

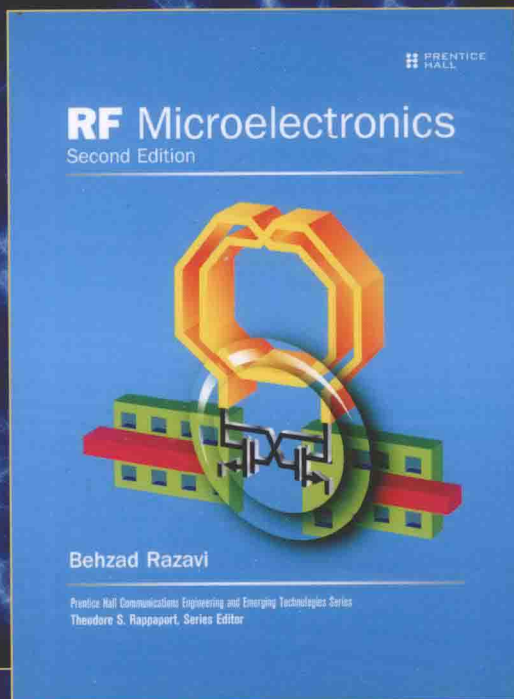
射频微电子学

(原书第2版·精编版)

[美] 毕查德·拉扎维 (Behzad Razavi) 著

邹志革 雷鑑铭 邹雪城 等译

RF Microelectronics
Second Edition



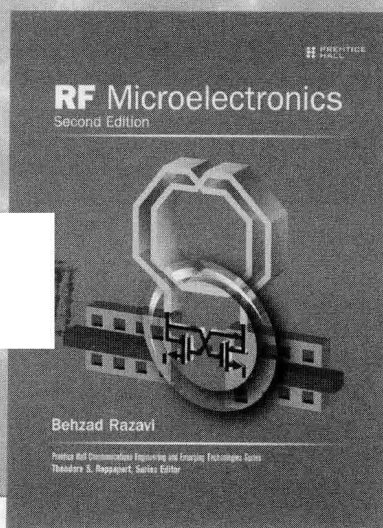
射频微电子学

(原书第2版·精编版)

[美] 毕查德·拉扎维 (Behzad Razavi) 著

邹志革 雷鑑铭 邹雪城 等译

RF Microelectronics
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

射频微电子学 (原书第 2 版·精编版) / (美) 毕查德·拉扎维 (Behzad Razavi) 著; 邹志革, 雷鑑铭, 邹雪城等译. —北京: 机械工业出版社, 2016.8

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: RF Microelectronics, Second Edition

ISBN 978-7-111-54396-1

I. 射… II. ①毕… ②邹… ③雷… ④邹… III. 射频-微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 173177 号

本书版权登记号: 图字: 01-2015-1920

Authorized translation from the English language edition, entitled RF Microelectronics, Second Edition, 9780137134731 by Behzad Razavi, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2012.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage/retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinesesimplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2016.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区和台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书全面系统地介绍了射频电路的核心原理和基础理论, 讲述了多种无线收发机结构, 以及收发机的核心模块电路, 包括低噪声放大器、无源和有源混频器、压控振荡器、无源器件、锁相环、频率合成器、功率放大器等, 最后给出了一个完整的双波段收发机的设计过程, 让读者从系统规格要求开始学习, 直至设计出晶体管级电路。

本书可作为普通高校集成电路设计与集成系统、微电子科学与工程、电子科学与技术、微电子学与固体电子学等相关专业的本科生和研究生的教材, 也可供从事射频集成电路设计的工程技术人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 王颖 张梦玲

责任校对: 董纪丽

印刷: 中国电影出版社印刷厂

版次: 2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 22

书号: ISBN 978-7-111-54396-1

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

在过去的几十年中，射频通信技术飞速发展，就像当今人们离不开电一样，人们已经离不开手机等无线通信设备，甚至有人风趣地把马斯洛需求层次理论的最基本需要扩展到了 WiFi 信号。射频集成电路设计已经成为传统模拟集成电路设计的一个重要分支。随着射频集成电路工艺和器件的不断改进，射频集成电路在电路结构、工作频率、功耗、电源电压、噪声等方面的性能有了非常大的提高。与时俱进地学习这些内容，对于开展射频集成电路设计非常有意义。

现今，中国已经成为世界上最大的手机生产国和消费国，与之不相匹配的是，手机中的核心芯片，特别是射频芯片基本上靠进口。虽然像海思、展讯等大公司在无线通信领域也取得了一定的市场份额，但国人在射频集成电路设计领域仍然没有取得重大突破，主要原因是，射频集成电路设计涉及的知识面众多，培养一个合格的射频集成电路设计工程师，至少需要花费培养普通模拟集成电路设计工程师两倍的时间。

好的教材能更好地指导设计。本书是美国 UCLA 大学拉扎维教授的第七本巨著，从理论基础和实战角度，全面、系统、深入地讲授了射频集成电路，特别是无线收发机的分析和设计方法。拉扎维教授的另外一本教材《模拟 CMOS 集成电路》是全世界范围内使用最广泛的模拟集成电路设计大学教材，是每一位微电子领域的学生必读的教材。本书延续了其一贯的写作风格，力求从读者容易理解和掌握的角度，循序渐进、言简意赅地讲述射频电路分析和设计的精髓。全书旁征博引，介绍了大量经典电路结构、实际电路的设计思路和方法。全书结构紧凑，条理清晰，一气呵成。对于拉扎维教授的教材，我们实在不知道还可以用何等华丽的词语来描述和形容。

另外，原著是一本 900 多页的大部头巨著。作者对全书的内容做了简单划分，分别适应美国长学期(Semester)和短学期(Quarter)的教学进度。本书中文版选取了原书适合短学期教学的相关章节。如果读者需要阅读和学习长学期或者全书内容，请阅读原著。

本书由华中科技大学光学与电子信息学院、华中科技大学武汉国际微电子学院超大规模集成电路与系统研究中心的邹志革组织翻译和校审，参加全书翻译和整理工作的还有雷鑑铭副教授和邹雪城教授，以及部分同学：王午悦、方丹、王振武、李斌、梅胜坤、孙帆、郝汉、胡贝贝、徐博、鲁伟康、高一凡。机械工业出版社华章分社的王颖副编审，她是《国外电子与电气工程技术丛书》的策划编辑，在本书的组织出版中给予了大力支持，对他们一并表示衷心的感谢！

当然，射频集成电路涉及面极广，而且还在不断发展，新技术、新名词、新概念层出不穷，加之译者水平有限，书中难免出现不妥或者错误，真诚希望广大读者批评指正，在此表示衷心感谢！

译者

第 2 版前言

自本书第 1 版发行的十四年来，射频集成电路设计经历了一次巨大变迁。收发器结构、电路拓扑结构以及器件结构的革新催生了高度集成化的“无线电”，使其跨越了更加广泛的应用领域。此外，新的分析方法和建模技术也大大方便了我们对射频电路及其基本原理的理解，因此有了本书第 2 版。

第 2 版不同于第 1 版的地方主要有以下几个方面：

- 我意识到，三年半前开始的对于第 1 版的简单“修补”并不能反映当今的射频微电子技术。因此，我抛开了第 1 版的内容，从全新的角度进行重新编写。两个版本只有 10% 的内容是重复的。
- 我希望第 2 版能够具有更大的教学意义，进而帮助读者能够更好地理解相关基本原理和细节。因此，在本书中，融入了大量的例子和习题。
- 我希望，除了讲授分析方法外，也讲授一些设计方法。因此，本书包含了很多十分详细的设计步骤和实例。此外，还在第 11 章专门介绍了双频 WiFi 收发机的设计方案，且深入到晶体管级电路。
- 由于射频设计方面的巨大进展，一些章节也不可避免地变长，导致有些章节需要分成两章，甚至更多。因此，第 2 版的篇幅差不多是第 1 版的 3 倍。

对教师与学生的建议

本书可供至少一个学季(Quarter，下面简称短学期)或一个学期(Semester，下面简称长学期)教学使用。而下面所列的章节，在合理的深度下，完成一个学期的教学是完全有可能的。另外，教师也可以根据学生情况和自身偏好选取其他的章节教学。

第 1 章 射频与无线技术简介

本章主要阐述了射频与无线技术的整体概貌，大约需要 0.5 学时。

第 2 章 射频设计中的基本概念

本章包括：概述、非线性的影响(AM/PM 转换部分可跳过)、噪声、灵敏度和动态范围(无源阻抗变换、散射参数以及非线性动态系统分析部分可跳过)。本章大约需要 6 学时。

第 3 章 通信技术概述

在短学期制的教学安排中，可以只介绍本章少量内容，例如模拟调制、正交调制、GMSK 调制、多址技术和 IEEE802a/b/g 标准等。而在长学期制的教学系统中，则可以引入信号星图的概念以及讲授更多的调制方案和无线标准。本章在短学期制中需要 2 学时，而在长学期制中则需要 3 学时。

第 4 章 收发机结构

本章篇幅较长，应有选择性地教学。短学期制可以包括以下部分：概述、基本和现代外差接收机、直接变频接收机、镜像抑制接收机和直接变频发射机。在长学期制的教学中，还可以包含低中频接收机和外差发射机的内容。短学期制中本章需要 8 学时，而长学期制中则需要 10 学时。

第 5 章 低噪声放大器

本章包括：概述、输入匹配问题和低噪声放大器件的拓扑结构。在长学期制的教学中可以包含增益切换、频段切换或者高 IP₂ 低噪声放大器(LNA)。短学期制中本章需要 6 学

时，而长学期制中则需要 8 学时。

第 6 章 混频器

本章包括：概述、无源下变频混频器（电压驱动采样混频器的噪声和输入阻抗的计算部分可以跳过）、有源下变频混频器和高 IP_2 有源变频混频器。在学期制的教学中，还可以包含增强型跨导有源混频器、低噪声有源混频器和上变频混频器的相关内容。短学期制中本章需要 8 学时，而长学期制中则需要 10 学时。

第 7 章 无源器件

本章不适合用于短学期制教学。在长学期制中，可以安排 3 学时讲解电感基本的结构、损耗机制以及 MOS 变容二极管。

第 8 章 振荡器

本章篇幅较长，应有选择性地教学。本章教学至少应包含以下内容：基本原理、交叉耦合振荡器、压控振荡器和低噪声压控振荡器。在短学期制的教学中，可以不必花时间讲授相位噪声，而在长学期制中，相位噪声的两种分析方法则都是可以讲授的。短学期制中本章需要 6 学时，而长学期制中则需要 8 学时。

第 9 章 锁相环

本章内容为频率合成器的基础。事实上，如果详细教学的话，本章后会很自然地接整数 N 频率合成器，而在短学期制的教学中，下一章是可以跳过的。本章至少应讲述以下部分：基本概念、I 型锁相环、II 型锁相环和 PFD/CP 非理想特性。在长学期制中还可以包含锁相环的相位噪声和设计流程。短学期制中本章需要 4 学时，而长学期制中则需要 6 学时。

第 10 章 整数 N 频率合成器(本书中未收录此章)

本章内容在短学期制中可以省略，而在长学期制中可以花费 4 学时来讲授英文版第 2 版第 10 章的降噪技术和分频器的设计。

第 11 章 小数 N 频率合成器(本书中未收录此章)

本章内容在短学期制中可以省略，而在长学期制中可以花费 4 个学时来讲授英文版第 2 版随机性和噪声整形，其他部分则可以跳过。

第 12 章 功率放大器(本书第 10 章)

本章篇幅较长但又往往为了讲解其他章节而被省略。当真的需要时，可以讲授本章的以下内容：概述、功率放大器的分类、高效功率放大器、共源共栅级和基本的线性化方法。这些内容大约需要 4 学时。长学期制还可以用另外 4 学时讲授多尔蒂功率放大器、极化调制以及异相等相关内容。

第 13 章 收发机设计实例(本书第 11 章)

本章给出了双波段收发机的设计步骤。在讲授过程中，可以跳过第 5、6、8 章中最新类型的例子而为本章内容讲解留出充足的时间。另外，系统层面的推导也需要跳过，而对于接收机、发射机以及合成器晶体管级的设计则需要安排 4 学时。

Behzad Razavi

2011 年 7 月

第1版前言

统计数据显示,手机每年的全球销售额已超过25亿美元,而国内卫星网络已拥有450万个用户以及25亿美元的资产。全球定位系统的市值在2000年达到50亿美元。1998年,欧洲的移动通信设备和服务销售额将会达到30亿美元。

射频(RF)与无线市场的扩张速度已经到了令人难以想象的地步。寻呼机、手机、无绳电话、光缆调制解调器以及射频识别标签等设备,已经逐渐从当初的奢侈品变成了生活中不可或缺的工具,渗透到了日常生活的方方面面。数据统计发现,半导体和系统公司,无论大小,无论是模拟还是数字,都在通过各种射频产品提升它们的市场份额。

射频设计的独特之处在于其借鉴了与集成电路无关的许多学科。射频知识库发展了近一个世纪,但对于初学者来说仍然看不到尽头。

本书主要阐述了射频集成电路和系统的分析与设计。用类似于教程的语言,对射频微电子学做了一个系统阐述后,本书首先从微波和通信理论的必要背景出发,逐渐进入射频收发器和电路设计的讲解。本书重点介绍了在VLSI技术整体实施过程中电路与结构的问题,其中最主要的问题在于双极性和CMOS的设计,但是大部分的概念也同样可以应用于其他的技术中。本书假定读者已经具有一定的模拟集成电路设计和信号与系统的理论基础。

第1版共分为9章。第1章为绪论,提出问题为后续章节做铺垫。第2章介绍了射频和微波设计的基本概念,重点阐述了非线性和噪声的影响。

第3章、第4章介绍了通信系统层面的相关内容,给出了调制、检测、多址技术的理论概述以及无线标准。本部分虽然基础,但对于同时开展射频电路和系统的设计至关重要。

第5章论述了收发机结构,给出了不同接收机与发射机的拓扑结构及各自的优缺点。本章还包括了大量的案例研究,用于解释实际射频产品中所采用的方法。

第6~9章介绍了射频电路模块的设计,包括低噪声放大器、混频器、振荡器、频率合成器和功率放大器几个部分,需特别注意的是,应尽量减少片外元器件的数量。本章一个重要的目的是论证如何用系统的需求定义电路的参数,以及每个电路的性能是如何影响收发机整体性能的。

在加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)的4学分研究生课程中,我用讲授了全书80%的内容。如果是10周的短学期制,本书的第3、4、8和9章的课时则需要缩短,但在长学期制中,就可以介绍更多的内容。

我的射频电路设计知识大部分来自于和同事的交流与合作。其中,贝尔实验室的Helen Kim、Ting-Ping Liu和Dan Avidor以及Hewlett-Packard实验室的David Su和Andrew Gzegorek为本书的资料收集做出了巨大贡献并给予了全面帮助。同时,还有许多专家也参与了本书的审校,他们是Stefan Heinen(西门子)、Bart Jansen(Hewlett-Packard)、Ting-Ping Liu(贝尔实验室)、John Long(多伦多大学)、Tadao Nakagawa(NTT)、Gitty Nasserbakht(德州仪器)、Ted Rappaport(Virginia Tech)、Tirdad Sowlati(Gennum)、Trudy Stetzler(贝尔实验室)、David Su(Hewlett-Packard)和Rick Wesel(UCLA)。此外,加利福尼亚大学洛杉矶分校的许多学生,包括Farbod Behbahani、

Hooman Darabi、John Leete 和 Jacob Rae 等也参与了本书各章节的教学效果实验，并反馈了大量有价值的信息。在此，我要真诚地感谢上述所有人员的慷慨相助。

最后我还要感谢 Prentice Hall 的每一位工作人员，特别是 Russ Hall、Maureen Diana，以及 Kerry Riordan，感谢他们的大力支持。

Behzad Razavi

1997 年 7 月

致 谢

在本书的编写、审阅以及出版阶段，我有幸得到了许多人的支持。在此，我想对他们表达我最真诚的感谢。

虽然经过了多轮的编辑和修改，但本书仍然有可能存在没被作者发现的错别字或细微错误。有时候，一个在作者看来清楚明了的解释，对读者来说却晦涩难懂。并且，有时候作者也可能会遗漏掉某个重点或者最新的发展成果。因此，其他人员的审阅变得十分必要。

下列人员对本书各个章节进行了详细的检查，指出了我的错误并提出了宝贵意见。

Ali Afsahi(Broadcom)	Elvis Mak(University of Macau)
Pietro Andreani(Lund University)	Rabih Makarem(Atheros)
Ashkan Borna(UC Berkeley)	Rui Martins(University of Macau)
Jonathan Borremans(IMEC)	Andrea Mazzanti(University of Pavia)
Debopriyo Chowdhury(UC Berkeley)	KarthikNatarajan (University of Washington)
Matteo Conta(Consultant)	Nitin Nidhi(UCLA)
Ali Homayoun(UCLA)	Joung Park(UCLA)
Velntinadel Lattorre(Consultant)	Paul Park(Atheros)
JaneGu(University of Florida)	Stefano Pellerano(Intel)
Peng Han(Beken)	Jafar Savoj(Xilinx)
Pavan Hanumolu(Oregon State University)	ParmoonSeddighrad (University of Washington)
Daquan Huang(Texas Instruments)	Alireza Shirvani(Ralink)
Sy-Chyuan Hwu(UCLA)	Tirdad Sowlati(Qualcomm)
Amin Jahanian(UCI)	Francesco Svelto(University of Pavia)
Jithin Janardhan(UCLA)	Enrico Temporiti(ST Microelectronics)
Shinwon Kang(UC Berkeley)	Federico Vecchi(University of Pavia)
ImanKhajenasiri (Sharif University of Technology)	Vijay Viswam(Lund University)
Yanghyo Kim(UCLA)	Vidojkovic Vojkan(IMEC)
Abbas Komijani(Atheros)	Ning Wang(UCLA)
Tai-Cheng Lee(National Taiwan University)	Weifeng Wang(Beken)
Antonio Liscidini(University of Pavia)	Zhi Gong Wang(Southeast University)
Shen-Iuan Liu(National Taiwan University)	Marco Zanuso(UCLA)
Xiaodong Liu(Lund University)	Yunfeng Zhao(Beken)
Jian Hua Lu(UCLA)	Alireza Zolfaghari(Broadcom)
Howard Luong(Hong Kong University of Science and Technology)	

感谢他们热情、有组织、有重点的评阅工作。

本书的顺利出版得益于 Prentice Hall 工作人员的熟练策划，特别是 Bernard Goodwin 和 Julie Nahil，对两人表示感谢。

和我写其他书一样，在我撰写第 2 版的这 3 年半时间里，我的妻子 Angelina 一直在无私地帮助我，非常感激她。

作者简介

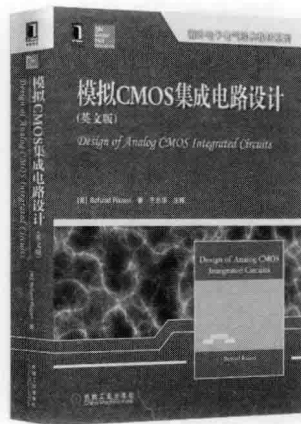
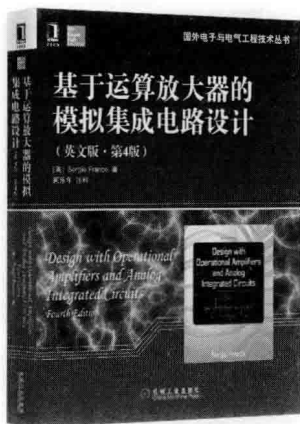
Behzad Razavi, 1985 年获得谢里夫科技大学电子工程学士学位, 1988 年与 1992 年分别获得斯坦福大学电子工程硕士和博士学位, 在 AT&T 贝尔实验室和 Hewlett-Packard 实验室工作至 1996 年。自 1996 年开始, 他担任 UCLA 电子工程系副教授, 随后晋升为教授。目前, 他的研究领域主要包括无线收发机、频率合成器、高速数据通信的锁相与时钟恢复以及数据转换器。

1992~1994 年, Razavi 教授还在普林斯顿大学任兼职教授, 而 1995 年在斯坦福兼职。1993~2002 年在国际固态电路会议 (ISSCC) 技术程序委员会任职, 并出席了 1998~2002 年的超大规模集成电路 (VLSI) 研讨会。除此之外, 他还担任了《IEEE Journal of Solid-State Circuits》《IEEE Transactions on Circuits and Systems》和《International Journal of High Speed Electronics》的客座编辑与副主编。

在 1994 年 ISSCC 上, Razavi 教授获得了 Beatrice 最佳主笔奖; 同年在 ESSCC 上, 获得最佳论文奖; 1995 年和 1997 年在 ISSCC 上获得最佳专题小组奖; 1997 年获得 TRW 创新教学奖; 1998 年在 IEEE 的 CICC 上获得最佳论文奖; 2001 年获得 McGraw-Hill 首版年度奖。同时, 他也是 2001 年 ISSCC 的 Jack Kilby 优秀学生论文奖和 Beatrice 最佳主笔奖的共同得主。他曾获得 2006 年洛克希德马丁杰出教学奖, 2007 年 UCLA 教师评议会的杰出教学奖, 2009 年 CICC 的最佳邀请论文奖。此外, 他还被公认为 ISSCC 50 年历史中十位最佳作者之一。2012 年, 他还获得了固态电路的 IEEE Donald Pederson 奖。

Razavi 教授是 IEEE 的特聘讲师、IEEE Fellow (会士), 以及《Principles of Data Conversion System Design》、《RF Microelectronics, First Edition》(被翻译成中文、日文、韩文)、《Design of Analog CMOS Integrated Circuits》(被翻译成中文、日文、韩文)、《Design of Intergrated Circuits for optical Communications》、《Fundamentals of Microelectronics》(被翻译成韩语和葡萄牙语)的作者。除此之外, 他还是《Monolithic Phase-Locked Loops》和《Clock Recovery Circuits and Phase-Locking in High-Performance Systems》的编辑。

推荐阅读



基于运算放大器的模拟集成电路设计（英文版·第4版）

作者：Sergio Franco ISBN：978-7-111-48933-7 出版时间：2015年1月 定价：99.00元

本书着重理论和实际应用相结合，重点阐述模拟电路设计的原理和技术直观分析方法；主要包括运算放大器的基本原理和应用、涉及运算放大器的静态和动态限制、噪声及稳定性问题等诸多实际问题，以及面向各种应用的电路设计方法三大核心内容，强调物理思想，帮助读者建立电路设计关键的洞察力，可作为电子信息、通信、控制、仪器仪表等相关专业本科高年级及研究生有关课程的教材或主要参考书，对电子工程师也是一本实用的参考书。

模拟电路设计：分立与集成（英文版）

作者：Sergio Franco ISBN：978-7-111-48932-0 出版时间：2015年1月 定价：119.00元

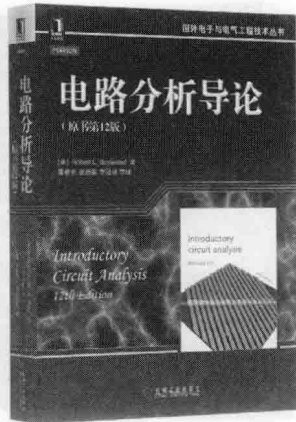
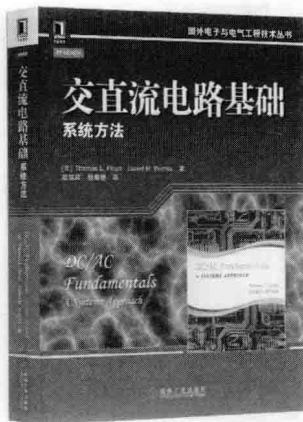
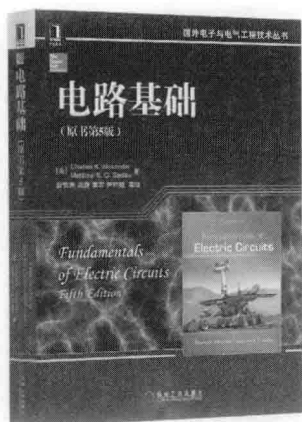
本书是针对电子工程专业且致力于将模拟电子学作为自身事业的学生和集成电路设计工程师而准备的，前三章介绍二极管、双极型晶体管和MOS场效应管，注重较为传统的分立电路设计方法，有助于学校通过物理洞察力来掌握电路基础技术；后续章节介绍模拟集成电路模块、典型模拟集成电路、频率和时间响应、反馈、稳定性和噪声等集成电路内部工作原理（以优化其应用）。本书涵盖的分立与集成电路设计内容，有助于培养读者的芯片设计能力和电路板设计能力。

模拟CMOS集成电路设计（英文版）

作者：Behzad Razavi ISBN：978-7-111-43027-8 出版时间：2013年8月 定价：79.00元

本书介绍模拟CMOS集成电路的分析与设计。从直观和严密的角度阐述了各种模拟电路的基本原理和概念，同时还阐述了在SOC中模拟电路设计遇到的新问题及电路技术的新发展。本书由浅入深，理论与实际结合，提供了大量现代工业中的设计实例。全书共18章。前10章介绍各种基本模块和运放及其频率响应和噪声。第11章至第13章介绍带隙基准、开关电容电路以及电路的非线性和失配的影响，第14、15章介绍振荡器和锁相环。第16章至18章介绍MOS器件的高阶效应及其模型、CMOS制造工艺和混合信号电路的版图与封装。本书可供与集成电路领域有关的各电类专业的高年级本科生和研究生使用，也可供从事这一领域的工程技术人员自学和参考。

推荐阅读



电路基础（原书第5版）

作者：（美）Charles K. Alexander 等 译者：段哲民 等 ISBN: 978-7-111-47088-0 定价：129.00元

本书是电类各专业“电路”课程的一本经典教材，被美国众多名校采用，是美国最有影响力的“电路”课程教材之一。本书每章开始增加了中文“导读”，适合用做高校“电路”课程双语授课或英文授课的教材。本书前4版获得了极大的成功，第5版以更清晰、更容易理解的方式阐述了电路的基础知识和电路分析方法，并反映了电路领域的最新技术进展。全书总共包括2447道例题和各类习题，并在书后给出了部分习题答案。

交直流电路基础：系统方法

作者：（美）Thomas L. Floyd 译者：殷瑞祥 等 ISBN: 978-7-111-45360-4 定价：99.00元

本书是知名作者Floyd的最新力作，在国外被广泛使用。本书系统介绍了直流和交流电路理论，强调直流/交流电路基本概念在实际系统中的应用。全书丰富的实例，有助于学生的理解系统模块、接口和输入/输出信号之间的关系。书中实例使用Multisim进行仿真，并提出在模拟电路与系统和排除故障中存在的问题及解决方法。本书可作为电子信息、电气工程、自动化等电类专业的电路课程教材。

电路分析导论（原书第12版）

作者：（美）Robert L. Boylestad 译者：陈希有 等 ISBN: 978-7-111-45359-8 定价：135.00元

本书是一本在国际上有着持续而广泛影响的优秀教材，深入浅出、通俗易懂，理论分析与工程应用相结合，体现教材面向工程教育的特色。书中例题讲解步骤详细、过程清晰，主要内容包括：电流与电压、欧姆定律、直流电路、网络定理、磁路、正弦交流电路、谐振、分贝与滤波器、变压器、脉冲波形和RC电路的响应、多相电路、非正弦电流电路，以及系统的端口分析等。本书可作为高等院校电路课程教材或教学参考书，尤其适合案例教学和工程应用型教学。此外，对工程技术人员和电路爱好者也具有重要的参考价值。

出版者的话	
译者言	
第2版前言	
第1版前言	
致谢	
作者简介	
第1章 射频和无线技术简介	1
1.1 无线的世界	1
1.2 射频电路设计的挑战	2
1.3 概述与总结	2
参考文献	4
第2章 射频设计中的基本概念	5
2.1 概述	5
2.2 非线性的影响	9
2.3 噪声	21
2.4 灵敏度和动态范围	35
习题	38
参考文献	40
第3章 通信技术概述	41
3.1 概述	41
3.2 模拟调制	42
3.3 数字调制	46
3.4 移动射频通信	55
3.5 多址技术	58
3.6 无线标准	62
习题	66
参考文献	67
第4章 收发机结构	68
4.1 概述	68
4.2 接收机结构	71
4.3 发射机结构	104
习题	116
参考文献	118
第5章 低噪声放大器	119
5.1 总体考虑因素	119
5.2 输入匹配问题	124
5.3 LNA 拓扑结构	126
5.4 增益切换	149
5.5 频带切换	153
5.6 高 IP_2 LNA	154
5.7 非线性计算	161
习题	166
参考文献	167
第6章 混频器	168
6.1 混频器概述	168
6.2 无源下变频混频器	175
6.3 有源下变频混频器	179
6.4 改进型混频器拓扑结构	193
习题	198
参考文献	199
第7章 无源器件	200
7.1 概述	200
7.2 电感	201
7.3 可变电容	224
习题	228
参考文献	228
第8章 振荡器	230
8.1 性能参数	230
8.2 基本原理	233
8.3 交叉耦合振荡器	238
8.4 三点式振荡器	242
8.5 压控振荡器	243
8.6 具有宽调频范围的 LC 压控 振荡器	247
8.7 设计流程	254
8.8 本振接口	256
8.9 压控振荡器的数学模型	258
8.10 正交振荡器	260
习题	265
参考文献	265
第9章 锁相环	267
9.1 基本概念	267
9.2 I型锁相环	269
9.3 II型锁相环	275

9.4 PFD/CP 的非理想特性	284	习题	315
习题	291	参考文献	315
参考文献	292	第 11 章 收发机设计实例	317
第 10 章 功率放大器	293	11.1 接收机设计	317
10.1 概述	293	11.2 发射机设计	325
10.2 功放的分类	298	11.3 频率合成器的设计	330
10.3 高效率功放	304	习题	339
10.4 共源共栅输出级	308	参考文献	340
10.5 基本的线性化技术	310		

首先，比较两款为手机设计的射频收发机：

“A 2.7-V GSM RF Transceiver IC”^[1] (1997 年出版)

“A Single-Chip 10-Band WCDMA/HSDPA 4-Band GSM/EDGE SAW-Less CMOS Receiver with DigRF 3G Interface and 190-dBm IIP₂”^[2] (2009 年出版)

为什么后者比前者复杂得多呢？是因为后者具有比前者更优的性能，还是因为仅仅具有更强大的功能？哪一款的成本更高？哪一款的功耗更高？GSM、WCDMA、HSDPA、EDGE、SAW 以及 IIP₂ 这些缩写代表着什么？为什么要关注它们？

在过去的 20 年中，射频通信领域飞速发展，与日常生活的关系日趋密切。如今，手机可以作为百科全书、购物终端、GPS 导航或者温度监测器，而这一切都要归功于其中的无线通信设备。我们还可以在不束缚病人行动自由的情况下，通过无线通信设备来监测病人大脑或心脏活动并将信息无线传输到数据中心。同时还可使用射频设备来定位商品、宠物、家畜、孩童以及罪犯。

1.1 无线的世界

如今，无线通信已经像“电”一样普及到了日常生活中。也许现在冰箱和烤炉中还没有使用无线设备，但可以预见的是，将来家里必定会包含一个可以控制所有设备和家电的无线网络。高速无线网络可实现笔记本电脑、数码相机、便携式摄像机、手机、打印机、电视、微波炉等之间的无缝连接，比如通过 WiFi 和蓝牙连接。

无线通信是如何“接管”这个世界的呢？很多因素的共同作用导致了这种爆炸性的增长。无线通信流行的最主要原因是电子产品的成本大幅减少。如今，手机的成本和十年前的基本持平，但是提供了更多的功能和特性，例如不同的频段和通信模式、WiFi、蓝牙、GPS、计算、存储、数码照相机以及友好的交互界面。功能和特性的丰富源于集成，也就是尽量多的功能可以同时同一片芯片上实现，或者说，尽量少的功能需要片外实现。这种集成能力的增强很大程度上归功于超大规模集成电路工艺，尤其是 CMOS 工艺尺寸的等比例缩小，以及射频结构、电路和器件的创新。

随着集成度的提升，射频电路的性能也得到了很大程度的提高。例如，对于某给定的功能，其所需的功耗在不断减小，而射频电路的工作速度却在不断提高。图 1.1 描述

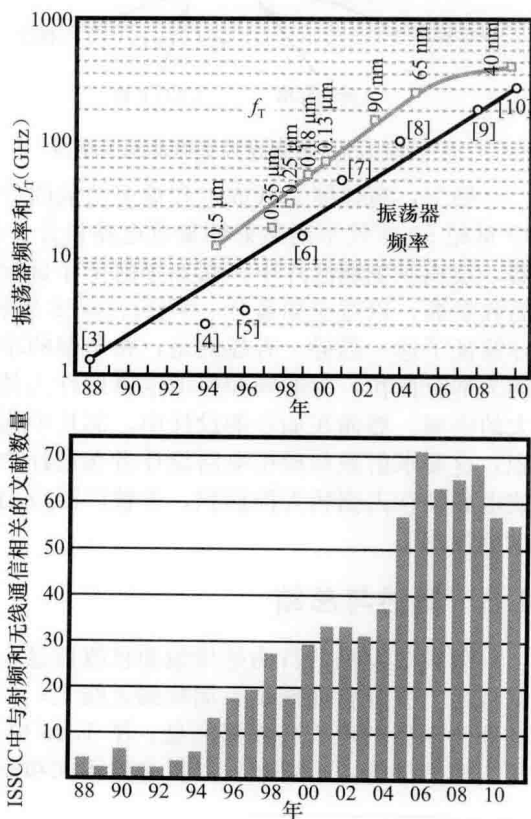


图 1.1 射频电路和技术的发展趋势

了过去 20 年间射频集成电路和技术的发展趋势。CMOS 器件的特征尺寸从 $0.5\mu\text{m}$ 减小到了 40nm ，NMOS 器件的传输频率 f_T^\ominus 从 12GHz 增长到几百 GHz，同时，射频振荡器的频率从 1.2GHz 增长到 300GHz 。图 1.1 还显示了每年国际固态电路 (ISSCC) 会议收录的与射频和无线通信相关的文献数量，同样揭示了射频领域近年来的飞速发展。

1.2 射频电路设计的挑战

尽管射频及微波理论的研究已有许多年的历史，并在近 20 年来射频集成电路设计经历了飞速发展，但在射频集成电路和收发机的设计、实现方面仍存在很大挑战，这有 3 个原因：第一，如图 1.2 所示，射频集成电路的设计涉及众多学科，需要电路设计者对很多看起来与集成电路设计无关的领域同样具有较为深入的理解。其中的大多数领域都已有超过半个世纪的研究历史，庞大的知识量对于射频电路设计者来说是很大的挑战。本书的目标之一就是将从这些学科中提炼出必要的知识背景呈现给读者。

第二，射频电路和收发机的设计必须权衡考虑各类性能参数之间的折中关系，图 1.3 总结了射频设计的“六边形”原则。例如，为了降低前端放大器的噪声，必须消耗更大的功率，或者牺牲电路的线性度。本书后续章节将会介绍如何在设计中考虑这些参数之间的折中关系。

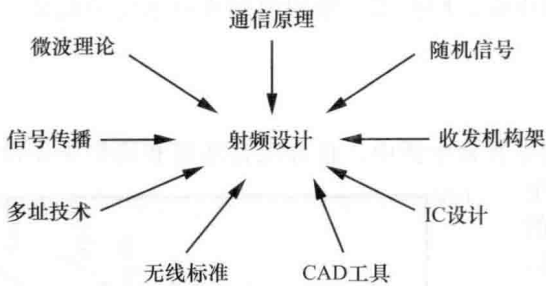


图 1.2 射频设计必需的相关学科

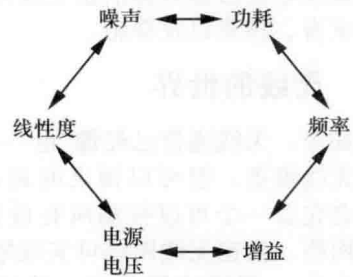


图 1.3 射频设计六边形原则

第三，高性能、低成本和更多功能的设计要求不断给射频电路设计提出新的挑战。在 20 世纪 90 年代早期的射频集成电路设计，是将一个收发机或者再加上一个数字基带处理器，集成在单颗芯片中。而如今的工作目标则是，在一个芯片上集成多个工作在不同频段的收发器，以适应如蓝牙、WiFi、GPS 等不同的通信标准。本章开头提到的两篇论文正好验证了这一趋势。有趣的是，在早期的单频段收发机系统中，数字基带处理器占据芯片的大部分面积，为射频和模拟电路设计人员在电路、设备拓扑结构的选择上提供了一个较大的空间。然而在如今的设计中，芯片中集成的多个收发器占据了比基带处理器更大的面积，这要求射频和模拟电路设计者在设计中要更多地考虑面积消耗的问题。例如，片上螺旋电感往往占据较大的面积，曾被广泛应用于早期的收发机系统中，而现今的设计中却很少会用到它。

1.3 概述与总结

射频收发机的目的是传输和接收信息。图 1.4a 给出了 1) 发射机 (TX) 处理声音或者数据信号，并且将处理结果加载到天线上；2) 接收机感应到天线捕捉到的信号，并将该信号还原为原始的声音或数据信息。图 1.4a 中，每一个黑色方框都包含着很多功能，可从中得出两点结论：① 射频发射机必须用大功率驱动天线，从而保证发射信号足够强，以便能

[⊖] 即 MOS 管的本征频率，定义为小信号电流增益降低到 1 时的 MOS 管工作频率。