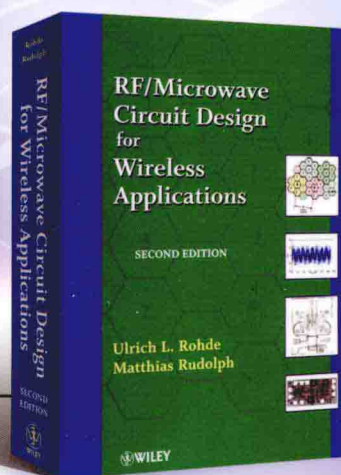


无线应用射频 与微波电路设计 (第二版)

*RF/Microwave
Circuit Design
for
Wireless
Applications*
Second Edition



[美] Ulrich L. Rohde
[德] Matthias Rudolph

著

张玉兴 文继国 译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外信息技术精品智汇馆

无线应用射频与微波电路设计

(第二版)

RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications
Second Edition

[美] Ulrich L. Rohde 著
[德] Matthias Rudolph
张玉兴 文继国 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书是《无线应用射频与微波电路设计》的第二版。全书共 6 章。第 1 章概述了调制类型和无线收发系统。第 2 章深入讨论二极管、双极晶体管和各类场效应管的模型和参数提取。第 3 章讲解了射频微波电路中应用最广泛的“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。本版增加了放大器线性化方案和射频 CMOS 放大器的内容，以适应当前电子技术发展的趋势。第 4 章详细分析了无源和有源混频器。第 5 章阐述了射频振荡器原理，从理论上深入分析了相位噪声的产生机理，并且讨论高 Q 振荡器，还给出了大量成熟的实际电路。第 6 章讲述了射频微波频率合成器，重点阐述整数 N 分频 PLL 频率合成，对分数 N 分频 PLL 方法和 DDS 也有一定深度的分析。

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，也可作为从事无线通信的专业人员的参考书。

RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications Second Edition, ISBN 9780470901816, Ulrich L. Rohde, Matthias Rudolph

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字：01-2013-4138

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

无线应用射频与微波电路设计：第 2 版 / (美) 罗德 (Rohde, U.L.), (德) 鲁道夫 (Rudolph, M.) 著；张玉兴，文继国译. —北京：电子工业出版社，2014.5

(国外信息技术精品智汇馆)

书名原文：RF/Microwave circuit design for wireless applications, second edition

ISBN 978-7-121-23123-0

I. ①无… II. ①罗… ②鲁… ③张… ④文… III. ①无线电信号—射频 ②微波电路—电路设计 IV. ①TN911.23②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 088768 号

责任编辑：刘海艳 (lhy@phei.com.cn)

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

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

开 本：787×1092 1/16 印张：48 字数：1229 千字

印 次：2014 年 5 月第 1 次印刷

印 数：3 000 册 定价：149.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

译者序

从首次翻译《无线应用射频与微波电路设计》以来已经过去了十年，从这本书的原文第一版出版到第二版出版则过去了 12 年。这 12 年来电子技术的发展可以说是日新月异，特别是无线通信的发展，从 GSM 最初的频分多址（FDMA）到时分多址（TDMA），又发展到 CDMA（码分多址）和 WCDMA（宽带 CDMA）。今天则已经进入了第四代无线通信（LTE）时代。数据无线传输速率从不到 1Mbps 到几 Mbps，今天则达到几十 Mbps，上百 Mbps。现在各个国家正在大力发展 LTE-A，数据传输速率要达到几百 Mbps。

这 12 年以来，器件的发展也是有目共睹的。新颖半导体材料 GaN 和 SiGe 的出现，发展出来了相应的、性能更加优良的射频微波器件。例如，GaN 功率器件的出现，使 X 波段的单个晶体管功率容量从几瓦进步到几十、上百瓦，甚至几百瓦。

半导体工艺技术的发展速度也是惊人的。由于 12 年前工艺技术的限制，CMOS 器件只能用于低频，今天的 CMOS 器件则可用于射频和微波领域。半导体工艺技术的发展也促使各个大型公司的半导体部门分立出来，成立为独立的公司，例如 Infineon、Freescale、NXP 和 Avago。

本人有幸再次成为本书的翻译者。虽然译者是电子科技大学的教授，长期从事低频模拟电路、射频模拟电路与系统、微波固态电路和锁相技术等课程的教学工作，但也长期从事无线收发系统、高线性大动态接收机、频率合成和固态功率放大器等领域的科研任务。为此，在 1999 年成立成都赛英科技有限公司，当时主要研制生产射频微波频率源。经过十多年的发展，除了原来的微波源、微波开关、微波滤波器、低噪声放大器、功率放大器、无线接收发射机和瞬时测频等产品外，现在又开发出单兵雷达、机场跑道异物检测雷达等产品。

可以说，我和《无线应用射频与微波电路设计》的作者是同行，对这个领域中问题的理解是相同的。《无线应用射频与微波电路设计》是我在该领域见到的最好的书。第二版经过修订和更新，是独一无二的从技术状态上引导无线集成电路设计，为研究人员和工程师提供跟踪最新 IC 技术的完整系列建模、设计和实现的工具。

正如本书封底所介绍的那样，这是现代理论和实际问题完美结合的典范著作。射频微波电路是一门需要实践的学科，电路能否成功还与印制板的布局技术及实际的调试有关。虽然计算机仿真技术发展到今天，已经可以解决大部分的问题，特别是线性放大器。但是，大信号的建模、电路元件的分布性、电磁互耦及参数抽取等问题引起模型的不准确。因此，射频微波单元电路和系统都需要经过调试，本书用了一定的篇幅介绍这方面的问题。

本书的第 1、2 章由成都信息工程学院文继国教授翻译，其余大部分由电子科技大学电子工程学院张玉兴教授翻译。参与翻译的还有成都赛英科技有限公司的技术同行——陈会、吴义华、赵宏飞、唐世容、姚宗诚、王清文、张慧英、刘涛等。翻译过程中得到了电子工业出版社的大力支持，特别是刘海艳编辑的支持。

张玉兴

2014 年 1 月于成都

第二版前言

《无线应用射频与微波电路设计》第一版印刷出版以来已经过去 12 年。2000 年以后仍旧是无线通信蓬勃发展的年代，移动电话已经从高消费的商业设施变成了大众化的消费品。具有广大市场的 WiFi 和 GPS 已经用上了现成的芯片系列，或者一些芯片正在研制之中。近年来，必须清醒地认识到，正如第 1 章第一页所说的那样，我仍可以下这样的结论：等候在机场的旅客 30% 是 “on the air”（在使用无线通信工具）。现在，可以期待这样的人正在快速地接近 100%，部分人通过多种设施连接到互联网上，而另外的人正在使用手机通话。

需要这本书增加内容和重新改写的理由是显然的，半导体技术和器件模型在迅速地进步。在第一版中，GaAs MESFET 作为重要器件讨论，并且讲到，作为无线应用的 CMOS 电路发展太慢。因此，这一版本必须考虑它们的进步而讨论 CMOS 和 CMOS 电路，BiCMOS 以及 GaAs 和 SiGe 的 HBT 管，GaN 的 HEMT 管。

最近 15 年以来，发生了主要的技术公司的半导体分部变成了独立的公司这样的事件。可以举几个例子：芯片制造的 Siemens、Motorola、Philips 和 Hewlett-Packard 的半导体分部，现在成了 Infineon、Freescale、NXP 和 Avago 公司。换句话说，大部分的电路设计原理并没有多大的改变。我们决定：很多情况下，仍旧依赖第一版中已经讨论过的相同的商业电路例子。这些例子产品中的大部分仍应用于市场之中。

这本书也详细讨论了 GSM 的概念，新版本的最大亮点是线性化的功率放大器（这个课题被极详细地讨论）。除此之外，新课题——将混频器和振荡器中的非线性噪声处理为在交叉耦合振荡器中扮演重要角色的非线性噪声。这部分内容的讨论已经覆盖到比概念性讨论更深入的地步，主要章节已更新，而且上述标题下的内容是全新的，并充分覆盖该领域。

还要说的是：有一个重大的改变就是这本书的作者。作者 David P. Newkirk——作为对语言技巧具有重大价值的技术著作者，保证了第一版本的高质量，但在第二版本中不再出现。但是，非常幸运的是，有才能的 Matthias Rudolph 博士与我们一起再版了这本书。他具有微波工程领域牢固的基础，他在德国柏林 Ferdinand Braun Institute 负责管理器件建模和低噪声部件。在 2009 年秋季，他被任命为德国 Cottbus Brandenburg 大学负责 RF 和微波技术的 Ulrich-L.-Rohde 职位跟踪教授。他的奉献和经验给这版书以罕见的广宽的基础。

最后，我对很多公司和个人对这本书的支持表示感谢，感谢他们允许我们使用他们的图表、数据和技术文档作为书中的例子；尤其要感谢我们的出版商 John Wiley & Sons，特别是 George Telecki 的不断支持和耐心。

Ulrich L Rohde
Marco Island Florida
2012 年秋季

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，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。任何人若要有一个合适的天线，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-10dBm，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+10dBm。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立设备，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。除了二极管用作可变电容或调谐电容外，另一个主要应用就是用作开关。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。这一部分对分立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，分立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、National Semiconductor、Philips、Rohde & Schwarz 和 Siemens Semiconductor（现为 Infineon Technologies）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。

最后还要感谢出版商 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	5
1.3.1 引言	5
1.3.2 信道冲激响应	7
1.3.3 多普勒效应	11
1.3.4 传递函数	12
1.3.5 信道冲激响应的时变特性和传递函数的时变特性	12
1.3.6 研究总结	14
1.3.7 无线信号举例: GSM 中的 TDMA 系统	15
1.3.8 从 GSM 到 UMTS 再到 LTE 的发展	25
1.4 关于比特、符号和波形	26
1.4.1 引言	26
1.4.2 数字调制技术基础	33
1.5 无线系统分析	45
1.5.1 模拟与数字接收机设计	45
1.5.2 发射机	54
1.6 框图组成	71
1.7 系统性能及其与电路设计的关系	75
1.7.1 系统噪声和噪声基底	75
1.7.2 系统的幅度特性和相位特性	79
1.8 测试	99
1.8.1 引言	99
1.8.2 发射和接收质量	99
1.8.3 基站仿真	108
1.8.4 GSM	109
1.8.5 DECT	109
1.9 C/N 或 SNR 到 E_b/N_0 的变换	110
参考文献	111
推荐读物	112

第 2 章 有源器件模型	114
2.1 二极管	115
2.1.1 大信号二极管模型	115
2.1.2 混频二极管和检波二极管	118
2.1.3 PIN 二极管	125
2.1.4 变容二极管	139
2.2 双极型晶体管	173
2.2.1 晶体管的结构类型	173
2.2.2 双极晶体管的大信号性能	175
2.2.3 正向有源区的大信号晶体管	187
2.2.4 采用异质结构提高射频性能	193
2.2.5 集电极电压对 BJT 管正向有源区的大信号特性的影响	195
2.2.6 HBT 处于正向有源区时集电极的电流和电压对大信号特性的影响	196
2.2.7 饱和区和反向有源区	199
2.2.8 自热	203
2.2.9 双极型晶体管的小信号模型	205
2.3 场效应管	207
2.4 结型场效应管的大信号性能	213
2.4.1 JFET 的小信号特性	217
2.4.2 MOSFET 的大信号特性	221
2.4.3 MOS 场效应管处于饱和区时的小信号模型	227
2.4.4 场效应管的短沟道效应	230
2.4.5 MOSFET 场效应管的小信号模型	234
2.4.6 III-V 型材料的 MESFET 场效应管和 HEMT 场效应管	249
2.4.7 GaAs MESFET 和 HEMT 的小信号模型	258
2.5 有源器件的参数提取	283
2.5.1 概述	283
2.5.2 典型的 SPICE 参数	283
2.5.3 噪声建模	285
2.5.4 器件模型的缩放因子	292
2.5.5 建立“参数提取”的数据库	293
2.5.6 结论	309
2.5.7 器件库	310
2.5.8 MESFET 管的物理模型	310
2.5.9 实例：改进 BRF193W 模型	313
参考文献	314
推荐读物	316

第3章 基于BJT与FET的放大器设计	317
3.1 放大器的特性	317
3.1.1 引言	317
3.1.2 增益	321
3.1.3 噪声系数(NF)	325
3.1.4 线性特性	348
3.1.5 自动增益控制(AGC)	359
3.1.6 偏置和电源电压与电流(功耗)	365
3.2 放大器的增益、稳定性和匹配	368
3.2.1 S参数关系	369
3.2.2 低噪声放大器	373
3.2.3 高增益放大器	404
3.2.4 低电压集电极开路设计	411
3.2.5 灵活匹配电路	418
3.3 单级反馈放大器	419
3.3.1 无损耗或无噪反馈	423
3.3.2 宽带匹配	424
3.4 两级放大器	424
3.5 三级或多级放大器	433
3.5.1 多级放大器的稳定性	437
3.6 一种压控调谐滤波器的新方法及其CAD确认	437
3.6.1 二极管性能	437
3.6.2 VHF例子	440
3.6.3 HF/VHF压控滤波器	442
3.6.4 改善VHF滤波器	444
3.6.5 总结	445
3.7 差动放大器	446
3.8 二倍频器	449
3.9 有自动增益控制(AGC)的多级放大器	453
3.10 偏置	455
3.10.1 RF偏置	462
3.10.2 直流偏置	463
3.10.3 集成放大器的直流偏置电路	465
3.11 推挽/并联放大器	466
3.12 功率放大器	468
3.12.1 实例1: 输出为7W的1.6GHz C类BJT功率放大器	476
3.12.2 例子: 高效率3.5GHz逆F类GaN HEMT功率放大器	486

3.12.3	线性放大器系统	495
3.12.4	用于射频功率晶体管的阻抗匹配网络	503
3.12.5	实例 2: 使用分布元件的低噪声放大器	520
3.12.6	实例 3: 用 CLY15 的 1W 放大器	525
3.12.7	实例 4: 430MHz、90W 推挽 BJT 放大器	530
3.12.8	能改善线性度的准并联晶体管	531
3.12.9	分配放大器	533
3.12.10	功率放大器的稳定性分析	533
	参考文献	540
	推荐读物	543
第 4 章	混频器设计	546
4.1	概述	546
4.2	混频器的性质	548
4.2.1	变频增益 (损耗)	548
4.2.2	噪声系数	550
4.2.3	线性	556
4.2.4	本振激励电平	558
4.2.5	端口间隔离度	558
4.2.6	端口 VSWR	559
4.2.7	直流失调	560
4.2.8	直流极性	560
4.2.9	功率消耗	560
4.3	二极管混频器	560
4.3.1	单二极管混频器	560
4.3.2	单平衡混频器	569
4.3.3	二极管环形混频器	572
4.4	晶体管混频器	587
4.4.1	BJT 希尔伯特单元	587
4.4.2	带反馈的 BJT 希尔伯特单元	590
4.4.3	FET 混频器	597
4.4.4	MOSFET 希尔伯特单元	601
4.4.5	GaAs FET 单栅开关—阻性混频器	601
	参考文献	622
	推荐读物	623
第 5 章	射频无线振荡器	624
5.1	频率控制概述	624
5.2	背景	624

5.3 振荡器设计	626
5.3.1 振荡器基础	626
5.4 振荡器电路	638
5.4.1 Hartley (哈特利)	638
5.4.2 Colpitts (科耳皮兹)	638
5.4.3 Clapp-Gouriet (克拉普-考瑞特)	639
5.5 射频 (RF) 振荡器设计	639
5.5.1 晶体管振荡器总体构思	639
5.5.2 双口微波/射频振荡器设计	643
5.5.3 陶瓷谐振器振荡器	646
5.5.4 使用微带电感作为振荡器的谐振器	649
5.5.5 哈特利微带谐振器振荡器	655
5.5.6 晶体振荡器	655
5.5.7 压控振荡器	658
5.5.8 调谐二极管谐振电路	661
5.5.9 实用电路	664
5.6 振荡器中的噪声	669
5.6.1 振荡器相位噪声计算的线性化方法	669
5.6.2 基于反馈模型的相位噪声分析	675
5.6.3 AM-PM 转换	678
5.6.4 数值优化振荡器	685
5.7 实际使用中的振荡器	690
5.7.1 振荡器的指标	690
5.7.2 更实际的电路	692
5.8 集成和毫米波振荡器相位噪声的改善	698
5.8.1 概述	698
5.8.2 噪声分析回顾	699
5.8.3 工作环境	700
5.8.4 减小闪烁噪声	702
5.8.5 集成振荡器的应用	702
5.8.6 总结	706
参考文献	706
令人感兴趣的专利	707
推荐读物	708
第 6 章 射频频率合成器	710
6.1 概述	710
6.2 锁相环 (PLL)	710

6.2.1 PLL 基础	710
6.2.2 相位频率比较器	712
6.2.3 提供电压输出的鉴相器的滤波器	722
6.2.4 基于电荷泵的锁相环	727
6.3 应用 CAD 进行实际的 PLL 设计	732
6.4 分数 N 分频锁相频率合成	736
6.4.1 分数 N 分频原理	736
6.4.2 杂散抑制技术	737
6.5 直接数字合成	745
参考文献	749
令人感兴趣的专利	750
推荐读物	752

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、广播设备并无很大不同。它们中的一些需要高线性调制（电视图像），一些需要经过中继站工作（双向无线电），真正的差别在于电路的尺寸小得多，以及在绝大多数情况下都使用时分复用、扩频或者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，如车库门自动开启装置、汽车无线钥匙（曾经多次出现过强干扰信号导致车主无法取回停放车辆的情况，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 和 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系统，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，面临的问题较手机多得多，尽管手机用户也会遭遇到类似的问题。试设想在机场的候机厅，那里很多乘客都试图在登机前进行最后一次联络，在一次调查中，我们发现大约有 30% 的乘客都在同时使用手机！如果用频谱分析仪来分析如此差的接收环境，频谱一定非常杂乱。

随着手机的日益普及，令人焦虑的问题也层出不穷。虽然“手机电量何时耗尽”这样的担心越来越小（带一块备用电池就行），但“手机会危害身体吗”这种长期存在的忧虑却越来越大。据一个自称在这个问题上专家的人说，一台 50~100kW 的电视发射机，特别是当接到高增益天线上后，在视距范围内发出的能量也比手机发出的脉冲能量大。并且，与我们认为对人体有害的手机射频信号相比，其绝对能量高出了上千倍，而且能量持续的时间短得多。在过去差不多 30 年时间里，警方和其他安保机构一直在使用工作频率 50~900MHz、使用时天线靠近使用者头部的双向无线电手持机，至今仍未有由此引发癌症或其他疾病的报道。尽管近期在英国尚有争论的研究表明，手机用户的“反应时间”显著变长，然而总是有怀疑论者以及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 曾经这样评价他们）。

手机辐射对使用者是否有害的研究一直没有间断过。但是，该问题本身很复杂，并且，不同的研究结论难以重现，有时甚至互相矛盾。值得庆幸的是，从 2001 年开始，伊利诺斯芝加哥大学的 James C. Lin 教授在《IEEE Microwave Magazine》期刊的“健康危害”栏目中发表综述性的系列文章，报道研究工作的进展。该栏目中的文章既有适合普通读者的，也有适合工程师们的。在参考文献中仅列出了他的第一篇文章^[1]和另外一篇关于使用手机与癌症之间可能存在关联的国际性研究文章^[2]，其他文章可以通过 IEEE 数据库进行查询。

说到手机辐射，我们先来看看图 1.1 所示的摩托罗拉手机的近场仿真。出于美观考虑，

天线隐藏于手机内部，和以前使用的线状天线相比，其辐射场的分布显著不同。辐射场主要集中在手机端部，这样可以避免握手机的手掌对发送信号和接收信号造成衰减，并且辐射场指向远离头部的一侧。如果手机用户感到“发热”，很可能是由于功率放大器因效率问题而产生的热量使手机外壳发热，而非手机的辐射效应，尤其是当多个射频前端模块（如 GSM、GPS、WiFi）工作时，发热情况就更为明显。

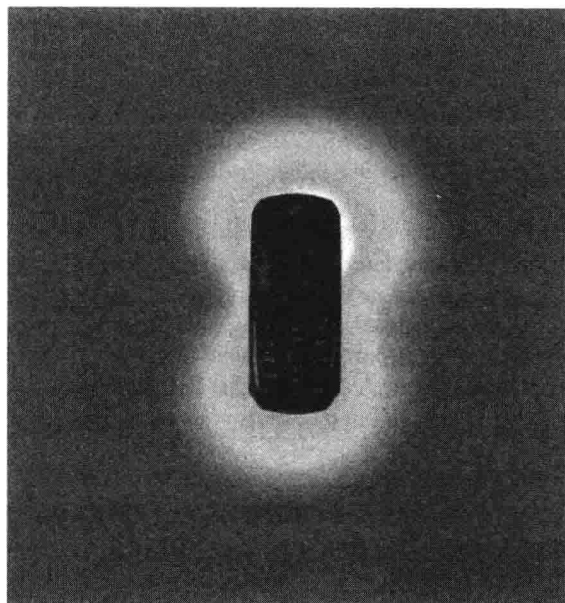


图 1.1 手机天线的近场辐射仿真（德国基尔大学 D.Manteuffel 教授提供）

在无线电路设计基础这一章里，首先介绍一种典型的甚高频/超高频（UHF/SHF）收发机，并对从麦克风到天线以及从天线到麦克风的信号传输路径进行说明，然后考察无线信道及其对各种数字调制方式的影响。在此之后，对无线收发机进行分析，考察收发机的结构框图并分析各个模块对整个系统的影响。为了确保系统正常工作，需要进行大量的测量和试验，并且，要明确这些测试的目的和重要性，还要定义系统的一些特性和概念，如定义动态范围。最后，将考察无线系统的测试问题。同样，我们仍然针对采用电池供电的手持机以及大功率基站给出指导。

1.2 系统功能

蜂窝移动电话是双边带收发机和调频（Frequency Modulation, FM）或调相（Phase Modulation, PM）收发机结合后衍生出的一种收发装置，实际的传输不是连续的，而是脉冲的。因为是脉冲信号频谱，因此就要关注由键控转换产生的信号带宽，正如在单边带（Single Side Band, SSB）收发机中关注干扰相邻信道的互调成分一样。与 SSB 收发机的互调成分会干扰邻信道一样，蜂窝电话的信号处理电路必须有足够的幅度线性度和相位线性度来保持它所发送和接收的调幅/调相（AM/PM）混合发射信号的调制特性。从这个意义上来说，蜂窝电话也是线性的收发机。由于发射信号的频谱再生会影响相邻信道的工作，因此，