



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 射频通信电路

陈邦媛 编著

 科学出版社  
[www.sciencepress.com](http://www.sciencepress.com)



(TN-0422.0102)

责任编辑：吕虹 钟 谊

封面设计：黄华斌 陈 敬

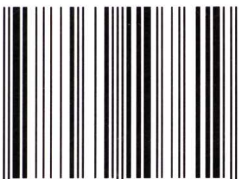
责任印制：刘秀平



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 射频通信电路

ISBN 7-03-010761-6



9 787030 107619 >

ISBN 7-03-010761-6

定 价：37.00 元

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 射 频 通 信 电 路

陈邦媛 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了射频通信电路各模块的基本原理、设计特点以及在设计中应考虑的问题。全书分为射频电路设计基础知识、调制与解调机理、收发信机结构和收发信机射频部分各模块电路设计四大部分,其中模块电路包括了小信号低噪声放大器、混频器、调制解调器、振荡器、频率合成器及高频功率放大器电路的原理及设计方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

射频通讯电路/陈邦媛编著. —北京:科学出版社,2002

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-03-010761-6

I. 射… II. 陈… III. 射频电路-电路设计-高等学校-教材  
IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 063230 号

责任编辑:吕 虹 钟 谊/封面设计:黄华斌 陈 敬

责任印制:刘秀平

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>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年3月第二次印刷 印张:31

印数:3 501—6 500 字数:612 000

定价: 37.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

近 20 年来以蜂窝移动通信为龙头的无线应用技术,包括 PCS 电话、无线局域网(WLAN)、全球定位系统(GPS)、直播电视服务(DBS)、本地多点分布系统(LMDS)和射频识别系统(RFID)等在内,已经获得了巨大的发展。人们越来越清楚地认识到射频设计在整个无线应用系统中举足轻重的地位,因此目前各高等院校的通信电子类本科专业都已把高频电路或通信电路作为一门主要的专业基础课。

本书以无线移动通信中的射频系统为应用背景,提出各单元电路的工作原理、性能要求,同时从设计观点出发论述各项性能指标与电路参数之间的关系并举出许多实例加以说明。按照这一思路,在内容编排上,首先介绍射频系统中最基础的选频回路、阻抗变换以及噪声和非线性概念;然后讲述射频系统的体系结构并从移动通信系统的标准引导出对于射频电路的性能指标要求,而后对每个单元电路逐个介绍并给出设计实例。

本书有以下几个特点:一是以理解概念、实现功能为主。在讲述器件和电路特点时,重点介绍它的机理,强调概念的应用,功能的实现,尽量避免过多的理论推导。二是理论与实践相结合,电路紧密围绕通信系统。在讲述电路设计原理时,尽可能地介绍目前在这方面的集成电路器件并分析它们的原理;在应用模块电路中强调器件的指标、各功能模块间的连接和匹配,从而使读者不仅知道原理而且学会正确使用器件。三是强调指标。与数字电路不同,衡量模拟电路的好坏不仅是功能,更重要的是指标。围绕每一种功能电路,我们在讲述电路原理的同时也讲述衡量它的指标和影响性能指标的参数及改进性能指标的方法。

本书共分十章。第一章介绍选频回路和阻抗变换;第二章介绍噪声与非线性失真;第三章介绍调制和解调;第四章介绍发送、接收机结构;第五章介绍低噪声放大器;第六章介绍混频器;第七章介绍振荡器;第八章介绍锁相与频率合成技术;第九章介绍调制与解调电路;第十章介绍高频功率放大器。本书内容丰富,部分内容要求稍高,在书中用小号字体印出。

作者要特别感谢原国家教委工科电子线路教学指导小组组长,东南大学谢嘉奎教授,他几乎逐字逐句地审阅了本书全部内容并提出许多宝贵的意见,对提高本书的质量起了重要的作用。同时作者要感谢浙江大学荆仁杰教授、何小艇教授、童乃文教授和仇佩亮教授,他们支持本书的写作,并各自审阅了本书的部分内容,提出了不少有益的建议,在此一并表示感谢。

限于作者的水平,本书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

陈邦媛  
2002年4月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 选频回路与阻抗变换	7
1.1 选频回路的指标	7
1.2 LC 串并联谐振回路	9
1.2.1 谐振的基本概念与特性	9
1.2.2 选频特性	11
1.2.3 实际并联回路与有载 $Q$	15
1.3 无源阻抗变换网络	18
1.3.1 变压器阻抗变换	18
1.3.2 部分接入进行阻抗变换	19
1.3.3 L 网络阻抗变换	23
1.3.4 $\pi$ 和 T 型匹配网络	27
1.3.5 用 Smith 圆图设计匹配网络	29
1.3.6 宽带阻抗变换网络	37
1.4 集中选频滤波器	41
1.5 集成电感	43
1.5.1 螺旋电感	43
1.5.2 连接线电感	45
附录 Smith 圆图基本知识	45
习题	51
第二章 噪声与非线性失真	55
2.1 起伏噪声特性	55
2.2 电路器件的噪声	57
2.2.1 电阻的热噪声及等效电路	57
2.2.2 双极型晶体三极管的噪声	58
2.2.3 场效应管的噪声	58
2.2.4 电抗元件的噪声	59
2.2.5 两端口网络的等效输入噪声源	60
2.3 噪声系数	62

2.3.1	噪声系数定义	62
2.3.2	噪声系数与输入等效噪声源的关系	62
2.3.3	无源有耗网络的噪声系数	64
2.4	等效噪声温度	65
2.4.1	等效噪声温度定义	65
2.4.2	等效噪声温度与噪声系数的关系	66
2.5	多级线性网络级联的噪声系数	67
2.6	非线性器件的描述方法	68
2.6.1	非线性器件的描述方法	68
2.6.2	线性化参数	72
2.7	器件非线性性的影响	74
2.7.1	输入端仅有一个有用信号	74
2.7.2	输入端有两个以上信号	76
2.7.3	多级非线性级联特性	81
2.8	非线性器件在频谱搬移中的应用	82
2.9	灵敏度与动态范围	85
2.9.1	灵敏度	86
2.9.2	动态范围	87
	习题	88
<b>第三章</b>	<b>调制和解调</b>	<b>91</b>
3.1	什么是调制和解调	91
3.2	模拟调制	92
3.2.1	幅度调制与解调	92
3.2.2	模拟调频与解调	101
3.3	数字调制的基本概念	109
3.3.1	二元信号和多元信号	109
3.3.2	基函数	111
3.3.3	信号星座图	112
3.3.4	相关检测器	113
3.3.5	相干与非相干解调	114
3.4	二元数字调制	115
3.4.1	BPSK	115
3.4.2	BFSK	117
3.5	正交幅度调制	119
3.5.1	QPSK 调制	119



3.5.2	OQPSK 与 $\frac{\pi}{4}$ QPSK 调制	122
3.5.3	MSK 调制	125
3.6	调制方式的功率有效性	128
3.6.1	常包络和变包络调制	128
3.6.2	频谱再生	129
	习题	130
<b>第四章</b>	<b>发送、接收机结构</b>	<b>135</b>
4.1	概述	135
4.2	接收机方案	136
4.2.1	外差式接收机	136
4.2.2	直接下变频方案	142
4.2.3	镜频抑制接收方案	144
4.2.4	数字中频方案	147
4.3	发射机方案	148
4.4	无线发射接收机的性能指标	150
	习题	156
<b>第五章</b>	<b>低噪声放大器</b>	<b>158</b>
5.1	晶体管高频等效电路	158
5.1.1	双极型晶体管共射小信号等效电路	159
5.1.2	场效应管小信号模型	161
5.2	S 参数	162
5.2.1	单端口网络	162
5.2.2	双端口网络 S 参数	164
5.3	低噪声放大器指标	167
5.4	低噪声放大器设计	171
5.5	用 S 参数设计放大器	181
5.5.1	S 参数与功率传输	181
5.5.2	放大器的稳定性	183
5.5.3	按照增益要求设计放大器	185
5.5.4	按照噪声系数设计放大器	189
5.5.5	单向传输品质因子	192
	附录 证明式(5.4.8)	193
	习题	193
<b>第六章</b>	<b>混频器</b>	<b>197</b>

6.1	混频器概述 .....	197
6.2	有源混频器电路 .....	202
6.2.1	单管跨导型混频器 .....	203
6.2.2	单平衡混频器 .....	209
6.2.3	吉尔伯特双平衡混频器 .....	215
6.3	无源混频器 .....	223
6.3.1	二极管混频 .....	223
6.3.2	无源场效应管混频器 .....	229
	习题 .....	230
<b>第七章</b>	<b>振荡器</b> .....	<b>236</b>
7.1	反馈型振荡器的基本原理 .....	236
7.1.1	反馈型振荡器的基本组成与平衡条件 .....	236
7.1.2	起振条件 .....	239
7.1.3	振荡器的稳定条件 .....	242
7.2	LC 振荡器 .....	246
7.2.1	构成 LC 振荡器的两个注意点 .....	246
7.2.2	互感 LC 振荡器 .....	247
7.2.3	三点式振荡器 .....	248
7.2.4	负阻 LC 振荡器 .....	256
7.3	石英晶体振荡器 .....	260
7.3.1	石英晶体特性概述 .....	260
7.3.2	石英晶体振荡电路 .....	262
7.4	压控振荡器 .....	266
7.4.1	概述 .....	266
7.4.2	变容二极管压控振荡器 .....	267
7.4.3	射极耦合多谐振荡器 .....	270
7.4.4	环形振荡器 .....	272
7.5	振荡器的频率稳定度 .....	275
7.5.1	概述 .....	275
7.5.2	相位噪声的影响 .....	276
7.5.3	频率稳定度的表示方法 .....	277
附录	关于图 7.5.2 频谱的证明 .....	279
	习题 .....	281
<b>第八章</b>	<b>锁相与频率合成技术</b> .....	<b>287</b>
8.1	锁相环的基本组成与原理 .....	287

8.1.1	锁相环的组成及数学模型	287
8.1.2	环路的基本方程	292
8.2	锁相环的跟踪特性	293
8.2.1	静态特性	293
8.2.2	跟踪特性	294
8.3	捕捉性能	304
8.4	锁相环的噪声	309
8.5	锁相环的稳定性	312
8.6	锁相环路的实现	316
8.6.1	鉴相器	317
8.6.2	集成锁相环产品举例	327
8.6.3	锁相环设计	331
8.7	频率合成器	337
8.7.1	整数分频频率合成器	338
8.7.2	分数频率合成器	344
8.7.3	直接数字频率合成器	347
	习题	350
<b>第九章</b>	<b>调制与解调电路</b>	<b>355</b>
9.1	调制与解调器	356
9.1.1	平衡调制器	356
9.1.2	相干解调器	361
9.2	载波提取	363
9.2.1	平方环	364
9.2.2	考斯塔斯环	366
9.3	正交信号形成电路	367
9.4	调幅波的包络检波电路	372
9.4.1	包络检波电路	373
9.4.2	同步检波	383
9.5	调频电路	386
9.5.1	概述	386
9.5.2	直接调频电路	387
9.5.3	间接调频电路	396
9.6	鉴频电路	403
9.6.1	概述	403
9.6.2	限幅电路	406

9.6.3 斜率鉴频·····	408
9.6.4 正交鉴频·····	410
9.6.5 FSK 双滤波器解调·····	415
9.6.6 锁相鉴频·····	416
习题·····	420
<b>第十章 高频功率放大器</b> ·····	<b>430</b>
10.1 概述·····	430
10.2 高频功率放大器的分类·····	434
10.3 A、B类功率放大器·····	434
10.3.1 A类放大器·····	434
10.3.2 B和AB类放大器·····	435
10.4 C类功率放大器·····	437
10.4.1 电路组成与特点·····	437
10.4.2 动态负载线·····	439
10.4.3 输出功率与效率·····	442
10.4.4 倍频与调制特性·····	445
10.4.5 C类放大器的馈电电路·····	447
10.5 高效率高频功率放大器·····	449
10.5.1 概述·····	449
10.5.2 D类高频功率放大器·····	450
10.5.3 E类高频功率放大器·····	452
10.6 高频功率放大器设计·····	453
10.6.1 晶体管大信号参数·····	453
10.6.2 功率放大器设计举例·····	458
10.7 功率合成电路·····	465
10.7.1 魔T网络·····	465
10.7.2 功率合成电路·····	470
附录 余弦电流脉冲分解·····	471
习题·····	472
附表·····	476
参考文献·····	478
英文缩写对照·····	480
部分习题参考答案·····	481

## 绪 论

近 30 年来无线移动通信是电子信息产业中发展最为迅速的一个分支。利用灵巧的无线手机进行双向通信是当前消费的一种时尚,但是一般的手机用户在打无线电话时恐怕很少知道这是一百年来许多科学家和工程师努力奋斗的结果。

1901 年英国科学家马可尼成功地实现了无线电信号横越大西洋,可以认为从那时起射频电子(radio)技术正式诞生。马可尼的成功使人们认识到可以利用电波通过“以太”代替电线来传输电话、电报等信息。这是非常激动人心的。无线通信发展到今天,使得千百万用户可以同时利用一段无线电频谱进行双向通信,可以使得无线通信移动,而且无线通信机可以放在身上、拿在手上,更重要的是使得许多人能够买得起、用得着这种无线通信设备。

许多科学和技术对于无线通信的发展作出了贡献,但是造就当今移动通信辉煌局面的应首推射频技术和微电子技术。要实现移动通信,必须采用无线传输;同时要实现有效的移动也必须要求设备体积小、重量轻、耗电省。毋庸置疑,射频微电子是当代移动通信的基础。我们谈到移动通信技术就必须谈射频微电子技术,而谈到射频微电子技术也必然落实到移动通信。下面我们概要地介绍一下通信系统的组成。

### 一、通信系统的组成

通常我们把信息从发送者传送到接收者的过程称为通信,而实现信息传输过程的系统称为通信系统。图 0.1 表示一个通信系统的基本组成。

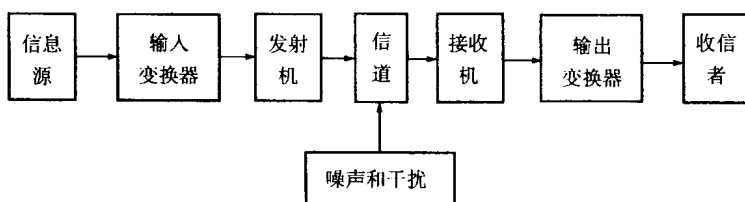


图 0.1 通信系统的基本组成

在通信系统中,一般要进行两种变换和反变换。在发送端,第一个变换是输入变换器,它把要传递的信息转换成电信号,该信号一般是低频的,而且包括零频附近的分量。通常称该电信号为基带信号(baseband),它可以是模拟信号,也可以是



数字信号。第二种变换是发射机将基带信号变换成其频带适合在信道中有效传输的信号形式,并送入信道。这种变换称之为调制。调制后的信号称为已调信号,或称为通带信号(passband),去调制的基带信号又可以称为调制信号。在接收端,接收机与发射机的功能相反,它从信道中选取欲接收的已调波并将其变换为基带信号,此变换称为解调。输出变换器将解调后的基带信号变换为相应的信息。

在无线通信中必须把基带信号变成射频已调信号的原因主要有两点。第一是为了有效地把信号用电磁波辐射出去。为了有效的将信号的能量辐射到空间,必须要求天线的长度和信号的波长可比拟(例如至少十分之一)。而基带信号一般来说是频率比较低的信号,如话音的频率可以认为在 300Hz~3400Hz 范围内,如果直接辐射话音信号,这就要求天线长度达 300km 以上,这是不可能的。因此为了有效的辐射,发射信号的频率必须是高频。在发射机中由振荡器产生高频信号,称之为载波。但载波并不携带要发射的信息,将基带信号去控制高频载波的某一个参数使其携带了信息,该过程叫调制。

采用调制的第二个原因是为了有效的利用频带。一般要传送的基带信号的频率范围都差不多,比如广播电台要广播的音乐节目的频率范围大约集中在 100Hz~10KHz,如果每个电台都直接发射这些信号,就会互相干扰,令接收机无法区分。只有将不同电台的节目调制到该电台对应的不同频率的载波上,变成中心频率不同的频带信号,接收机才能任意选择所需要的电台而抑制其余不需要的电台和干扰。

正弦载波有三个参数:一是幅度,二是频率,三是相位。用基带信号控制载波的幅度称为调幅;用基带信号控制载波的频率,称为调频;用基带信号控制载波的相位,称为调相。用模拟信号调制正弦载波称为模拟调制,用数字信号调制正弦载波称为数字调制。采用不同调制方式的通信系统的性能和技术难度都是不同的。

信道是传输媒介,分有线和无线两类。有线信道如电线、电缆、光纤和波导,无线信道即由射频电波传播的自由空间。适合射频电波传播的频段范围极为宽广,从几十千赫兹超长波到几十吉赫兹的毫米波,不同频段的射频电磁波在空间传播的方式和特性也都不相同。当今公众数字移动通信常用的两种制式 GSM 和 IS-95 采用的频段都在 900MHz,目前正在研发、即将推出的第三代数字移动通信都采用 2GHz 频段,无线局域网(WLAN)采用的是 2.4GHz,全球定位(GPS)系统采用 1.6GHz 频段。

无线电波在空间长距离传播会有很大的损耗,所以在接收机天线上感应的信号是非常微弱的,常常只有零点几微伏,同时无线电波在空间传播会受到各种障碍物的反射、散射等,使得接收天线收到的信号是由多条途径传输叠加的结果,造成所谓多径衰落。无线信道又是敞开式的,接收天线可以收到各种其他的同频道或邻近频道的干扰信号,有时这种信号远比所需要信号大,从而对所需的有用信号造

成极为严重的干扰。移动接收中电波的多普勒频移、频谱色散等,这些都严重地影响了信号的接收,所有这一切对移动通信来说都是一种挑战,可以说无线移动信道是条件最为恶劣的一种信道。迅速发展的移动通信技术正是为了克服移动无线信道的缺陷,保证通信的高速和高可靠性,使通信方式更加灵活、便利。

## 二、移动通信的射频设计

如果按照电路结构来划分,一个无线移动通信机又可以分为如图 0.2 所示的射频级和基带级两大部分。基带级处理基带信号,射频级处理射频信号。

进一步把图 0.2 细化成典型的模拟通信的收、发射机或者数字通信的收、发射机(如图 0.3 和图 0.4 所示)。在图 0.3 中,属于射频电路的是图中虚线框内的部分,在图 0.4 中射频部分是前端黑框外的部分,即射频部分完成的功能主要是调制、解调、功率放大、低噪声放大和频率变换。在发射机中,在调制后有时也采用上变频,将已调信号再搬移到所需的发射频道上。功率放大器放大已调信号到一定的功率值,使其能够传输相当的距离以便接收机接收。在接收机中,低噪声放大器在尽量少增加噪声功率的前提下,放大由天线接收到的高频微弱信号,使其能达到解调器所要求的电平。接收机中的下变频是将高频已调波的频谱转移到适合解调或进行模数变换的频段。

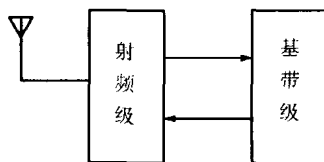


图 0.2 射频级和基带级

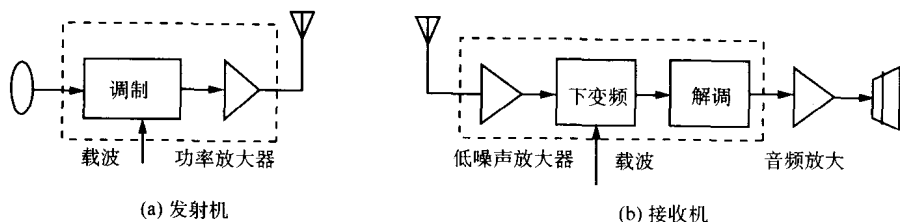


图 0.3 模拟通信机的射频级电路方框图

图 0.5 给出了某蜂窝手机的射频级电路,为什么要如此复杂? 回答是简单的,因为无线移动信道情况太恶劣,它对射频级设计提出了非常苛刻的性能指标要求,人们要通过复杂的电路设计来达到这些要求。

现代蜂窝手机对射频设计提出了以下要求:

① 良好的选择性。因为移动通信使用开放的无线信道,移动接收机要从空间无数的无线电波干扰信号中选出所需要的信号,必须要求接收机有良好的选择性。

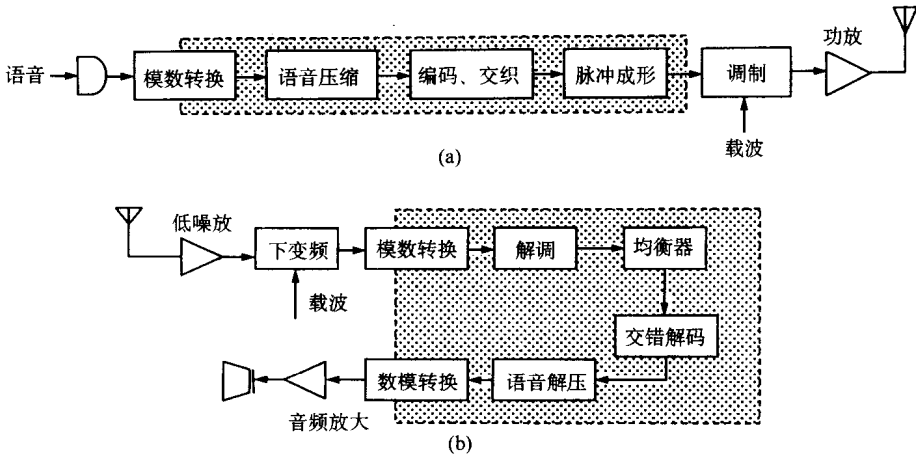


图 0.4 数字通信机的射频级电路方框图

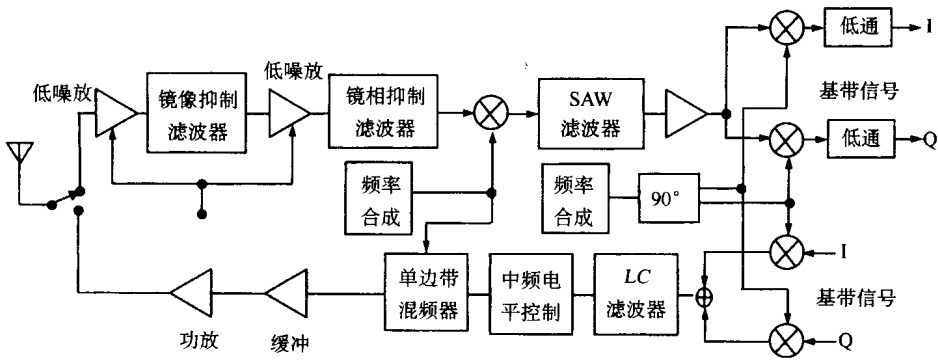


图 0.5 无线数字手机的射频级电路

② 低噪声、高动态范围。由于手机的移动性使得接收到的信号电平具有很宽的变化范围。当输入信号小时,主要考虑放大器的低噪声特性,当输入信号大时,则对放大器的非线性有很高要求。

③ 接收机对于杂散频率信号有良好的抑制能力。由于一般采用超外差接收和频率合成,接收机中多次频率变换会产生各种可能的杂散频率信号混入到所需信号中,形成干扰,为了保证接收质量,必须抑制和滤除这些杂散信号分量。

④ 本振信号应该具有很低的相位噪声。

⑤ 发射机必须严格限制带外辐射。

⑥ 射频级必须低功耗。因为对于接收机来说,射频部分往往是常开的,不像

基带可以处以休眠状态。

⑦ 发射机的功率放大器要求有高的功率增加效率(power-added efficiency)。

### 三、射频设计成了移动通信机设计的瓶颈

综上所述,在移动通信的收发信机中,射频部分要处理的是宽动态范围的高频模拟信号,而基带部分完成对频率较低的数字信号或模拟信号的处理功能。当前所用的无线数字手机中包含了多于 100 万个晶体管,基带部分占据了其中的极大部分,而射频部分仅使用很少晶体管。从规模角度看来,基带部分远比射频部分庞大,但是现代无线手机设计的难点在射频。可以说,射频设计成了移动通信机设计的瓶颈,细究其原因有如下三点:

① 射频设计要求设计师具有较宽的知识面。例如射频设计师应通晓根据通信理论发展而来的各种调制机理及各种无线通信的标准和各种通信协议,应具有关于随机信号、微波技术、电波传播、多址接入、电路理论、晶体管器件特性等各方面的知识,会使用各种 CAD 工具等等。而这些学科中的许多方面都已发展了半个世纪以上,要在短时间内掌握这些知识是有一定困难的。正因为如此,以往的射频设计是几方面专家分裂开来进行的。射频系统专家规划收发信机结构,集成电路 IC 工程师研发各个构件模块,然后由制造者用“胶水”把这些集成块和一些外围器件黏起来。由于射频系统专家总是采用现有的 IC 模块,而 IC 工程师总是把芯片设计得尽可能一片多用,这样射频系统无论在系统水平还是在电路水平总是非常地冗余,效率不高。移动通信的飞速发展要求现代的射频设计师能够把几个方面知识汇合起来,充分利用多个学科的综合优势,因此人才的缺乏是首要原因。

② 与基带级几乎可以全部采用成熟的数字集成电路相比,射频级的集成电路还处于发展阶段,有些器件需要外接。如电感还不能完全集成,模块之间存在的匹配问题,这些都给设计造成了困难。

③ 对射频电路来说,计算机辅助分析和综合的工具还只处于起步阶段,利用这些工具进行的分析和综合结果只能起到参考的作用。因为目前在电路 CAD 工具的软件中,对射频部分器件的非线性、时变特性、电路的分布参数和不稳定性以及一些外接部件都缺乏精确的模型,因此射频电路的设计在很大程度上还取决于设计师的实验调试和经验。

从上面的叙述,对通信系统收发信机射频部分的组成已有了初步的了解。本书主要介绍射频电路设计的基础知识,射频部分各模块的设计方法与特点以及在设计中应考虑的问题。

由于微电子技术和通信事业,特别是移动通信的飞速发展,要求电路集成化程度越来越高,射频电路也不例外。对于这些集成电路,除了要求优良的性能外,还提出了低成本,低功耗,小体积和轻重量等等苛刻的要求,因此介绍射频电路的设