

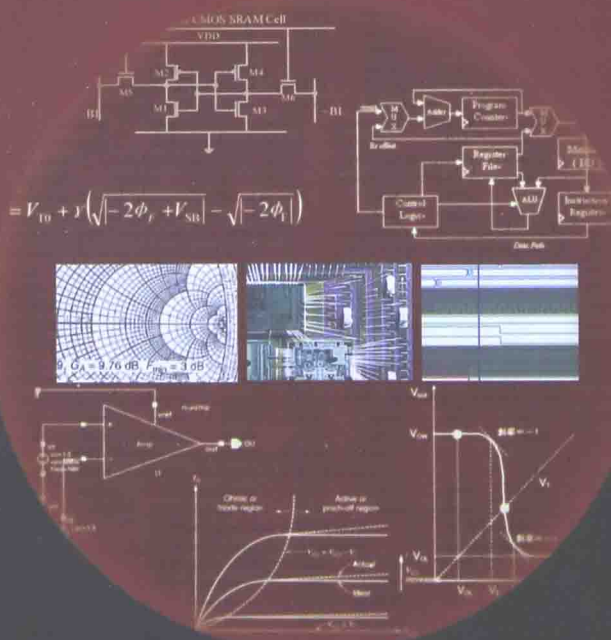
国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

组编

射频集成电路与系统设计

李智群 王志功 编著



科学出版社

国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

组编

射频集成电路与系统设计

李智群 王志功 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了射频集成电路与系统的基本原理、设计方法和技术。全书分为射频与微波基础知识、无线收发机系统结构、射频集成电路功能模块设计三部分,主要包括传输线、二端口网络与S参数、Smith圆图、阻抗匹配网络、噪声、非线性、无线收发机结构、低噪声放大器、混频器、射频功率放大器、振荡器、锁相与频率合成器等内容。本书与本系列教材中的另一本书《射频集成电路与系统》形成互补,对射频集成电路功能模块从理论和实践两个方面进行了深入分析,同时对低电压和低功耗射频电路进行了阐述。本书通过对无线通信收发系统和基本模块的分析,使读者对射频集成电路与系统有一个较为全面的认识,掌握基本的设计原则、设计方法和设计技术,具备在相关领域进行科研开发的能力。

本书可作为电路与系统、集成电路设计、微电子等专业研究生教材,也可供相关专业高年级本科生和电路设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射频集成电路与系统设计/李智群,王志功编著. —北京:科学出版社,2014.10
国家集成电路工程领域工程硕士系列教材
ISBN 978-7-03-042254-5

I. ①射… II. ①李… ②王… III. ①射频电路-集成电路-电路设计-研究生-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第245600号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:朱光光

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京华正印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年11月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:586 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组 组编
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

主 编：严晓浪（浙江大学）

副 主 编：余志平（清华大学，特邀）

审稿人员：（以拼音为序）

陈春章 洪志良

吉利久 罗伟绍

石秉学 时龙兴

唐璞山 吴懿平

肖 刚 于敦山

马长芳（责任编辑 科学出版社）

从 书 序

随着电子计算机的普及,人类社会已经进入了信息化社会。以集成电路为代表的微电子技术是信息科学技术的核心技术。集成电路产业是关系经济建设、社会发展和国家安全的战略性产业。集成电路技术伴随着半导体技术、计算机技术、多媒体技术、移动通信等技术的不断创新,得到了迅猛发展。从1958年美国的基尔比发明世界上第一块集成电路以来,集成电路已经从初期的小规模集成电路(SSI)发展到今天的系统芯片(SOC),集成电路一直按摩尔规律(Moore's Law)向前演进。集成电路产业包含了相对独立的集成电路设计、集成电路加工制造、集成电路封装测试、集成电路材料、集成电路设备业等,而其中的集成电路设计是集成电路产业发展的龙头。

近年来,我国的集成电路产业迅速发展。2000年以来我国的集成电路产值年平均增长率达到30%左右。坚持自主发展,增强技术创新能力和产业核心竞争力,掌握集成电路的核心技术,提高具有自主知识产权产品的比重是我们的历史任务。

发展集成电路技术的关键是培养具有创新和创业能力的专业人才,因此高质量、较快速度地培养集成电路人才是我们的迫切任务。毫无疑问,大学和大学老师义不容辞地要担负起这一历史责任。2003年以来,教育部先后在全国部分重点高校建设了“国家集成电路人才培养基地”,国务院学位委员会又在2006年批准设立集成电路工程领域培养工程硕士学位课程,意在不仅培养高水平的工学学士、硕士和博士,而且还要培养大量的集成电路工程领域的工程硕士,以满足我国集成电路产业迅速发展的需要。

集成电路技术发展迅速,内容更新快,而我国现有的集成电路工程领域的教科书数量少,而且内容和体系上不能很好地反映学科的发展和工程技术教学的需要,也难以满足集成电路工程领域工程硕士的培养。为此,教育部全国集成电路工程领域工程硕士专业指导委员会和科学出版社,经过广泛而深入的调研,组织编写出版了这套国家集成电路工程领域工程硕士教材。

本系列教材具有以下特色:

1. 内容完整,体系性强。本系列教材包括了集成电路器件、工艺、数字集成电路设计、模拟集成电路设计、射频集成电路设计以及封装与测试,可以满足集成电路工程领域各个方向的教学。

2. 基础全面,工程性强。教材中不仅对集成电路的基础理论有较详细的论述,而且强调了集成电路的工程性,安排了较大篇幅的内容对具体的集成电路设计技术进行全面的讲解,以使学生在掌握集成电路基础理论的同时,能上机进行具体的设计,加深对理论的理解。

3. 适应教学,自学性强。在教材编写过程中考虑了现有工程硕士的教学时间,以及教学内容的完整性,对各种教学计划,可以灵活地将教材内容进行裁剪。另外,教材中相对突出了以实验为主的实践环节,以便学生自学。

本系列教材的编写人员,不仅有从事教学第一线的高校教师,而且有从事集成电路设计多年,有丰富实践经验的国际著名集成电路设计公司的资深工程技术人员。在此表示衷心的感谢。

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组

全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

2008年5月

前 言

从 1920 年的无线电通信和 1930 年的电视传输,到 1980 年的移动电话和 1990 年的全球定位系统(GPS),以及当今的蜂窝移动通信、无线局域网(WLAN)、数字电视广播(DVB)、射频识别(RFID)、无线传感网(WSN)和家庭卫星网络(home satellite network)等,射频集成电路在其中均扮演着非常重要的角色,它的发展大大推动了无线通信技术的发展。

射频集成电路与系统设计是一门理论性与工程性都很强的课程。本书通过系统地介绍射频集成电路与系统的基本原理、设计方法和技术,使读者掌握基本的设计原则、设计方法和设计技术,具备在相关领域从事芯片、模块和系统设计开发的能力。

全书分为射频与微波基础知识、无线收发机系统结构、射频集成电路功能模块设计三部分,主要包括传输线、二端口网络与 S 参数、Smith 圆图、阻抗匹配网络、噪声、非线性、无线收发机结构、低噪声放大器、混频器、射频功率放大器、振荡器、锁相与频率合成器等内容。

作者要特别感谢全国集成电路人才培养基地专家指导委员会为本书的出版给予的大力支持,感谢清华大学石秉学教授对本书内容的审阅,感谢东南大学将本书遴选为研究生精品课程建设教材并为本书的编写与出版提供资金支持。东南大学射频与光电集成电路研究所博士研究生王曾祺、王冲、刘扬和景永康,硕士研究生黎明、程国泉、吴兆龙、刘冰子、束佳云、冯裕深、孙戈和杨磊等,为本书的编写做了大量工作,在此对他们表示感谢。

限于作者水平,书中难免有错误之处,敬请读者批评指正。

李智群 王志功

2014 年 9 月 10 日

目 录

丛书序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 无线通信技术的发展	1
1.2 频谱划分	1
1.3 通信系统的组成	2
1.4 无线通信系统举例	4
1.5 无线通信与 RFIC 设计	6
1.6 本书的内容组成	7
第 2 章 射频与微波基础知识	8
2.1 概述	8
2.2 传输线	8
2.3 传输线阻抗变换	15
2.4 二端口网络与 S 参数	17
2.5 Smith 圆图	25
2.6 阻抗匹配	31
2.7 用方程计算法设计阻抗匹配网络	33
2.8 用 Smith 圆图法设计阻抗匹配网络	43
2.9 本章小结	49
参考文献	49
习题	49
第 3 章 噪声及非线性	54
3.1 概述	54
3.2 噪声	54
3.3 放大器的非线性	70
3.4 特征频率和单位功率增益频率	78
3.5 本章小结	81
参考文献	81
习题	82
第 4 章 无线收发机结构	85
4.1 概述	85
4.2 中频选择	85
4.3 混频	85
4.4 无线接收机结构	92
4.5 无线发射机结构	104

4.6 本章小结	105
参考文献	106
习题	106
第5章 低噪声放大器	108
5.1 概述	108
5.2 LNA 的功能和指标	108
5.3 设计考虑	109
5.4 LNA 噪声系数	112
5.5 低噪声放大器结构	115
5.6 MOS 管非准静态(NQS)模型和栅极感应噪声	133
5.7 CMOS 最小噪声系数和最佳噪声匹配	136
5.8 本章小结	140
参考文献	141
习题	141
第6章 混频器	145
6.1 概述	145
6.2 混频器指标	145
6.3 混频器基本原理	148
6.4 混频器分类和电路结构	151
6.5 CMOS Gilbert 混频器分析	165
6.6 噪声优化技术	178
6.7 线性度改善技术	186
6.8 Gilbert 混频器设计实例	189
6.9 本章小结	197
参考文献	198
习题	199
第7章 射频功率放大器	202
7.1 概述	202
7.2 功率放大器与小信号放大器的区别	203
7.3 功率放大器的主要指标	204
7.4 PA 的工作原理	206
7.5 PA 的分类	207
7.6 大信号阻抗匹配	243
7.7 线性化技术	244
7.8 CMOS 功率放大器特点	249
7.9 本章小结	249
参考文献	249
习题	250
第8章 振荡器	253
8.1 概述	253

8.2 振荡器基本原理	253
8.3 环行振荡器	254
8.4 LC 振荡器	255
8.5 振荡器的干扰和相位噪声	270
8.6 LC 交叉耦合振荡器优化设计	278
8.7 LC 振荡器设计举例	288
8.8 正交(I/Q)信号的产生	290
8.9 本章小结	292
参考文献.....	292
习题.....	293
第9章 锁相环与频率合成器.....	298
9.1 概述	298
9.2 PLL 基本原理	298
9.3 PLL 的线性分析	303
9.4 电荷泵锁相环频率综合器	327
9.5 频率合成	367
9.6 本章小结	377
参考文献.....	377
习题.....	379

第 1 章 引 言

集成电路(IC)不仅是信息产业的基础和核心,而且是信息社会经济发展的基础。这是因为 IC 是各类电子信息产品与装备的核心部件,而电子信息部件又是众多其他产品和装备的核心部件。可以毫不夸张地说,21 世纪重点高科技领域都与 IC 技术密切相关。所以,IC 技术是国家综合国力的标志,IC 产业是一门战略性基础产业。IC 还直接关系到信息安全与国家安全,因此得到了各国政府的高度重视。

未来的信息交流,特别是与人直接关联的信息交流正在朝着无线和移动的方向发展。包括移动通信、无线局域网、卫星通信、无线接入等在内的各类无线移动技术正在蓬勃发展,所有这些系统都需要射频(RF)技术、射频集成电路(RFIC)或射频系统。例如,移动通信需要射频收发集成电路,数字电视需要俗称“高频头”的射频接收机。此外,在 21 世纪最受关注的生命科学领域,射频无线系统也有用武之地,范例之一就是植入体内的、可与外界通信的无线传感芯片。同时,以光纤为介质的超高速通信系统将继续在“信息高速公路”和“光纤到户”的宽带通信网建设中发挥重要作用。在这些通信系统中,人们需要开发信号频谱延伸到射频段、与射频集成电路具有同样特点的超高速集成电路。因此,射频集成电路与系统的技术与产品开发已在世界范围内形成巨大的热潮。

1.1 无线通信技术的发展

无线通信技术的发展可以追溯到 19 世纪中期。1864 年 James Maxwell 在伦敦英国皇家学会发表的论文中首次提出了电场和磁场通过其所在的空间中交连耦合会导致波传播的设想;1887 年 Heinrich Hertz 通过实验证实了电磁能量可以通过空间发射和接收;1901 年 Guglielmo Marconi 成功地实现了无线电信号(radio signals)横越大西洋的传递,从此无线电技术正式诞生。从 1920 年的无线电通信和 1930 年的 TV 传输,到 1980 年的移动电话和 1990 年的全球定位系统(GPS),以及当今的移动通信和无线局域网(WLAN),射频集成电路在其中均扮演着非常重要的角色,它的发展大大推动了无线通信技术的发展。

蜂窝移动通信从 20 世纪 80 年代出现到现在,已经发展到了第三代。目前业界正在研究面向未来第四代移动通信的技术;无线城域网(WMAN)、无线局域网(WLAN)和无线个域网(WPAN)技术的宽带无线接入也在全球不断升温,宽带无线用户数增长势头强劲;卫星通信以其特殊的技术特性,已经成为无线通信技术中不可忽视的一个领域;手机视频广播作为一种新的无线业务与技术,正在成为目前最热门的无线应用之一。

1.2 频谱划分

通信系统中不同的信道具有不同的工作频率范围。表 1-1 列出了通信系统中使用的波段名称及其相应的波段和频段,同时列出了不同的有线和无线信道所使用的频段。

表 1-1 电气和电子工程师学会(IEEE)制定的频谱划分表

频段	频率	工作模式	频率
LF(低频)	30~300kHz	中波广播	530~1700kHz
MF(中频)	300~3000kHz	短波广播	5.9~26.1MHz
HF(高频)	3~30MHz	RFID	13MHz
VHF(甚高频)	30~300MHz	调频广播	88~108MHz
UHF(特高频)	300~1000MHz	(无线)电视	54~88MHz, 174~220MHz
L-Band(L波段)	1~2GHz	遥控模型	72MHz
S-Band(S波段)	2~4GHz	个人移动通信	900MHz, 1.8GHz, 1.9GHz, 2GHz
C-Band(C波段)	4~8GHz	WLAN, Bluetooth (ISM* Band)	2.4~2.5GHz, 5~6GHz

* ISM(Industrial, Scientific and Medical), 即工业、科学和医学。

1.3 通信系统的组成

图 1-1 给出的是通信系统的一般模型,它由信源、发送设备、信道、接收设备和信宿组成。模型中同时考虑了噪声源对信道的干扰。

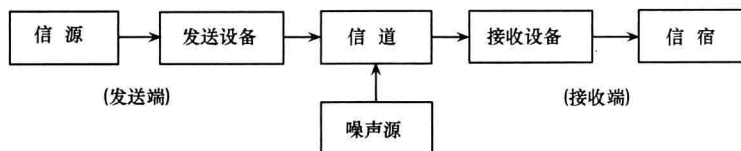


图 1-1 通信系统的一般模型

信道是传输媒介,分为有线和无线两类。有线信道有电线、电缆、光纤和波导等。无线信道是指自由空间,其中存在着各种干扰,如多径衰落、邻近频道干扰、多普勒频率和频谱色散等。无线移动信道是传输条件最为恶劣的一种信道。目前快速发展的无线通信技术正是为了克服无线信道的缺陷,以保证通信的可靠性。

根据信道中所传输信号的不同形式,通信系统可进一步划分为模拟通信系统和数字通信系统。

1.3.1 模拟通信系统

我们把信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统。模拟通信系统的组成可由通信系统的一般模型略加改变而成,如图 1-2 所示。这里,将通信系统一般模型中的发送设备和接收设备分别用调制器和解调器代替。

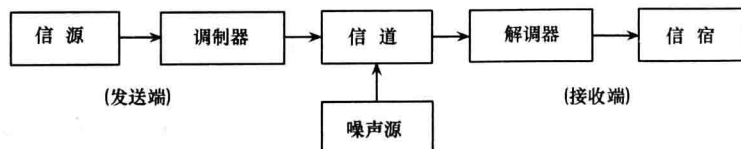


图 1-2 模拟通信系统模型

对于模拟通信系统,它主要包含两种重要变换:一种是把连续消息变换成电信号(发送端信源完成);另一种是把电信号恢复成最初的连续消息(接收端信宿完成)。由信源输出的电信号为基带信号,由于它具有频率较低的频谱分量,一般不能直接作为传输信号发送到信道中去。因此,模拟通信系统里常有第二种变换,即将基带信号转换成适合信道传输的信号,这一变换由调制器完成;在接收端则需要相反的变换,它由解调器完成。经过调制后的信号通常称为已调信号。已调信号有三个基本特性:①携带有消息;②适合在信道中传输;③频谱具有带通形式,且中心频率远离零频。因而已调信号又常称为频带信号。

必须指出,从消息的发送到消息的恢复,事实上并非仅有以上两种变换。通常在一个通信系统里可能还有滤波、放大、天线辐射与接收、控制等过程。对信号传输而言,由于上面两种变换对信号形式的变化起着决定性作用,它们是通信过程中的重要方面。而其他过程对信号变化来说,没有发生质的作用,只不过是信号进行了放大和改善信号特性等,因此,这些过程我们认为都是理想的,而不去讨论它。

1.3.2 数字通信系统

信道中传输的信号为数字信号的系统称为数字通信系统。数字通信系统可进一步细分为数字频带传输通信系统、数字基带传输通信系统、模拟信号数字化传输通信系统。

1. 数字频带传输通信系统

数字通信的基本特征是,它的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性,从而使数字通信面临许多特殊的问题。例如,前边提到的第二种变换,在模拟通信中强调变换的线性特性,即强调已调参量与代表消息的基带信号之间的比例特性;而在数字通信中,则强调已调参量与代表消息的数字信号之间的一一对应关系。

另外,数字通信中还存在以下突出问题:

(1) 数字信号传输时,信道噪声或干扰所造成的差错,原则上是可以控制的。这通过所谓的差错控制编码来实现。于是,就需要在发送端增加一个编码器,而在接收端相应地要增加一个解码器。

(2) 当需要实现保密通信时,可对数字基带信号进行人为“扰乱”(加密),此时在接收端就必须进行解密。

(3) 由于数字通信传输的是一个接一个按一定节拍传送的数字信号,因而接收端必须有一个与发送端相同的节拍,否则,就会因收发步调不一致而造成混乱。

还有,为了表述消息内容,基带信号都是按消息特征进行编组的,于是,在收发之间一组的编码的规律也必须一致,否则接收时消息的真正内容将无法恢复。在数字通信中,称节拍一致为“位同步”或“码元同步”,而称编组一致为“群同步”或“帧同步”,故数字通信中还必须有“同步”这个重要问题。

综上所述,点对点的数字通信系统模型一般可用图 1-3 表示。

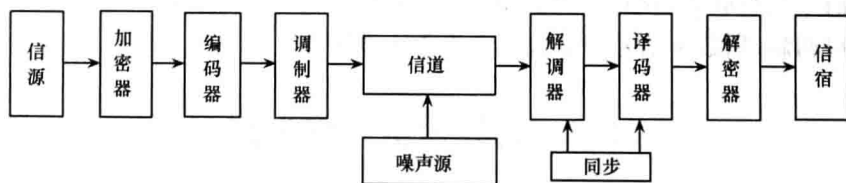


图 1-3 数字频带通信系统模型

需要说明的是,图中调制器/解调器、加密器/解密器和编码器/译码器等环节,在具体通信系统中是否全部采用,取决于具体设计条件和要求。但在一个系统中,如果发送端有调制/加密/编码,则接收端必须有解调/解密/译码。通常把有调制器/解调器的数字通信系统称为数字频带传输通信系统。

2. 数字基带传输通信系统

与频带传输系统相对应,把没有调制器/解调器的数字通信系统称为数字基带传输通信系统,如图 1-4 所示。图中基带信号形成器可能包括编码器、加密器以及波形变换等,接收滤波器亦可能包括译码器、解密器等。

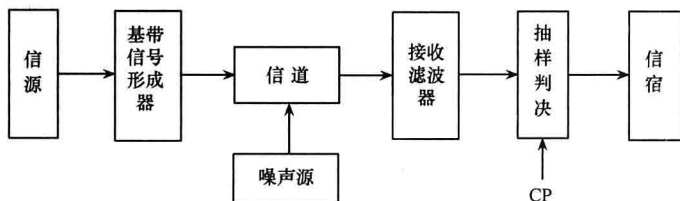


图 1-4 数字基带传输系统模型

3. 模拟信号数字化传输通信系统

上面论述的数字通信系统中,信源输出的信号均为数字基带信号。实际上,日常生活中大部分信号(如语音信号)为连续变化的模拟信号。要实现模拟信号在数字系统中的传输,则必须在发送端将模拟信号数字化,即进行模/数(A/D)转换;在接收端则需要进行相反的转换,即数/模(D/A)转换。模拟信号数字化传输系统如图 1-5 所示。

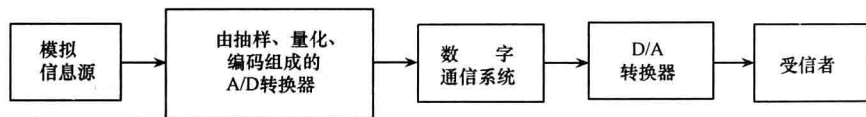


图 1-5 模拟信号数字化传输系统模型

1.3.3 调制的原因

无线通信中把基带信号变成射频已调信号有两个原因。①为了有效地把信号用电磁波辐射出去。基带信号是低频信号,如语音信号频率为 $300 \sim 3400\text{Hz}$, 300Hz 信号的波长达 1000km ,若天线长度取 $1/10$ 波长,对应的天线长度达 100km 以上,不可能实现。因此,为了降低天线的尺寸,以有效地辐射信号,发射信号的频率必须是高频。发射机中振荡器产生的高频信号称为载波。②为了有效地利用频带来传输多路频率范围基本相同的基带信号。为此,可将多路基带信号分别调制到不同频率的载波上,以避免基带信号之间的相互干扰。

用基带信号控制载波的幅度、频率和相位分别称之为调幅、调频和调相;用模拟信号调制载波称为模拟调制;用数字信号调制载波称为数字调制。

1.4 无线通信系统举例

除了诸如传呼机和手机这些为人们熟悉的无线通信产品以外,RF 技术已经创造了许多

其他市场。这些市场展示了快速成长的巨大潜力,每一个都对 RF 设计者提出了挑战。

无线局域网:在一个拥挤的场所,人们或设备之间的通信可以通过无线局域网来实现。采用在 900MHz 和 2.4GHz 附近的频带,无线局域网接收发送器能在办公室、医院、工厂等地提供移动通信连接,这样就不需要使用笨拙的有线网络。便携性与重构性是无线局域网的显著特征。

全球定位系统(GPS):随着 GPS 接收器的成本和功耗下降,用它来确定一个目标的位置及寻找方向对消费者十分有吸引力。这样的系统在 1.5GHz 等频率下工作,使汽车制造厂家考虑将其作为低成本的手持产品。

射频识别(RFID):射频识别系统,简称“RFID”,是小的、低成本的标签。它们可以附加到物品上或被个人佩带来跟踪其位置。它的应用范围包括飞机场的行李、商品和军事行动的部队等。由于有源标签的寿命由单个小电池的寿命决定,所以低功耗的要求尤其重要。工作在 900MHz 和 2.4GHz 频率范围的 RFID 产品已出现在市场上。

家庭卫星网络(home satellite network):卫星电视所提供的节目与服务已经使众多的用户被家庭卫星网络所吸引。这些网络工作在 10GHz 频段,需要附加碟形天线及连到电视机的接收器,它们直接与有线电视形成竞争。

无线通信系统的发射机和接收机原理框图如图 1-6 所示,手机射频前端原理框图如图 1-7 所示。

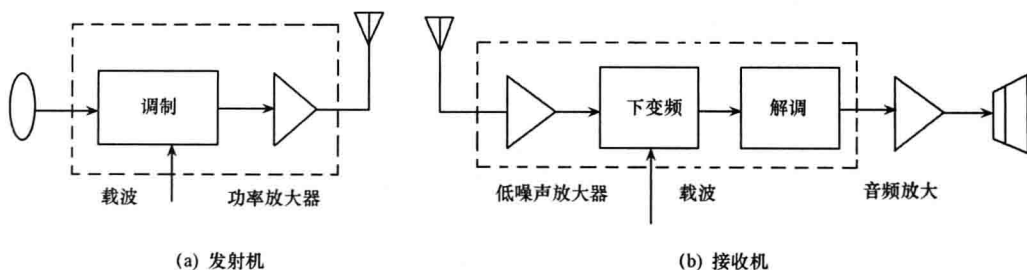


图 1-6 无线通信系统的发射机和接收机原理框图

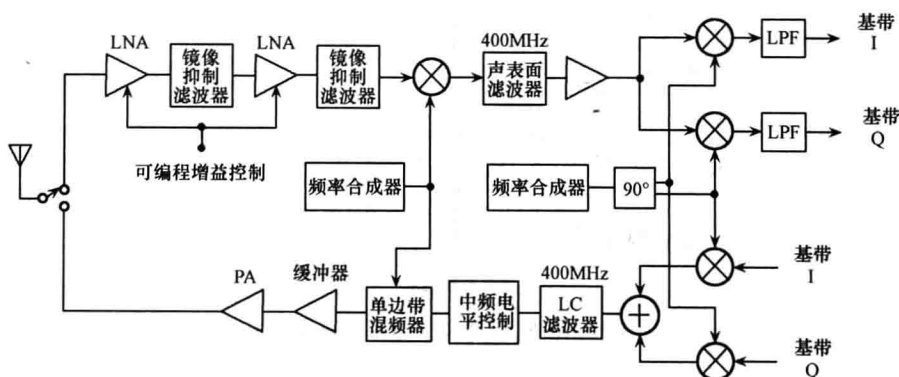


图 1-7 手机射频前端原理框图

1.5 无线通信与 RFIC 设计

由于无线通信与射频集成电路设计需要大量的专业知识、长期经验、专用 EDA 工具和昂贵的测试设备,因而面对突如其来的市场需求,这方面的人才显得极为短缺,射频集成电路的研究与开发已成为制约无线通信系统发展的瓶颈。射频集成电路与系统设计工程师不仅需要系统规划、通信协议、无线信道预算、调制解调、编码解码、均衡和信息论等方面的系统知识,以及增益、噪声、功率、线性度、频率与带宽、匹配和稳定性等方面的电路知识,同时还需要器件物理、晶体管特性和建模等方面的器件知识,并需要熟练掌握诸如 Cadence 的 Spectre RF 和 Agilent 的 ADS 等集成电路设计自动化工具。RFIC 设计应具备的知识面如图 1-8 所示。

RFIC 所涉及的相关学科和技术有集成电路设计、工艺与器件、器件模型、收发机结构、高频测试技术、高频封装技术、EDA 工具、系统标准、数字通信、无线通信和微波理论,如图 1-9 所示。



图 1-8 RFIC 设计应具备的知识面



图 1-9 RFIC 所涉及的相关学科和技术

与相对成熟的数字集成电路设计相比,RFIC 设计正处于发展阶段。无源器件尤其是电感的性能亟待提高。RFIC 设计的 EDA 工具(Spectre RF 和 ADS 等)正处于发展阶段,分析和综合的结果只能起参考作用。主要原因是在射频器件的非线性、时变特性、电路的分布参数、不稳定性等方面还缺乏精确的模型。因此设计是否成功在很大程度上取决于工程师的经验。

无线通信系统可以分为基带部分和射频部分。基带部分完成频率较低的数字信号或模拟信号的处理功能。射频部分完成宽动态范围的高频模拟信号的处理,包括低噪声放大、功率放大、频率变换、滤波、调制和解调等功能。RFIC 设计应满足良好的选择性、低噪声和宽动态范围的要求,接收机对杂散频率信号应有良好的抑制能力,本振信号应具有很低的相位噪声,发射机必须严格限制带外辐射,功率放大器应具有高效率或高线性度,采用低功耗设计尽可能降低系统的总体功耗。

如图 1-10 所示,RFIC 的设计流程大致分为五步:第一步,根据系统协议物理层标准确定收发机结构;第二步,根据系统功能和指标进行模块划分和系统规划,确定各个模块的性能指标;第三步,根据代工厂提供的器件模型,使用电路分析工具进行各个模块的电路设计,即前仿真,若不满足指标,则返回模块划分与系统规划,直至仿真满足要求;第四步,根据代工厂提供的工艺文件,使用版图设计工具进行各个模块的版图设计,并进行参数提取和后仿真,直至满足指标要求;第五步,向代工厂提交 GDS-Ⅱ 文件,进行芯片制造(称为流片)。流片完成后进行芯片测试,若满足指标,则芯片设计结束;若不满足指标,则返回模块划分与系统规划,重新进行芯片的优化设计。在第三步和第四步的设计过程中要充分考虑工艺角(process corner: slow, fast, typical)和温度对电路性能指标的影响。

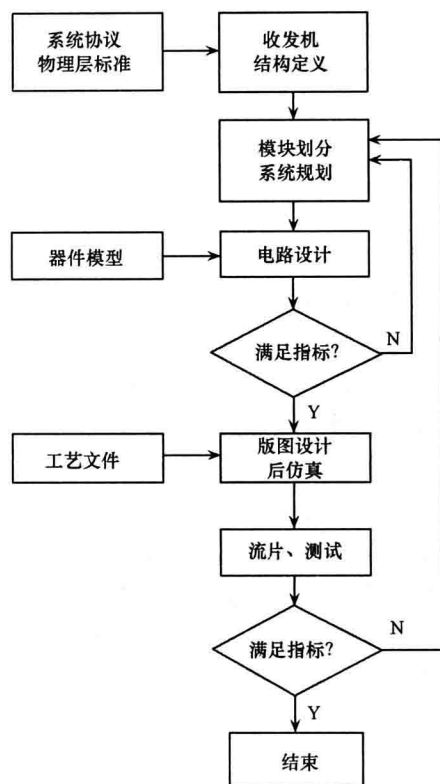


图 1-10 RFIC 的设计流程图

1.6 本书的内容组成

本书由射频与微波基础知识、无线收发机系统结构、射频集成电路功能模块设计三部分组成,全书共分为 9 章。

第 1 章为引言;第 2 章介绍射频与微波基础知识,主要包括传输线、二端口网络与 S 参数、Smith 圆图和阻抗匹配网络等;第 3 章讨论噪声及非线性,主要包括噪声的基本概念、二端口网络噪声模型、等效噪声计算、噪声系数和等效噪声温度、短沟道效应、晶体管特征频率和单位功率增益频率以及有源器件的非线性模型等;第 4 章讨论无线收发机结构,主要包括混频与复混频的概念、不同类型的无线收发机架构及特点和镜像抑制方法;第 5 章讨论低噪声放大器设计,包括噪声系数、低噪声放大器结构、栅极感应噪声、CMOS 最小噪声系数和最佳噪声匹配等;第 6 章讨论混频器设计,包括混频基本原理、混频器结构、线性度及其改善技术、噪声系数及其优化等;第 7 章讨论射频功率放大器设计,包括功率放大器的匹配、分类、功率放大器设计和线性化技术等;第 8 章讨论振荡器的设计,包括环行振荡器、LC 振荡器、干扰和相位噪声、正交信号的产生等;第 9 章讨论锁相与频率合成技术,包括 PLL 基本原理、PLL 线性分析、电荷泵锁相环、频率合成等。