

国外大学优秀教材——微电子类系列（翻译版）

射频微电子

Behzad Razavi 著

余志平 周润德 译



清华大学出版社

国外大学优秀教材——微电子类系列（翻译版）

射频微电子

Behzad Razavi 著

余志平 周润德 译

清华大学出版社
北京

Simplified Chinese edition copyright © 2006 by **PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS**.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: RF Microelectronics, by **Behzad Razavi**, Copyright © 1998

EISBN: 013-8875715

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as **Pearson Education, Inc.**

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao).

本书中文简体翻译版由 Pearson Education, Inc. 授权给清华大学出版社在中国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区)出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2003-5201

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

射频微电子/(美)拉扎维(Razavi, B.)著;余志平等译. —北京:清华大学出版社,2006.4

(国外大学优秀教材——微电子类系列)

书名原文:RF Microelectronics

ISBN 7-302-12513-9

I. 射… II. ①拉…②余… III. 射频-微电子技术-高等学校-教材 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 013157 号

出版者:清华大学出版社 地址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:邹开颜 王敏稚

印刷者:北京牛山世兴印刷厂

装订者:三河市金元印装有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:185×230 印张:16.75 字数:381千字

版次:2006年4月第1版 2006年4月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-12513-9/TN·307

印数:1~3000

定价:33.00元

出版前言

微电子技术是信息科学技术的核心技术之一,微电子产业是当代高新技术产业群的核心和维护国家主权、保障国家安全的战略性产业。我国在《信息产业“十五”计划纲要》中明确提出:坚持自主发展,增强创新能力和核心竞争力,掌握以集成电路和软件技术为重点的信息产业的核心技术,提高具有自主知识产权产品的比重。发展集成电路技术的关键之一是培养具有国际竞争力的专业人才。

微电子技术发展迅速,内容更新快,而我国微电子专业图书数量少,且内容和体系不能反映科技发展的水平,不能满足培养人才的需求,为此,我们系统挑选了一批国外经典教材和前沿著作,组织分批出版。图书选择的几个基本原则是:在本领域内广泛采用,有很大影响力;内容反映科技的最新发展,所述内容是本领域的研究热点;编写和体系与国内现有图书差别较大,能对我国微电子教育改革有所启示。本套丛书还侧重于微电子技术的实用性,选取了一批集成电路设计方面的工程技术用书,使读者能方便地应用于实践。本套丛书不仅能作为相关课程的教科书和教学参考书,也可作为工程技术人员的自学读物。

我们真诚地希望,这套丛书能给国内高校师生、工程技术人员以及科研人员的学习和工作有所帮助,对推动我国集成电路的发展有所促进。也衷心期望着广大读者对我们一如既往的关怀和支持,鼓励我们出版更多、更好的图书。

清华大学出版社

译者序

近年来,由于无线通信的广泛需求和迅速发展,射频集成电路已成为 IC 设计中被普遍关注和大量研究的课题。尤其是因为硅 CMOS 工艺的不断改进,MOS 器件的截止频率已完全能满足多数现代无线通信应用要求(比如 $0.13\mu\text{m}$ 工艺节点的 nMOS 截止频率可达 90GHz)。对一些要求不高的应用,如无线局域网(WLAN)射频前端收发器,CMOS 器件噪声性能等也能满足要求。因此了解和掌握射频集成电路的工作原理与分析方法对正确有效地设计射频、数字模拟混合信号集成电路是至关重要的。

Behzad Razavi 所著的《射频微电子》(RF Microelectronics)一书就是针对上述需要的。它既可供高年级大学生或研究生作教科书用,又可满足集成电路设计工作者进一步提高自身知识和设计技能之目的。相对其他 RF CMOS 电路的专著,本书的特点是系统级的介绍较为详细。即它将无线通信电路系统的描述、器件特性及单元电路分析融合在一起,使读者能对射频电路的 IC 实现有一个完整的概念。

本书第 1 和第 2 章首先介绍了在射频电子学经常遇到的概念和术语,并给出了评价射频电路性能的主要指标,如表征非线性度的 1dB 增益压缩点和三阶交调点、灵敏度和动态范围等。其中对随机信号和噪声的描述很有特色,例如定义随机过程为一组时间的函数或多次测量的集合,这对理解随机信号的本质很有帮助。

在通信系统中,模拟和数字信号的调制、解调是必须的过程。本书第 3 章先用简洁的数学公式定义和描述了模拟信号的调幅、调相和调频调制方法,然后自然地扩展到数字信号调制的幅移、相移和频移键控调制。本书对数字信号调制机理的讨论十分明了,是一个对数字信号系统不甚熟悉的读者很好的入门介绍。另外,在书中还对各种调制方法的功率效率进行了讨论。

本书第 4 章专门介绍 3 种在无线通信系统中通用的多路存取技术: FDMA, TDMA 和 CDMA,及几种常用的无线通信标准,如 GSM 和 Qualcomm 公司的 CDMA,这些对了解系统的工作方式很有帮助。

第 5 章是本书的重点,讨论了无线前端收发器的结构和集成电路的实现。它在介绍单元电路之前,先比较了各种接收器和发送器的结构,包括外差和零差程式;然后给出了几种常见的无线收发器的设计实例。这些设计都已在产品中实现并被用于无线通信系统中,其中有 GSM 和 DECT 收发器的电路框图。这些高层次的讨论对理解后续的构成收发器的单元电路设计和工作原理打下了基础。

本书的第 6 章至第 9 章详细讨论了低噪声放大器和混频器、振荡器、频率综合器和功率

放大器的电路原理和分析方法。电路的实现以 MOS 器件为主,但也有用双极型晶体管作实例的。电路的工作原理讨论较为简要,但对各个电路单元要达到的技术指标和评价标准给出了不少实际应用系统的具体数据,这对于读者建立相关电路设计的定量概念颇有益处。

本书的作者是美国 UCLA(加州大学洛杉矶分校)的教授,他曾在 HP 实验室工作过,有丰富的模拟电路设计经验。近年来更在射频 CMOS 的电路理论和设计研究方面大有建树,并成功地创办了用硅 CMOS 工艺实现的 WLAN 芯片设计公司。他写的另一本有关 CMOS 模拟集成电路的书 *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*,作为电路教学的教科书,为美国多所大学采用,也在清华大学被用作本科生和研究生的模拟电路教材或参考书。

本书在讨论 RF CMOS 电路的工作原理和分析上略为简明。读者如果了解更多的电路分析知识和方法,来作为学习 RF 系统级设计、分析的补充,可进一步参考美国斯坦福(Stanford)大学 Thomas H. Lee 教授的 *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits* 一书(英国剑桥大学出版,中国电子出版社有第二版的影印本,2005)。

译者在清华大学讲授 CMOS 射频集成电路分析与设计研究生课程中,自 2000 年来同时采用 Thomas Lee 和本书(英文版)作为教材(电路部分以 Lee 书为主,系统部分参考 Razavi 书)。这本翻译稿就是和清华大学微电子学研究所的周润德教授以及该所 CAD 室修过这门课的博士研究生一起完成的。可能存在错误或不准确的地方,敬请读者指正。

射频 CMOS 电路是一门依然在发展的活跃学科,希望通过普及这方面的基础知识,引起读者的兴趣,尤其是年轻学人,使他们能投身于集成电路与系统的前沿研究中。

余志平
于清华大学
2006 年 2 月

前 言

全球的手机年销售额已超过 25 亿美元。有 450 万客户的家庭卫星网络也成了 25 亿美元的产业。到了 2000 年,全球定位系统有望达到 50 亿美元的市场。在欧洲,移动通信设备的销售和服务在 1998 年达到 300 亿美元。这些统计数字令人眩目。

射频(Radio Frequency, RF)和无线通信的市场突然一下子膨胀到不可想像的地步。诸如传呼机、手机及无绳电话、有线电视调制解调器以及射频标签的电讯产品正在迅速地渗入我们的生活,从奢华用品变成不可缺少的工具。大大小小的半导体和系统公司,不管是模拟电路的或数字电路的,都看到了这些统计数字。这些公司都在花大力气推出各种各样的 RF 产品来占据各自的市场。

RF 设计与众不同,它需要涉及许多与集成电路(IC)无关的学科领域。有关 RF 的知识已经积累了几乎一个世纪,因而形成了对于新入门的人看起来似乎是无穷尽的文献资料。

这本书讨论 RF 集成电路及系统的分析与设计。本书通过用最通俗的语言来对射频电子学进行系统介绍,首先给出从微波到通信理论的必要的背景知识,然后引入 RF 接收发送器和电路的设计。书中从 VLSI(超大规模集成电路)技术的单片实现出发,同时强调系统结构和电路级的课题。内容的处理主要集中在双极型和 CMOS(互补金属氧化物半导体)设计,但是大多数概念也可以用到其他工艺技术。我们假定读者对模拟集成电路设计以及信号与系统的理论已有了一些基本了解。

全书由 9 章组成。第 1 章给出了一般性的介绍,提出了问题,并为后续各章提供了学习的动力。第 2 章描述了 RF 与微波设计的基本概念,强调了非线性和噪声的影响。

第 3 和第 4 章把读者带到通信系统的层次上,回顾了调制、解调、多址访问技术,以及无线标准。这些内容尽管初看起来没有必要,但事实上它们对 RF 电路与系统的并发设计是不可缺少的。

第 5 章研究接收发送器的系统结构,讨论各种不同的接收器和发送器的电路拓扑结构以及它们的优劣。这一章也包括一些范例研究来说明在实际的 RF 产品中所采用的系统结构。

第 6 到第 9 章讨论 RF 基本构筑模块的设计:低噪声放大器和混频器、振荡器、频率综合器以及功率放大器。特别研究如何使片外的元件数保持到最少。这些章节的一个重要目的是演示为满足系统的要求如何去定义电路的参数,以及每个电路的性能又是如何影响整个接收发送器。

我在 UCLA(美国加利福尼亚大学洛杉矶分校)的一门 4 学分的研究生课程中曾讲授

过本书大约 80% 的内容。对于只有 10 周课的学季制,第 3,4,8 和 9 章的内容不得不被缩减;但对于学期制,这些内容可以被较仔细地讲授。

我的 RF 设计知识许多是来自和同事们的交流。贝尔实验室的 Helen Kim, Ting - Ping Liu 及 Dan Avidor, 惠普(Hewlett - Packard)公司实验室的 David Su 和 Andrew Gzegorek 在许多方面对本书的材料作出了贡献。这本书也被许多专家审阅过: Stefan Heinen(西门子), Bart Jansen(惠普), Ting - Ping Liu(贝尔实验室), John Long(多伦多大学), Tadao Nakagawa(日本电报电话公司), Gitty Nasserbakht(德州仪器公司), Ted Rappaport(弗吉尼亚理工学院), Tirdad Sowlati(Gennum), Trudy Stetzler(贝尔实验室), David Su(惠普), 以及 Rick Wesel(加州大学洛杉矶分校)。此外,许多加州大学洛杉矶分校的学生,包括 Farbod Behbahani, Hooman Darabi, John Leete, 以及 Jacob Rael“试用”了不同的章节,并且提供了有用的反馈意见。我对所有上面提到的人的热心帮助表示感谢。

我还要感谢 Prentice Hall 出版社的工作人员,尤其是 Russ Hall, Maureen Diana 及 Kerry Reardon,感谢他们的支持。

Behzad Razavi

目 录

前言	V
第 1 章 射频和无线技术简介	1
1.1 复杂性比较	1
1.2 设计瓶颈	2
1.3 应用	4
1.4 模拟与数字系统	5
1.5 工艺技术的选择	6
参考文献	7
第 2 章 RF 设计中的基本概念	8
2.1 非线性与时变性	8
2.1.1 非线性的影响	11
2.1.2 级联非线性级	17
2.2 符号间干扰	19
2.3 随机过程和噪声	22
2.3.1 随机过程	22
2.3.2 噪声	29
2.4 灵敏度与动态范围	38
2.5 无源阻抗变换	40
参考文献	41
第 3 章 调制与解调	43
3.1 概述	43
3.2 模拟调制	45
3.2.1 幅度调制	45
3.2.2 相位调制与频率调制	46
3.3 数字调制	50

3.3.1 基本概念	51
3.3.2 二进制调制	58
3.3.3 正交调制	64
3.4 调制技术的功率效率	71
3.4.1 等幅包络与变幅包络信号	71
3.4.2 频谱再增长	72
3.5 非相干解调	74
参考文献	76
第 4 章 多址访问技术和无线通信标准	77
4.1 移动射频通信	77
4.2 多址访问技术	81
4.2.1 时分和频分复用	81
4.2.2 频分多址	82
4.2.3 时分多址	83
4.2.4 码分多址	84
4.3 无线通信标准	87
4.3.1 先进移动电话服务(AMPS)	87
4.3.2 北美数字标准(NADS)	88
4.3.3 移动通信全球系统(GSM)	89
4.3.4 高通(Qualcomm)CDMA	90
4.3.5 欧洲数字无绳电话(DECT)	92
参考文献	93
第 5 章 接收发送器结构	94
5.1 概述	94
5.2 接收器结构	97
5.2.1 外差接收器	97
5.2.2 零差接收器	102
5.2.3 镜像抑制接收器	109
5.2.4 数字中频接收器	115
5.2.5 亚采样接收器	116
5.3 发送器结构	117
5.3.1 直接变换发送器	120
5.3.2 两步发送器	121

5.4	接收发送器的性能测试	122
5.5	实例研究	123
5.5.1	Motorola 调频接收器	123
5.5.2	Philips 传呼机接收器	124
5.5.3	Philips DECT 接收发送器	125
5.5.4	朗讯(Lucent)GSM 接收发送器	126
5.5.5	Philips GSM 接收发送器	127
	参考文献	128
第 6 章	低噪声放大器与混频器	131
6.1	低噪声放大器	131
6.1.1	概述	131
6.1.2	输入匹配	134
6.1.3	双极型 LNA	136
6.1.4	CMOS LNA	140
6.2	下变频混频器	142
6.2.1	概述	142
6.2.2	双极型混频器	147
6.2.3	CMOS 混频器	151
6.2.4	混频器中的噪声	153
6.3	级联级再讨论	157
	参考文献	160
第 7 章	振荡器	162
7.1	概述	162
7.2	基本的 LC 振荡器拓扑	164
7.3	电压控制(压控)振荡器	167
7.4	相位噪声	168
7.4.1	相位噪声在射频通信中的影响	168
7.4.2	振荡器的 Q 值	171
7.4.3	相位噪声机制	172
7.4.4	噪声-功率折衷关系	176
7.4.5	分频与倍频对相位噪声的影响	176
7.4.6	振荡器的牵引与推动	177
7.5	双极型与 CMOS LC 振荡器	178

7.5.1 负跨导(G_m)振荡器	178
7.5.2 插值振荡器	181
7.6 单片集成电感	182
7.7 无谐振器的压控振荡器(VCO)	184
7.8 正交信号产生	184
7.8.1 RC-CR 网络	185
7.8.2 Havens 方法	187
7.8.3 分频	189
7.9 单边带信号生成	189
参考文献	190
第 8 章 频率综合器	192
8.1 概述	192
8.2 锁相环	193
8.2.1 基本概念	193
8.2.2 基本的锁相环	196
8.2.3 电荷泵锁相环	201
8.2.4 I 型和 II 型锁相环	205
8.2.5 锁相环中的噪声	206
8.2.6 输入端的相位噪声	207
8.2.7 压控振荡器的相位噪声	207
8.2.8 倍频	209
8.3 射频频率综合器结构	209
8.3.1 整数 N 结构	210
8.3.2 分数 N 结构	215
8.3.3 双环路结构	220
8.3.4 直接数字频率综合	221
8.4 分频器	225
8.4.1 二分频电路	225
8.4.2 双模分频器	227
参考文献	229
第 9 章 功率放大器	231
9.1 概述	231
9.1.1 线性与非线性功率放大器	233

9.2 功率放大器的分类	234
9.2.1 A类和B类功率放大器	234
9.2.2 C类功率放大器	236
9.3 高效率功率放大器	237
9.4 大信号阻抗匹配	240
9.5 线性化技术	243
9.5.1 前馈	243
9.5.2 反馈	244
9.5.3 包络消除及恢复	245
9.5.4 采用非线性元件的线性放大(LINC)	247
9.6 设计实例	247
参考文献	250

第 1 章 射频和无线技术简介

一位工程师说：“这个手机用的是在 DECT - TDMA/TDD 模式下的 GFSK 方式调制以及零中频的 I/Q 检波”。他的经理问：“我们如何能将它改成也能在 DCS1800 制式下工作？”工程师回答说：“我们需要加一个天线收发转换开关，至少一个带有 SSB 混频的本机振荡器，或许还要两个 SAW 滤波器。”……

电话已经变得比先前复杂多了。射频(RF)电路也是如此。一个用手机往家打电话的普通人，多半不会知道成百上千的科学家和工程师几乎努力了整整一个世纪才使得无线技术变得用得起。他也不会知道手机的计算能力比某些早期的个人计算机的还要强。

在 1901 年，当 Marconi 成功地将无线电信号发送过大西洋时，无线技术就出现了。这个演示产生的影响和展示的前景是巨大的：用无线电波在“以太”中的传递来取代电报和电话描绘了一个令人振奋的未来。然而尽管双向无线通信在军事领域得到应用，日常生活中的无线传播仍然局限于由大型、昂贵的发射站单向发送无线电广播和电视。普通的双向电话通话几十年来一直通过电话线进行。

晶体管的发明，Shannon 信息论的发展以及蜂窝系统概念的提出——所有这一切都发生在 Bell 实验室——这些为廉价的移动通信铺平了道路。移动通信最初在汽车电话中得到实现，最终又在便携式手机中实现了。

但是为什么无线通信电子会出现突然的上升？市场调查表明，在美国每天有超过 2.8 万人加入使用手机的行列。这就激励了互相竞争的制造厂商提供具有更高性能和低成本的电话机。事实上，当前的目标是使手机的功耗和成本每年减少 30%，尽管不清楚这种速率能维持多久。然而，当双向无线通信被引入我们生活的其他方面时，例如家庭电话、计算机、传真机和电视，一个更为耀眼的前景出现了。无线通信工业界的近期目标是将无绳电话和手机结合起来，形成几乎任何地方都可使用的“无缝”通信，长期的目标是实现一个无所不能的无线终端，它能处理声音、数据、图像，以及提供计算能力。其他一些更为“奢华”的应用，诸如全球定位系统(GPS)，也会在今后的某一时候通过这个终端变成现实。个人通信服务(PCS)几乎就在眼前。

1.1 复杂性比较

为了得到一个现代 RF 设计的初步认识，首先来考虑一下如图 1.1 所示的一个简单的频率调制(FM)接收发送器系统。在图 1.1(a)中， Q_1 既作为一个振荡器又作为一个频

率调制器；即是话筒产生的音频信号改变了变容二极管 D_1 两端的偏置电压，因此调制了振荡频率。在接收路径中， Q_1 同时用作振荡器和频率解调器，在节点 X 产生音频信号。这个音频信号然后放大并加到扬声器上去。

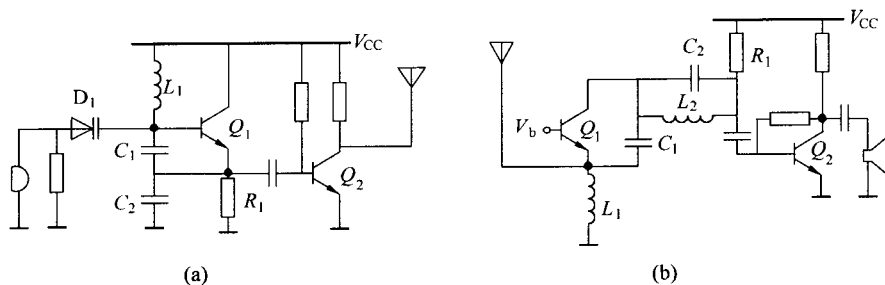


图 1.1 (a)调频发送器；(b)调频接收器

现在考虑图 1.2 的电路，即手机的 RF 部分^[1]。这个电路比图 1.1 所示的 FM 电路要复杂好几个数量级，我们将其分析推迟到第 5 章进行。为什么 RF 设计者从图 1.1 的电路演化到图 1.2 的电路？这个演变背后的思维过程是什么？这些复杂性真的必要吗？当在第 2 到第 5 章中逐渐了解 RF 通信系统、体系结构和电路设计时，这些问题将得到回答。

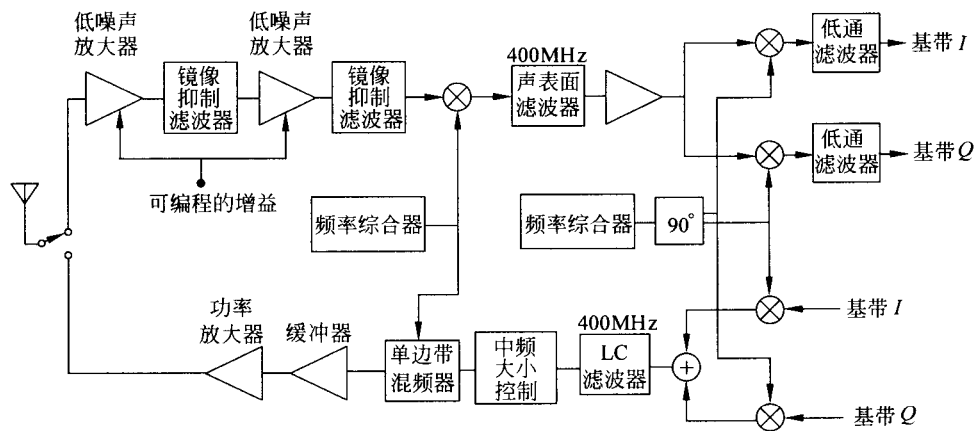


图 1.2 手机的射频(RF)部分^[1]

1.2 设计瓶颈

今天的袖珍电话(即手机)包含了一百多万个晶体管，其中只有一小部分工作在射频范