

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

# CMOS射频集成电路 分析与设计

## Analysis and Design of CMOS RF Integrated Circuits

池保勇 余志平 石秉学 编著

Chi Baoyong Yu Zhiping Shi Bingxue

清华大学出版社



清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

# CMOS射频集成电路 分析与设计

## Analysis and Design of CMOS RF Integrated Circuits

池保勇 余志平 石秉学 编著

Chi Baoyong Yu Zhiping Shi Bingxue

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书以实现一个完整的无线收发机射频前端为主线,按照“射频电路基础—射频电路元器件—无线收发机系统结构—射频模块电路分析与设计—后端设计与混合信号集成—无线收发机实例”的结构编写。本书力图面向实际应用,在介绍清楚基本概念的基础上,着重讨论在集成射频前端框架下各模块电路的设计方法及提高性能的措施。

全书共15章,第1~4章介绍了射频电路基础,第5~6章讨论了射频集成电路常用的元器件,第7章讨论了无线收发机射频前端的系统结构,第8~13章讨论了主要射频电路模块的分析与设计问题,第14章介绍了射频集成电路的后端设计及混合信号集成问题,最后一章给出了一个无线接收机模拟前端实现的实例。

本书自成体系,便于自学,可以用作高等学校工科微电子、无线电、通信与电子系统等专业高年级本科生或研究生的教材,也可作为射频电路或无线通信系统工程技术人员参考书。

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

CMOS 射频集成电路分析与设计/池保勇,余志平,石秉学编著. —北京:清华大学出版社,2006.11

(清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列)

ISBN 7-302-13759-5

I. C… II. ①池… ②余… ③石… III. ①射频电路:集成电路—电路分析 ②射频电路:集成电路—电路设计 IV. TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第105273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

组稿编辑: 王一玲

文稿编辑: 刘 彤

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

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: 43.25 字数: 913千字

版 次: 2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-13759-5/TN·355

印 数: 1~3000

定 价: 59.00元

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任： 郑大钟

副 主 任： 蔡鸿程 邓丽曼 胡事民 任 勇 章 征  
王希勤 王 雄 余志平

编 委： 高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵  
萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里  
郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书： 王 娜

责任编辑： 马瑛珺 王一玲 陈国新 邹开颜

# 出版说明

---

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

# 前言

## Preface

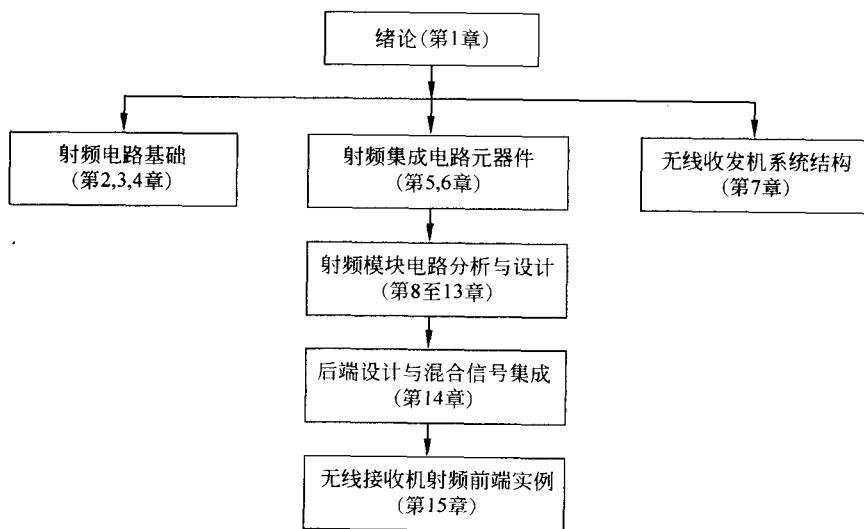
近年来,无线通信技术及其应用得到了非常迅速的发展。数字编码及数字信号处理的引入是推动无线通信技术发展的原动力。高性能、低成本的 CMOS 工艺的进步,使得芯片上单位面积内可以集成越来越多的数字功能,从而可以采用复杂的编解码和调制解调算法,获得高性能的无线通信。无线通信的飞速发展给无线收发机射频前端的设计带来了许多挑战。射频前端是天线和无线收发机后端基带处理器之间的接口。它需要检测在 GHz 频段的微弱接收信号( $\mu\text{V}$  量级),同时还要在相同的频段发射大功率的射频信号(可高达 2W)。这需要高性能的射频前端电路,例如低噪声放大器、变频器、功率放大器、滤波器、频率合成器等。在天线和基带处理器之间,射频前端电路完成将信号从一个频带搬到另一个频带的功能。高性能、低功耗和低成本是射频前端电路的设计目标。在 GHz 频段要实现高性能、低功耗、低成本的电路是相当困难的,这使得射频前端设计成了无线收发机设计的一个瓶颈。

采用分立元件来实现无线收发机射频前端使得价格居高不下,系统体积也非常庞大,这是与人们的需求相矛盾的。随着工艺技术和集成电路设计技术的发展,实现集成化的无线收发机射频前端已经有了可能。考虑到绝大多数无线收发机的基带处理器都是采用 CMOS 工艺实现的,射频前端也应采用 CMOS 工艺来实现,以便最终将射频前端和基带处理器集成在同一块芯片上,实现单芯片的收发机。而目前随着深亚微米技术的发展,CMOS 晶体管的特征频率不断提高,CMOS 工艺已经可以满足或者接近满足射频集成电路的需要。

现在,许多大学和工业界的研究组都在进行射频集成电路的研究,采用 CMOS 工艺实现的射频集成电路产品越来越多,功能也越来越复

杂,CMOS 射频集成电路开始进入真正的产品开发阶段。与这一阶段相适应,工业界对射频集成电路设计人才具有巨大的需求,而且在不久的将来该需求还会逐渐增加。为了加快射频集成电路人才的培养,国内迫切需要一本较好的射频集成电路教材。本书正是在这样的背景下完成的。它以实现一个完整的无线收发机射频前端为主线,按照“射频电路基础—射频电路元器件—无线收发机系统结构—射频模块电路分析与设计—后端设计与混合信号集成—无线收发机实例”的结构编写。在编写过程中,编者力图面向实际应用,在介绍清楚基本概念的基础上,着重讨论在集成射频前端框架下各模块电路的设计方法以及提高性能的措施。书中讲述的主要概念和方法都尽量通过具有实际应用价值的设计实例加以解释和说明,并以较大篇幅介绍了它们的求解方法,使读者能够举一反三,独立解决 CMOS 射频集成电路设计中的实际问题。通过本书的学习,读者可以进行基本的射频集成电路设计,并对无线收发机射频前端结构选择以及模块划分、性能指标分配等初步了解。编写本书的另一个目的是对目前为止出现的射频电路设计技术进行总结,供读者进一步研究之用。因此本书的内容力图反映射频集成电路领域的最新进展,在内容上包括了很多先进的射频集成电路设计技术。本书涉及面比较宽,作为一本教材,并非所有内容都要在课内讲授,使用本教材的教师可结合实际需要对本书内容进行适当的裁减,灵活选取授课内容。

全书共分为 15 章,全书结构如下图所示。



第 1 章是绪论。介绍射频电路的发展历史,讨论无线通信系统的组成、射频电路在系统中的作用与地位、射频电路与微波电路和低频电路的关系及其应用领域。

第 2 章讨论了线性射频电路的基本特性和分析方法。首先讨论了传输线的基本特性;接着引入线性射频电路的基本分析工具 Smith 圆图;然后讨论了描述线性射频电路性



能的基本参数( $S$ 参数)以及应用 $S$ 参数来分析线性网络的方法;最后介绍了无源分立集总参数元件应用于射频电路时可能出现的寄生效应及其等效模型。

第3章讨论无源 $RLC$ 网络的基本特性、阻抗匹配的概念以及实现阻抗匹配的方法。首先讨论了无源 $RLC$ 网络的基本特性;然后讨论了串并联阻抗等效互换以及回路抽头时的阻抗变换,这些简单的变换关系在射频集成电路的设计中经常用到;最后讨论了阻抗匹配的概念以及 $L$ 匹配、 $\Pi$ 匹配、 $T$ 匹配、微带线匹配的原理以及设计方法,这些匹配是射频集成电路设计或者测试中最常用到的阻抗匹配类型。

第4章介绍了衡量射频电路性能的各种参数并讨论如何从系统描述推导出射频前端的性能描述;紧接着讨论了射频电路的仿真问题并介绍了几种商用射频电路仿真软件;最后对CMOS射频集成电路实现的难点进行了简单评述。

第5章介绍了射频集成电路中常用无源元件(包括电阻、电容和电感)的结构,分析了这些元件的寄生效应,并讨论了它们的仿真模型和性能优化问题。考虑到容抗管在射频电路中有很重要的应用,本章也讨论了各种结构容抗管的特性。

第6章介绍了射频集成电路中常用的两种有源器件(MOS晶体管和双极晶体管)的基本特性。在介绍清楚晶体管的直流工作特性以及各种短沟效应对晶体管 $I-V$ 曲线的影响后,着重讨论了晶体管的高频工作特性、交流小信号等效模型、噪声模型和射频晶体管模型。

第7章集中讨论了射频前端各种系统结构的优缺点,CMOS集成电路实现时所面临的主要问题及其解决办法,并分析了射频前端在系统结构上的发展趋势。

第8章讨论了低噪声放大器的设计问题。首先介绍了两端口网络的噪声分析,这是进行低噪声放大器设计的基础;然后讨论了低噪声放大器的拓扑结构;接着介绍了使用源筒并电感的共源低噪声放大器的设计和优化问题,通过引入等高线设计法来系统地设计满足性能指标和设计限制的低噪声放大器,使用源筒并电感的共源放大器是最常用的低噪声放大器结构,因此对它作了重点介绍;然后对目前的研究热点——宽带低噪声放大器电路进行了简单讨论;最后通过介绍微波晶体管放大器的设计方法引入了若干重要的概念,这些概念有助于我们理解集成射频放大器的设计和优化问题。

第9章集中讨论了集成射频混频器设计过程中所遇到的各种问题。首先介绍了混频过程的基本原理,说明任何非线性元件都可以作为混频器来使用,但从输出频谱的纯净度上考虑,二阶非线性元件是最合适的混频元件;接着介绍了衡量混频器性能的主要指标;然后对无线收发机中最常使用的有源混频器结构进行了详细讨论,分析了它的转换增益、噪声性能和线性度性能,给出了设计混频器时要考虑的各种设计因素,并介绍了几种改进混频器性能的技术;最后讨论了其他常用的混频器结构,包括电位混频器、无源混频器和亚采样混频器,它们都具有较高的线性度,但其他方面的性能较差,限制了它们的广泛应用。混频器是一个非线性时变电路,混频过程是一个本振信号控制的周期性稳态过程,具有与线性电路完全不同的特点。考虑到这一点,本章还引入了周期性稳态电路的分析方

法,该分析方法也可应用于分析其他的周期性稳态电路(如振荡器电路等)。

第 10 章集中讨论了射频功率放大器的分析和设计问题。首先介绍了晶体管的非线性模型,它是分析功率放大器非线性的基础;然后介绍了负载线设计技术和 Loadpull 理论,并引入衡量功率放大器性能的参数;以此为基础,分析了传统功率放大器和开关模式功率放大器的工作原理和设计技术,前者效率较低,但线性度相对较好,而后者是一个高效率的非线性放大器;然后介绍了采用 CMOS 工艺来实现集成功率放大器所面临的挑战及解决方案;最后简单介绍了功率放大器的各种线性化技术。功率放大器是一个大信号电路,具有与小信号电路不一样的分析和设计方法。通过本章的介绍,读者可以了解设计功率放大器的基本思路以及提高性能的基本措施,并可以进行简单的功率放大器设计。功率放大器的集成化是目前射频电路领域还没有解决的问题,有待于科研人员的继续努力。

第 11 章集中分析讨论了振荡器及其设计问题。首先介绍了振荡条件,引入了 Barkhausen 判据,它是分析振荡器的基础;然后介绍了描述函数的概念,它可以用来分析考毕兹(Colpitts)振荡器的振荡幅度;接下来介绍了三种类型的振荡器(负反馈 LC 振荡器,负阻 LC 振荡器和环型振荡器),分析了它们的振荡条件,并介绍了具体实现电路及频率调谐措施;在引入了压控振荡器的相位域模型之后,又引入了相位噪声和时钟抖动的概念,并介绍了几种得到广泛应用的相位噪声模型;然后针对射频电路中常用的环型振荡器和负阻 LC 振荡器,仔细分析了改善它们的相位噪声性能的措施,特别是引入了噪声滤波技术;最后简单介绍了集成振荡器中常遇到的频率牵引效应,分析了频率牵引效应带来的影响,总结了产生正交信号的方法,并介绍了复滤波器的实现技术,这些技术在零中频或者低中频等利用了正交变频技术的无线收发机中具有广泛的应用背景。通过本章的介绍,读者可以了解设计振荡器的基本原理、实现技术以及提高性能的基本措施,并可以进行简单的振荡器设计。

第 12 章讨论了两种类型的频率合成器(直接数字频率合成器和锁相环型频率合成器)的分析和设计问题。首先介绍了频率合成器的概念和衡量频率合成器性能的参数,然后介绍了直接数字频率合成器的工作原理、杂散性能以及减小存储量的措施;接下来详细讨论了锁相环的基本原理、组成模块和锁定状态下的性能,并介绍了在射频电路中常用的电荷泵型锁相环及其所遇到的非理想效应,在此基础上,分析了整数锁相环型频率合成器和小数型频率合成器的工作原理以及它们的实现问题;最后简单地讨论了延迟锁定环路和锁相环的其他应用。频率合成器中包含了高频模块、低频模块以及数字电路,是一个非常复杂的数字/模拟/射频混合系统,是实现高集成度无线收发机所面临的主要障碍之一,而且它的实现对发展复杂数字/模拟/射频混合系统的设计方法具有很重要的借鉴意义。通过本章的介绍,读者可以了解频率合成器的基本原理、实现技术以及提高性能的基本措施,并可以进行简单的频率合成器设计。

第 13 章讨论了无线收发机模拟前端可能用到的其他电路模块。首先介绍了偏置电

路的分析和设计问题,包括威德拉(Widlar)电流源、自偏置电流源、恒跨导源、恒温电压参考源和恒温电流参考源等,它们给其他射频模块提供偏置,是其他模块电路正常、稳定工作的前提;然后介绍了无线接收机中不可缺少的电路模块——自动增益控制环路(AGC),包括它的基本原理和核心模块可变增益放大器(VGA)的设计,并给出了一个AGC电路实例;接下来讨论了高频滤波器的集成实现技术,着重讨论了镜像抑制滤波器的片上实现问题,引入了通过 $Q$ 值补偿来提高滤波器滤波性能的方法,并介绍了片上自动 $Q$ 值调谐电路和片上自动频率调谐电路;最后简单讨论了注入锁定技术,这种技术可以用来实现低功耗分频器,并具有较好的相位噪声性能。

第14章讨论了射频集成电路的后端设计问题,包括合理的版图设计、焊盘设计、静电防护电路设计以及混合信号集成中的信号完整性问题等。由于射频电路工作频率很高,信号又很微弱,因此后端设计对射频集成电路的性能具有很大影响,高性能的电路设计如果没有良好的后端设计相配合,所实现的射频电路的性能可能也会很差。通过本章的介绍,读者可以对影响射频电路性能的后端设计因素有所了解,在进行电路设计时,可以及早将后端设计的影响因素考虑在内,尽可能降低后端设计对电路性能的影响。

第15章在前面各章介绍的无线收发机模拟前端中各种模块电路的分析和设计方法的基础上,综合前面各章的知识,以一个DCS-1800无线接收机模拟前端为例讨论无线接收机从系统描述到具体实现的过程。通过该过程的介绍,读者可以初步了解无线收发机模拟前端的总体设计过程;并以这个例子为参考,设计自己的无线接收机模拟前端。

本书自成体系,便于自学,可以用作高等学校工科微电子、无线电、通信与电子系统等专业高年级本科生或研究生的教材,也可作为射频集成电路工程技术人员的参考书。

本书由池保勇博士、余志平教授统筹全书内容,第1章由石秉学教授编写,第6章由余志平教授编写,其余各章由池保勇博士编写。在编写过程中,三位编者进行了广泛讨论,在各部分编写完后,三位编者又交叉审阅了全部书稿并进行了修正。可以说,本书是三位编者友好合作的结晶。

本书的形成与清华大学微电子学研究所多年的科研工作是分不开的,在此我们要感谢先后与我们一道工作的同事和同学,他们是王志华教授、田立林教授、张春副研究员、李国林博士、张利副教授、李冬梅副教授、李福乐博士、刘雷波博士、王自强博士、朱晓雷和研究生韩书光、姚金科、张利等。多年工作中还得到清华大学微电子学研究所领导和教学指导委员会的真诚支持与帮助。本书的出版得益于清华大学出版社同志们大量而细致的编辑工作,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2006年10月

# 目 录

# Contents

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 发展历史 .....	2
1.2 现代通信系统概述 .....	4
1.2.1 通信系统的组成 .....	4
1.2.2 数字通信系统 .....	5
1.2.3 通信信道及其特性 .....	6
1.2.4 通信信道的数学模型 .....	7
1.3 射频电路在系统中的作用与地位 .....	8
1.4 射频电路与微波电路和低频电路的关系 .....	10
1.4.1 频段划分 .....	10
1.4.2 电路的寄生效应 .....	11
1.4.3 电路的设计考虑 .....	12
1.5 应用 .....	13
1.5.1 无线局域网 .....	13
1.5.2 GSM .....	15
1.5.3 WCDMA .....	15
1.6 总结 .....	16
参考文献 .....	16
<b>2 线性射频电路的基本特性和分析方法</b> .....	18
2.1 传输线 .....	18
2.1.1 传输线波动方程 .....	19
2.1.2 终端接负载的无损传输线 .....	20

2.1.3	终端接特定负载的无损传输线的工作状态 .....	23
2.1.4	阻抗的周期性和倒置性 .....	25
2.1.5	微带线设计 .....	25
2.2	Smith圆图 .....	29
2.2.1	阻抗圆图 .....	29
2.2.2	Smith 圆图上的反射系数和驻波系数 .....	30
2.2.3	导纳圆图 .....	31
2.2.4	Smith 圆图应用举例 .....	32
2.3	双端口网络 .....	34
2.3.1	网络参量 .....	34
2.3.2	网络的互联 .....	39
2.3.3	信号流图分析法 .....	42
2.4	射频电路中的无源分立集总参数元件 .....	44
2.5	总结 .....	52
	参考文献 .....	52
	习题 .....	52
<b>3</b>	<b>无源 RLC 网络和阻抗匹配 .....</b>	<b>54</b>
3.1	无源 RLC 网络 .....	54
3.1.1	串联 RLC 网络 .....	55
3.1.2	并联 RLC 网络 .....	58
3.2	串并联阻抗等效互换 .....	61
3.3	回路抽头时的阻抗变换 .....	63
3.4	阻抗匹配 .....	64
3.4.1	L 匹配 .....	64
3.4.2	T 匹配和 Pi 匹配 .....	68
3.4.3	微带线匹配 .....	70
3.5	总结 .....	73
	参考文献 .....	73
	习题 .....	73
<b>4</b>	<b>射频集成电路中的基本问题 .....</b>	<b>75</b>
4.1	射频电路的性能度量 .....	75
4.1.1	功率增益和电压增益 .....	75

4.1.2	灵敏度和噪声系数 .....	76
4.1.3	线性度和动态范围 .....	77
4.1.4	系统设计 .....	81
4.2	射频电路仿真算法及商用仿真软件介绍 .....	82
4.2.1	SPICE 模拟器应用于射频领域所遇到的限制 .....	82
4.2.2	射频电路仿真算法 .....	83
4.2.3	射频电路仿真工具 .....	84
4.3	CMOS 射频集成电路实现的难点 .....	84
4.4	总结 .....	86
	参考文献 .....	86
	习题 .....	87
<b>5</b>	<b>集成无源元件 .....</b>	<b>88</b>
5.1	电阻 .....	88
5.2	电容 .....	90
5.3	电感 .....	94
5.3.1	片上平面螺旋型电感 .....	95
5.3.2	键合线电感 .....	105
5.3.3	变压器 .....	106
5.4	容抗管 .....	108
5.4.1	反向二极管 .....	108
5.4.2	MOS 晶体管 .....	110
5.4.3	MOS 容抗管 .....	110
5.4.4	差分对称型容抗管 .....	111
5.5	总结 .....	113
	参考文献 .....	114
	习题 .....	114
<b>6</b>	<b>射频 MOS 及 BJT 器件模型 .....</b>	<b>116</b>
6.1	简介 .....	116
6.2	MOS 器件模型 .....	117
6.2.1	直流模型 .....	118
6.2.2	阈值电压的测量 .....	124
6.2.3	MOS 电容模型 .....	125

6.2.4	高频品质因子	128
6.2.5	非准静态(NQS)现象及模型	130
6.2.6	MOS 非本征模型	134
6.2.7	MOS 高阶效应及其 BSIM 模型	135
6.2.8	MOS 噪声模型	139
6.3	双极型(BJT)器件电路模型	142
6.3.1	Ebers-Moll 模型	142
6.3.2	时域大信号模型	143
6.3.3	交流小信号模型	145
6.3.4	双极型晶体管的高频特性	148
6.3.5	BJT 噪声模型	149
6.4	总结	150
	参考文献	150
	习题	151
<b>7</b>	<b>无线收发机射频前端的系统结构</b>	<b>152</b>
7.1	接收机射频前端的系统结构	152
7.1.1	超外差式接收机	153
7.1.2	零中频接收机	161
7.1.3	低中频接收机	166
7.1.4	其他结构的接收机	171
7.2	发射机射频前端的系统结构	174
7.2.1	超外差式发射机	175
7.2.2	直接上变频发射机	176
7.2.3	其他结构的发射机	178
7.3	总结	179
	参考文献	180
	习题	181
<b>8</b>	<b>低噪声放大器</b>	<b>182</b>
8.1	两端口网络的噪声分析	183
8.2	MOS 晶体管两端口网络噪声参数的理论分析	186
8.3	集成 CMOS 低噪声放大器的电路结构	191
8.3.1	输入端并联电阻的共源放大器	192

8.3.2	共栅放大器结构	193
8.3.3	并联-串联反馈放大器结构	194
8.4	源简并电感型共源放大器	196
8.4.1	晶体管的简单 $I-V$ 分析方程	197
8.4.2	阻抗匹配	197
8.4.3	有效跨导	199
8.4.4	噪声因子	201
8.4.5	噪声优化	203
8.4.6	三阶交调点分析	205
8.5	CMOS 低噪声放大器的设计策略	210
8.5.1	低噪声放大器的拓扑结构	210
8.5.2	增益	212
8.5.3	噪声系数	212
8.5.4	输入节点寄生电容对放大器性能的影响	213
8.5.5	$C_{gd}$ 和 $M$ 对放大器性能的影响	216
8.5.6	LNA 设计方程	217
8.5.7	Cascode 器件的设计	219
8.5.8	等高线设计方法	221
8.5.9	不完全阻抗匹配对低噪声放大器性能的影响	225
8.5.10	其他设计考虑	226
8.6	宽带低噪声放大器	228
8.7	微波晶体管放大器设计方法	232
8.7.1	功率增益关系	233
8.7.2	恒增益圆	235
8.7.3	恒噪声系数圆	238
8.7.4	恒驻波系数圆	240
8.7.5	稳定性圆	242
8.8	总结	245
	参考文献	245
	习题	246
<b>9</b>	<b>混频器</b>	<b>248</b>
9.1	混频器的基本工作原理	248
9.2	描述混频器性能的参数	251



9.2.1	噪声因子(噪声系数).....	251
9.2.2	转换增益.....	252
9.2.3	线性度;1dB 压缩点和三阶交调点 .....	252
9.2.4	端口隔离度.....	254
9.2.5	其他性能参数.....	254
9.3	电流换向有源混频器 .....	255
9.3.1	电路结构.....	255
9.3.2	转换增益.....	258
9.3.3	噪声因子(噪声系数).....	262
9.3.4	线性度.....	272
9.3.5	提高线性度的技术.....	273
9.3.6	输出负载.....	277
9.3.7	射频输入端接口电路.....	279
9.3.8	本振输入端接口电路.....	281
9.3.9	设计考虑.....	282
9.3.10	应用于零中频接收机的混频器设计 .....	282
9.4	其他类型的混频器 .....	284
9.4.1	电位混频器.....	284
9.4.2	无源混频器.....	285
9.4.3	亚采样混频器.....	286
9.5	总结 .....	288
	参考文献.....	288
	习题.....	289
<b>10</b>	<b>射频功率放大器 .....</b>	<b>291</b>
10.1	晶体管非线性模型 .....	291
10.2	功率匹配与负载线匹配 .....	292
10.3	性能参数 .....	294
10.3.1	输出功率 .....	294
10.3.2	效率 .....	295
10.3.3	功率利用因子 .....	296
10.3.4	功率增益 .....	296
10.3.5	线性度 .....	296
10.4	负载线理论和 Loadpull 技术 .....	299