直流失调 .....                                  | (529)        |
| 4-2-8        | 直流极性 .....                                  | (529)        |
| 4-2-9        | 功率消耗 .....                                  | (529)        |
| 4-3          | 二极管混频器 .....                                | (530)        |

|              |                               |              |
|--------------|-------------------------------|--------------|
| 4-3-1        | 单二极管混频器 .....                 | (530)        |
| 4-3-2        | 单平衡混频器 .....                  | (533)        |
| 4-3-3        | 二极管环形混频器 .....                | (536)        |
| 4-4          | 晶体管混频器 .....                  | (552)        |
| 4-4-1        | BJT 希尔伯特单元 .....              | (552)        |
| 4-4-2        | 带反馈的 BJT 希尔伯特单元 .....         | (555)        |
| 4-4-3        | FET 混频器 .....                 | (562)        |
| 4-4-4        | MOSFET 希尔伯特单元 .....           | (565)        |
| 4-4-5        | GaAsFET 单栅开关 .....            | (566)        |
| <b>第 5 章</b> | <b>射频无线振荡器 .....</b>          | <b>(587)</b> |
| 5-1          | 频率控制引言 .....                  | (587)        |
| 5-2          | 背景 .....                      | (587)        |
| 5-3          | 振荡器设计 .....                   | (588)        |
| 5-3-1        | 振荡器基础 .....                   | (589)        |
| 5-4          | 振荡器电路 .....                   | (600)        |
| 5-4-1        | Hartley (哈特利) .....           | (600)        |
| 5-4-2        | Colpitts (科耳皮兹) .....         | (601)        |
| 5-4-3        | Clapp-Gouriet (克拉普-考瑞特) ..... | (602)        |
| 5-5          | 射频 (RF) 振荡器设计 .....           | (602)        |
| 5-5-1        | 晶体管振荡器总体构思 .....              | (602)        |
| 5-5-2        | 双口微波/射频振荡器设计 .....            | (606)        |
| 5-5-3        | 陶瓷谐振器振荡器 .....                | (608)        |
| 5-5-4        | 使用微带电感作为振荡器的谐振器 .....         | (611)        |
| 5-5-5        | 哈特利微带谐振器振荡器 .....             | (616)        |
| 5-5-6        | 晶体振荡器 .....                   | (616)        |
| 5-5-7        | 压控振荡器 .....                   | (621)        |
| 5-5-8        | 调谐二极管谐振电路 .....               | (624)        |
| 5-5-9        | 实用电路 .....                    | (627)        |
| 5-6          | 振荡器中的噪声 .....                 | (633)        |
| 5-6-1        | 振荡器相位噪声计算的线性化方法 .....         | (633)        |
| 5-6-2        | AM 到 PM 转换 .....              | (641)        |
| 5-6-3        | 计算振荡器相位噪声的非线性方法 .....         | (648)        |
| 5-7          | 实际使用中的振荡器 .....               | (659)        |
| 5-7-1        | 振荡器的指标 .....                  | (659)        |
| 5-7-2        | 更实际的电路 .....                  | (660)        |
| 5-8          | 使用 CAD 设计 RF 振荡器 .....        | (668)        |
| 5-8-1        | 谐波平衡仿真 .....                  | (668)        |
| 5-8-2        | 时域仿真 .....                    | (670)        |
| 5-9          | 集成射频和毫米波振荡器的相位噪声改善 .....      | (672)        |
| 5-9-1        | 概述 .....                      | (672)        |

|              |                                       |              |
|--------------|---------------------------------------|--------------|
| 5-9-2        | 回顾噪声分析 .....                          | (673)        |
| 5-9-3        | 工作环境 .....                            | (674)        |
| 5-9-4        | 减小闪烁噪声 .....                          | (676)        |
| 5-9-5        | 集成振荡器应用 .....                         | (678)        |
| 5-9-6        | 总结 .....                              | (681)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>射频频率合成器 .....</b>                  | <b>(687)</b> |
| 6-1          | 引言 .....                              | (687)        |
| 6-2          | 锁相环 (PLL) .....                       | (687)        |
| 6-2-1        | PLL 基础 .....                          | (687)        |
| 6-2-2        | 相位频率比较器 .....                         | (689)        |
| 6-2-3        | 提供电压输出的鉴相器的滤波器 .....                  | (699)        |
| 6-2-4        | 基于电荷泵的锁相环 .....                       | (702)        |
| 6-2-5        | 应用 CAD 进行实际的 PLL 设计 .....             | (709)        |
| 6-3          | 分数 $N$ 分频锁相频率合成 .....                 | (713)        |
| 6-3-1        | 分数 $N$ 分频原理 .....                     | (713)        |
| 6-3-2        | 杂散抑制技术 .....                          | (714)        |
| 6-4          | 直接数字合成 .....                          | (722)        |
| <b>附录 A</b>  | <b>HBT 高频建模和完整参数的提取 .....</b>         | <b>(731)</b> |
| A-1          | 引言 .....                              | (731)        |
| A-2          | 高频 HBT 建模 .....                       | (732)        |
| A-2-1        | 直流与小信号模型 .....                        | (733)        |
| A-2-2        | 线性化 T 模型 .....                        | (734)        |
| A-2-3        | 线性化混合 $\pi$ 模型 .....                  | (735)        |
| A-3          | 完全参数提取 .....                          | (737)        |
| A-3-1        | 完全参数提取的公式 .....                       | (737)        |
| A-3-2        | 模型优化 .....                            | (737)        |
| A-4          | 噪声模型的验证 .....                         | (738)        |
| A-5          | HBT 模型参数提取 .....                      | (741)        |
| A-6          | 结论 .....                              | (741)        |
| <b>附录 B</b>  | <b>应用多谐波负载牵引仿真技术进行非线性微波电路设计 .....</b> | <b>(751)</b> |
| B-1          | 引言 .....                              | (751)        |
| B-2          | 运用谐波平衡法的多谐波负载牵引仿真 .....               | (751)        |
| B-2-1        | 多谐波负载牵引仿真公式 .....                     | (751)        |
| B-2-2        | 系统的设计过程 .....                         | (752)        |
| B-3          | 多谐波负载牵引仿真的应用 .....                    | (754)        |
| B-3-1        | 窄带功率放大器设计 .....                       | (754)        |
| B-3-2        | 倍频器设计 .....                           | (760)        |
| B-4          | 总结 .....                              | (762)        |
| B-5          | 基于负载牵引设计的实用性的注意事项 .....               | (764)        |

# 第 1 章 无线电路设计基础

## 1-1 概述

无线电路与人们熟知的双向无线电、电视、广播设备并无不同之处。它们中的一些需要高线性调制 (TV 图像), 一些需要经过中继站工作 (双相无线电), 真正的差别在于元件的体积小得多, 以及在无线电中, 绝大多数情况下都使用时分复用、扩频或其他能有效提高通信带宽利用率的方法。任何人都能举出一些含有“无线电路”的简单设备: 车库的自动开启装置, 汽车的无线钥匙 (我曾经多次遇到这样的情况, 因为有强干扰信号, 汽车的主人不能立即启动它的汽车, 直到干扰信号消失为止)。另一个长期以来受人欢迎的无线电产品是无绳电话, 它经历了从最初的根本没有保密功能的 50MHz 型, 到成熟一些的工作在 900MHz 的型号, 直到现在的 900MHz 或 2.4GHz 的双频段设计的变化。

无线技术发展最快的领域莫过于蜂窝电话。它的两大主要应用是“手机”和“基站”。基站在高功率下, 要实现大信号处理的线性度, 面临的问题较手机更多。试设想在飞机场的候机厅, 那里很多乘客都试图在登机前做最后一次联络。如果大约有 30% 的乘客都在使用手机, 则用一台频谱分析仪来对如此差的接收环境去评估就显得十分可笑。

随着手机的日益普及, 令人焦虑的问题也层出不穷。虽然备份电池的出现使担心“我的手机不知道什么时候就没电了”的人越来越少, 但担心手机高频发射会危害身体的用户却越来越多<sup>[22]</sup>。据一个自称在这个问题上专家的人说, 一台 50~100kW 视频或图像的发射机, 当接到高增益天线后, 在视距范围发出的能量将远远大于手机发出的脉冲能量。而且和危害人体的射频 (RF) 相比, 手机能量持续的时间短得多, 因此, 前者的绝对能量要高出手机上千倍。双向无线电手持机是天线靠近使用者头部的, 工作在 50~900MHz 频域的设备。它们被警方及其他安全机构使用了近 30 年, 至今还没有由此引发癌症或是其他疾病的报道。近期在英国的研究表明, 使用手机者的“反应时间”增加了。然而总是有怀疑论者或有政治企图的人无视这一事实, 他们试图影响媒体, 让自己出 15 分钟的风头 (Andy Warhol 曾说过这话)。

说到有害的“辐射”, 图 1-1 示出一个某种 Motorola 手机的无线辐射仿真。虽然对应图中的颜色没有绝对值的标定, 但我们还是饶有兴致地看到, 塑料外壳内部的天线也有辐射。当然绝大部分的能量是从天线顶端发射出的。这样看来, 只要不把手机天线指向头就能“以防万一”。用户将会发现, 他们更应该警惕的不是辐射而是因为 RF 功放的功率加温“外壳”而引起的效率问题。

在无线电路设计基础这一章里, 我们先要了解一下典型特高频到超高频 (VHF/SHF) 收发机, 并且解释从麦克风到天线,

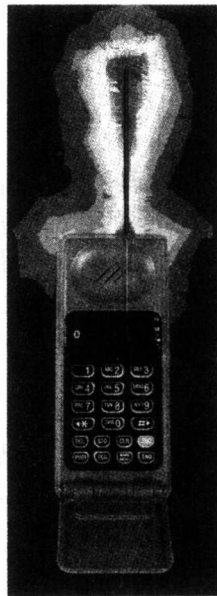


图 1-1 某 Motorola 手机的无线辐射仿真

从天线到麦克风的信道传输，在此之后，将考察无线电信道及它对不同方法的数字调制的影响，接下来介绍无线发送和接收装置方框图，并对各功能块及其对整个系统的影响做出分析。

为了确保系统正常工作，我们要进行相当多的测量与试验。而且，要明确这些测试的目的和重要性，就很有必要了解系统的特性和概念，如：动态范围的定义。最后，我们会读到无线系统测试的课题，并将再次给出对电池供电的手持机及大功率基站适用的指导。

## 1-2 系统功能

蜂窝电话是双边带和调频(FM)或调相(PM)的混合收发装置，实际的传输不是连续的，而是脉冲的。并且因为是脉冲信号频谱，故会占据一定的信号带宽。这和单边带(SSB)收发机的互调产物会干扰邻信道一样，蜂窝电话的信号处理电路必须有足够的幅度和相位的线性度来保持它所发送和接收的AM/PM混合发射的调制特性。从这个意义上来说，蜂窝电话也是线性的收发机。因为发射物的频谱增生会影响邻信道的工作，所以就必须严格要求放大器只能几乎工作在甲类来满足它们，就像SSB收发机中遇到的那样。时分多址工作模式，允许众多站通过短而精确的定时发送，共同使用相同的频率。这种模式要求一个系统，以小的工作周期进行传送。与连续工作相比，功放仅需要较小的散热片。另外，电源管理包括休眠模式，这也是手机设计的另一个重要问题。

图1-2示出手持收发机的框图，它适用于蜂窝电话与其他允许全双工的系统。对那些不太熟悉接收机的读者来说，通过这个结构图就可以对其有一个大致的了解。被天线接收的RF信号通过一个双工滤波器馈入一个预放大器、附加滤波器和混频器组成的前端。双工器主要用于隔离发射与接收频率，而不是主要用于选频，但因为输入信号的低场强，双工器同时提供了接收通道不会过载和不会产生交调产物的保证。预放大器就是一个后接滤波器的单晶体管或是一个组合放大电路。高频端滤波器大多是由Murata提供的小型化声表面滤波器(SAW)。我们需要指出的是，在结构图的这一部分，滤波器显然都有较高的输入与输出阻抗(介于 $200\Omega \sim 1k\Omega$ 之间)，因此它不能在 $50\Omega$ 的测试系统中有良好的测试特性。一般而言，集成电路混频器也工作在高阻抗情况下，但匹配更容易些。混频器后的滤波器抑制镜像，然后进行中频和解调处理。由Philip提供的专用芯片，是为双变换接收机设计的。而解调是通过一个用于FM模拟调制的正交检波器完成的。图中水平路径上电路的其余部分完成数字信号处理(DSP)及整体控制功能。图中最右边的4部分为中心处理器，它负责显示、电源管理和信息储存(比如常用的电话号码)。Kostic在文献1中给出了一个易懂的DSP概述。

发射部分包括一个独立的被调制的频率合成器，使用双合成器芯片会有效地对系统进行管理，接收和发射频率都受到一个小型化温度补偿晶体振荡器(TCXO)的控制。晶振的一个输出还被用做系统主时钟来控制整个数字处理过程。电压控制振荡器(VCO)的输出经放大后通过接收通道共用的双工滤波器送至天线。码分、频分和时分复用(分别缩写为CDMA, FDMA和TDMA)都是先进的调制方法，在方案中被采用。此时，发射机并不总在工作，而双工器可以用 $1/4$ 波长传输线结合PIN管的二极管开关来替代，以完成所需的开关功能。

许多现代的系统采用了“零中频”或称直接变换，这种方案会有效地简化中频或调制电路。图1-3是Alcatel公司的单片直接变换发射机的结构图。信号与两路正交的本地振荡(LO)送入镜像抑制混频器，而选择性是用所谓控制“音频带宽”来获得的。当今已经有很多使用不同方案的产品，要全面介绍已超出本书范围，因此我们决定只讲述基础内容。这样做的一个理由

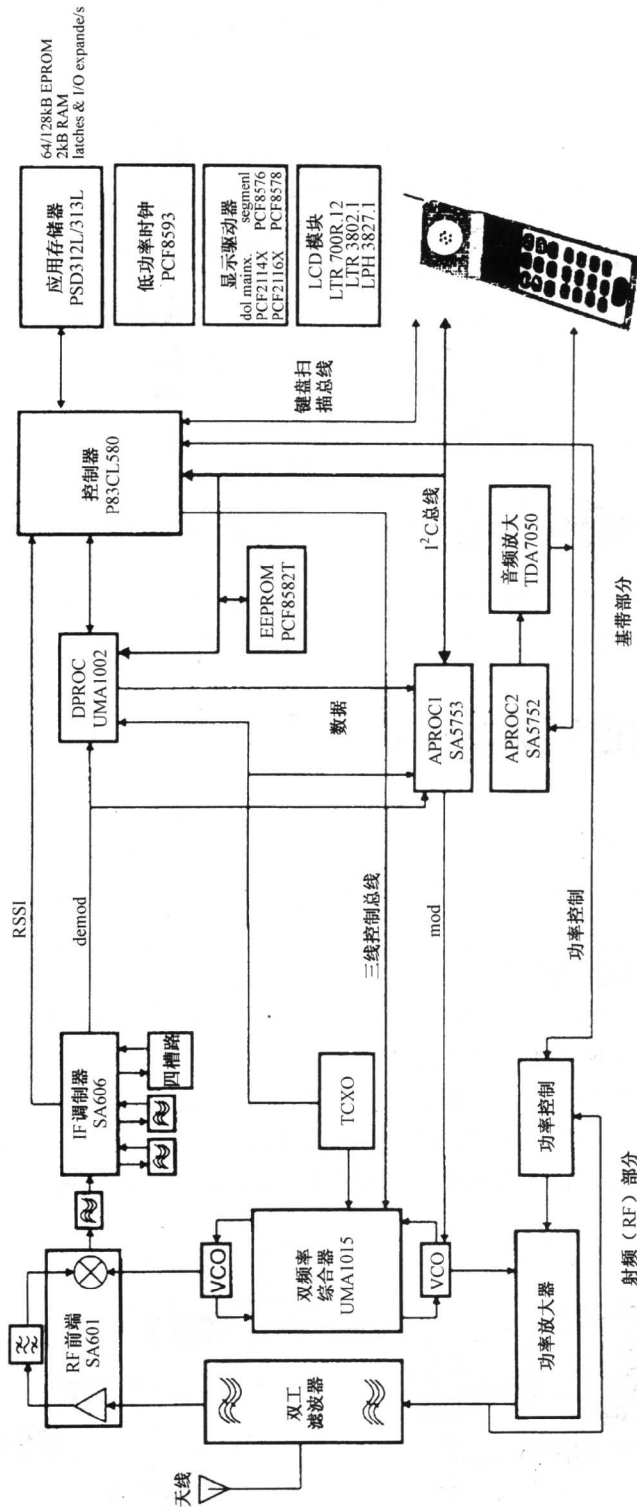


图1-2 一个手持蜂窝电话收发机框图