




普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

射频通信电路设计 (第二版)

刘长军 黄卡玛 朱铎丞 编著

 科学出版社

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

射频通信电路设计

(第二版)

刘长军 黄卡玛 朱铎丞 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设计的基本原理和方法。本书从传输线理论、Smith 圆图、两端口网络等射频电路基础理论着手,介绍了滤波电路、匹配电路、放大电路、振荡电路、频率变换电路等射频通信电路设计的基本原理和方法。本书既涵盖了射频通信电路设计的基本理论,也涉及射频通信单元电路的具体设计。本书有丰富的图解和实例,每章均附有一定数量的习题,包含一些要求编写计算机程序辅助电路设计的练习,还有一些需要利用互联网获取电路设计信息的练习。

本书可以作为通信类和电子类(通信工程、电子信息工程、无线电技术、计算机等专业)本科生的教材或参考书,也可供从事射频电路设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射频通信电路设计/刘长军,黄卡玛,朱铎丞编著. —2版. —北京:科学出版社,2017.2

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-051251-2

I. ①射… II. ①刘… ②黄… ③朱… III. ①射频电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 327021 号

责任编辑:潘斯斯/责任校对:郭瑞芝

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>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张:28

字数:664 000

定价:69.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近十年来, 射频电路的研究得到了巨大的发展, 在无线通信、医疗、遥感、遥控、全球定位、射频识别等领域得到了广泛应用。射频电路是现代通信系统中一个不可缺少的部分, 直接影响着通信系统的性能。随着科学技术的发展, 射频电路设计方法日趋成熟, 射频覆盖的频率范围也越来越宽。

由于射频通信电路设计涵盖了许多领域, 几乎每一个领域都有专门的书籍进行介绍和深入分析, 如传输线理论、微波/射频网络、微带滤波电路、晶体管放大电路等领域都有相应的专著。在深入学习这些专业领域的知识前, 需要建立射频通信电路设计的基本概念, 系统掌握射频通信电路设计的一般方法。因此, 本书侧重于射频通信电路设计的基础知识, 提高读者对射频通信电路设计的认识。通过本书的学习, 可以踏进射频通信电路设计的领域, 掌握射频通信电路设计的基础知识, 能够进一步分析专题书籍和参考文献。

本书内容涵盖了射频通信电路设计的基础理论和基本方法, 包括 11 章内容。第 1 章为绪论, 第 2 章为射频电路基础, 第 3 章为传输线理论, 第 4 章为射频网络, 第 5 章为滤波电路设计, 第 6 章为匹配电路和偏置电路, 第 7 章为射频放大电路, 第 8 章为振荡电路, 第 9 章为频率变换和调制电路, 第 10 章为锁相环电路, 第 11 章为射频系统参数。本书内容可以分为两部分, 第一部分为第 1~4 章, 第二部分为第 5~11 章。

第一部分主要介绍射频电路设计的基础知识。第 1 章介绍射频的定义和频谱划分, 讨论射频电路设计的特点, 介绍射频电路的概念。第 2 章介绍射频电路设计经常涉及的一些相关概念, 如带宽、分贝毫瓦、品质因数等, 简介射频有源器件的电路模型和基本应用。第 3 章介绍传输线的特征阻抗和电压反射系数, 传输线种类、功能和分析方法, Smith 圆图的使用方法。第 4 章介绍两端口网络的矩阵描述和各种矩阵参数之间的换算, 讨论使用信号流图简化射频电路分析的方法。

第二部分主要介绍射频通信单元电路的基本原理和设计方法。第 5 章介绍滤波电路的概念、集总参数和分布参数滤波电路的设计方法, 主要讨论如何使用微带传输线实现分布参数滤波电路。第 6 章介绍使用集总参数和分布参数元件设计匹配电路的方法、有源和无源偏置电路的构成和功能。第 7~9 章分别介绍放大电路、振荡电路和变频电路等射频通信单元电路的相关概念和工作原理, 通过综合运用实现电路的分析和设计。第 10 章讨论锁相环电路的设计。第 11 章介绍射频系统参数的分析方法, 讨论由多级单元电路的功率增益、噪声系数和动态范围。

本书限于讨论横电磁波(TEM), 不涉及复杂的电磁场分析, 对数学理论没有过高的要求。只要具备了电磁学、电路分析和模拟电路的一些基本知识, 就可以顺利完成本书的学习。通常, 电子专业类的本科已经开设有大学物理(电磁学)、电路分析、模拟和数字电路等课程, 可以直接使用本书而不必专门开设其他的前期课程。如果学习了电磁场与微波技术、微波网络等课程, 已经掌握了传输线理论、Smith 圆图和射频网络参数的概念, 则可以跳过第 3 章和第 4 章。本书的部分章节具有很强的独立性, 可以根据课程开设的目的和课时的安排情况,

自行调节授课内容。

通常在本科低年级课程中,已经学习了计算机高级语言,能够利用 C 语言或者使用 MATLAB 进行程序设计。在本书的习题中,编排了一些利用计算机程序辅助射频电路设计的练习,可以选用任何一种高级语言编写程序,对射频通信电路设计的实际工程应用很有帮助。另外,互联网上有丰富的射频电路设计资源,通过完成课后习题中对射频概念、相关软件和集成芯片资料的搜索,可以了解更多的射频电路设计技术。希望有条件的读者能充分利用计算机和互联网的资源,更好地完成本书的学习。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2016年12月1日

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 射频概念	1
1.2 射频通信电路应用简介	2
1.3 射频电路设计的特点	5
1.3.1 分布参数	5
1.3.2 $\lambda/8$ 设计准则	7
1.3.3 趋肤效应	7
习题	8
第 2 章 射频电路基础	10
2.1 频带宽度表示法	10
2.1.1 绝对带宽	10
2.1.2 相对带宽	10
2.1.3 窄带和宽带	11
2.2 分贝表示法	12
2.3 LC 谐振电路的特性	13
2.3.1 串联谐振电路	13
2.3.2 并联谐振电路	15
2.4 品质因数	17
2.4.1 品质因数与带宽的关系	17
2.4.2 有载品质因数	18
2.4.3 电抗器件的品质因数	19
2.5 射频二极管	20
2.5.1 二极管模型	20
2.5.2 射频二极管分类	22
2.6 射频晶体管	27
2.6.1 射频晶体管的结构	27
2.6.2 射频晶体管的模型	30
习题	33
第 3 章 传输线理论及 Smith 圆图	35
3.1 传输线基础	36
3.1.1 常用传输线种类	37
3.1.2 传输线等效电路	39
3.1.3 传输线方程	41

3.1.4	特征阻抗的定义	42
3.2	无耗传输线的基本特性	47
3.2.1	传输特性	47
3.2.2	阻抗特性	50
3.2.3	反射特性	52
3.3	终端接不同负载的传输线	54
3.3.1	终端接匹配负载	54
3.3.2	纯驻波工作状态	55
3.4	信号源和有载传输线	58
3.5	Smith 圆图	61
3.5.1	Smith 圆图的构成	62
3.5.2	Smith 圆图的应用	66
3.6	小结	71
	习题	72
第 4 章	射频网络	75
4.1	基本概念	75
4.1.1	线性网络	75
4.1.2	阻抗矩阵和导纳矩阵	77
4.1.3	混合矩阵和转移矩阵	80
4.2	网络的连接	84
4.2.1	网络的串联	84
4.2.2	网络的并联	85
4.2.3	网络的级联	85
4.3	网络的特性	88
4.3.1	网络的转换	88
4.3.2	网络分析的应用	90
4.4	散射参数	93
4.4.1	散射参数概念	94
4.4.2	散射参数推广	101
4.4.3	散射参数测量	104
4.5	信号流图	105
4.5.1	信号流图基础	105
4.5.2	信号流图基本规则	107
4.5.3	信号流图的应用	107
	习题	111
第 5 章	滤波电路设计	114
5.1	谐振电路和滤波电路的基本结构	115
5.1.1	谐振电路的类型和基本参数	115
5.1.2	一阶滤波电路	118

5.2 集总参数滤波电路	129
5.2.1 巴特沃斯滤波电路	129
5.2.2 切比雪夫滤波电路	133
5.2.3 归一化滤波电路的变换	138
5.3 分布参数滤波电路	147
5.3.1 基本方法	147
5.3.2 低通滤波电路的设计	151
5.3.3 带阻滤波电路	159
5.3.4 带通滤波电路	163
习题	172
第 6 章 匹配电路和偏置电路	175
6.1 匹配电路的概念	175
6.2 集总参数匹配电路	178
6.2.1 变压器阻抗变换电路	178
6.2.2 L 形匹配电路	182
6.2.3 集总参数 L 形匹配电路	182
6.2.4 匹配禁区和频率响应	190
6.2.5 T 形和 π 形匹配电路	198
6.3 分布式匹配电路	202
6.3.1 混合型匹配电路	202
6.3.2 单分支匹配电路	204
6.3.3 双分支匹配电路	208
6.4 阻抗匹配电路综合设计	211
6.5 偏置电路	215
6.5.1 偏置电路基本概念	216
6.5.2 无源偏置电路	219
6.5.3 有源偏置电路	223
习题	227
第 7 章 射频放大电路	231
7.1 小信号射频放大电路	232
7.1.1 放大电路稳定性分析	232
7.1.2 绝对稳定的充要条件	238
7.1.3 潜在不稳定情况	240
7.1.4 放大电路的增益	241
7.2 射频放大电路的噪声	252
7.2.1 噪声信号的特性和分类	252
7.2.2 等效噪声温度和噪声系数	254
7.2.3 等噪声系数圆	259
7.3 宽带放大电路	262

7.4	功率放大电路	266
7.4.1	A类功率放大电路	267
7.4.2	B类和C类功率放大电路	269
7.4.3	功率合成放大电路	272
7.4.4	功率放大的交调失真	274
7.5	射频放大电路综合分析设计	276
	习题	287
第8章	振荡电路	291
8.1	反馈型振荡电路	291
8.1.1	振荡电路的工作条件	291
8.1.2	LC型振荡电路	297
8.1.3	石英晶体振荡电路	307
8.2	负阻型振荡电路	311
8.2.1	负阻振荡电路的原理	312
8.2.2	负阻振荡电路设计	320
8.3	振荡电路的分析和应用	334
8.3.1	频率稳定度	334
8.3.2	可调谐振荡电路	336
8.3.3	混合参数型振荡电路	344
8.3.4	寄生振荡和间歇振荡	345
	习题	347
第9章	频率变换和调制电路	350
9.1	整流和检波电路	350
9.1.1	二极管的小信号分析	351
9.1.2	二极管在检波电路中的应用	353
9.2	混频电路类型和参数	363
9.2.1	混频电路的类型	364
9.2.2	混频电路的参数	366
9.3	混频电路的设计	370
9.3.1	无源混频电路	370
9.3.2	有源混频电路	378
9.4	调制和解调电路	388
9.4.1	调制电路	390
9.4.2	解调电路	400
	习题	406
第10章	锁相环电路设计	409
10.1	锁相环的基本组成与工作原理	409
10.2	锁相环的结构和模型	410
10.3	锁相环的特性	413

10.3.1 锁相环的带宽	413
10.3.2 锁相环的非线性特性	414
10.3.3 锁相环的基本传递函数	415
10.3.4 锁相环的阶数	416
10.4 锁相环的稳定性	417
10.5 鉴相器电路	418
10.6 频率合成器中锁相环的应用	421
习题	422
第 11 章 射频系统参数	423
11.1 功率增益	423
11.2 噪声系数	424
11.3 三阶交调截点	425
11.4 动态范围	426
习题	430
参考文献	432
附录	433
附录 A 物理常数	433
附录 B 数量级表示	433
附录 C IEEE 和商用波段划分	433
附录 D 声波频率划分表	434
附录 E 常用广播系统的工作频段	434
附录 F 传输线特征阻抗的初等方法推导	435
附录 G 两端口网络参数的换算	436

第1章 绪 论

1.1 射 频 概 念

在 1864~1873 年,英国物理学家麦克斯韦(James Clark Maxwell)通过电磁学的研究,提出了著名的 Maxwell 方程组,并从理论上预言了电磁波的存在。1887~1891 年,德国物理学家赫兹(Heinrich Hertz)通过电磁学实验首次证实了电磁波的存在。1901 年,马可尼(Guglielmo Marconi)利用电磁波实现了横跨大西洋的无线通信。1947 年,美国贝尔实验室发明了双极型晶体管,逐步取代了体积大、功耗高的真空管电子器件。晶体管是 20 世纪电子领域最重要的发明之一,推动了众多行业的发展。电视和广播等属于单向信息传输的无线通信方式,移动通信则是一种双向信息传输的无线通信方式。射频集成电路和微波集成电路的出现,使通信设备价格更低廉、体积更小、重量更轻,射频通信电路逐步从军用转向民用,并推动了射频通信技术的进一步发展。

随着科学技术的不断进步,电子通信系统也不断完善和发展。从有线传输的语音通信到无线传输的移动通信,从窄带语音通信到宽带综合业务通信,从模拟调制信号通信到数字调制信号通信,电子通信系统越来越先进也越来越复杂。随着通信系统信息容量的不断提高,射频通信技术越来越显示其重要性。

按照通信信号的不同频率范围,可以把通信系统使用的频率人为地划分成很多波段。频率和波段的划分标准见表 1-1。表 1-1 给出了信号频率和相应的自由空间波长。例如,50Hz 的交流电属于 ELF 频段;调幅广播属于 MF 频段;调频广播属于 VHF 频段;电视广播属于 VHF 和 UHF 波段;GSM 移动通信属于 UHF 波段;很多卫星通信使用了 SHF 波段的频率。国外还有其他波段划分和命名方法,可以参看附录 C。

表 1-1 频率和波段的划分

波段	缩写	频率范围	波长		波长相对尺度
极低频	ELF	30~300Hz	1000~10000km		地球直径
音频	VF	300~3000Hz	100~1000km		山峰高度
甚低频	VLF	3~30kHz	10~100km		
低频	LF	30~300kHz	1~10km	长波	
中频	MF	300~3000kHz	0.1~1km	中波	高层建筑
高频	HF	3~30MHz	10~100m	短波	
甚高频	VHF	30~300MHz	1~10m	米波	人的身高
特高频	UHF	300~3000MHz	0.1~1m	分米波	书本
超高频	SHF	3~30GHz	1~10cm	厘米波	手机
极高频	EHF	30~300GHz	0.1~1cm	毫米波	

目前,射频(Radio Frequency, RF)没有一个严格的频率范围定义。广义的射频信号是指所有频率高于 10kHz,可以向外辐射电磁能量的信号。频率为 10kHz~30MHz 的信号,对应的波长超过 10m,在通常尺寸的电路板上电磁能量的辐射非常弱。电路设计与低频电路的设计区别不大。对于频率高于 30MHz 的信号,在电路设计时往往需要考虑如相位偏移、寄生参数、噪声、辐射等因素的影响。如果信号的频率高于 4GHz,则需要参考微波电路的方法进行电路设计。这些信号的频率都高于 10kHz,均属于广义射频的范围。由于广义射频信号定义的频率范围太宽,在实际应用中的使用较少。

在现代电路设计和通信系统应用中,通常将射频的频率范围定义为 30MHz~4GHz。这个的频率范围比广义的射频频率范围更为严格,电路设计具有更显著的特征,因而得到了广泛的应用和普遍的认可。本书中涉及的射频均指 30MHz~4GHz 的频率范围,本书讨论的射频通信电路,工作频率基本上也都位于 30MHz~4GHz 的范围。

从电路设计的角度来看,射频电路的设计既不同于低频电路设计,又区别于微波电路设计。如果信号频率低于 30MHz,通常可以采用低频电路的设计方法。如果信号的频率高于 4GHz,则通常属于微波电路设计的方法。在低频电路设计中,无须考虑线路上引线的长度和一些寄生参数的影响,可以使用基尔霍夫定律进行电路分析。在微波电路设计中,主要应用波导、谐振腔、环形器等元件,必须使用基于电磁场的方法进行电路分析。例如,线路板上传输线的直角转弯,如何设计才能尽可能减小信号的损失,就属于微波电路设计的范畴。射频电路设计方法通常是介于低频电路设计与微波电路设计之间的一种方法。射频电路的频率不是很低,在电路设计时无法直接使用基尔霍夫定律,但是射频电路的频率又不是特别高,不必完全使用电磁场的分析方法。

射频的范围(30MHz~4GHz)覆盖了大多数电子通信系统载波的频率。例如,CATV 有线电视广播、GSM 移动通信系统、C 波段卫星通信等,都属于射频的范围。在通信领域内,射频电路得到广泛的应用。个人移动通信系统就是射频通信电路的一个典型应用。

随着射频电路的广泛应用和不断发展,射频的范围还将向更高的频率延伸。例如,目前一些厂家已经规定射频的高端频率为 9GHz,把高于 9GHz 的频率划归到微波范围,低于 9GHz 的频率划分为射频范围。

1.2 射频通信电路应用简介

在电子通信系统中,只有使用更高的载波频率,才能获得更大的带宽。使用射频通信技术的一个重要目的,就是使通信系统获得更高的信息容量。例如,按照 10%的带宽计算,有线电视系统中使用 100MHz 的载波可以获得 10MHz 的带宽,大致相当于 2 个电视频道的容量;而 C 波段卫星通信使用 4GHz 的载波可以获得 400MHz 的带宽,大致相当于 80 个电视频道的容量。因此,为了在通信系统中获得更高的信息容量,就必须从高频通信系统过渡到射频通信系统。

在射频的高端频段,射频信号在自由空间中具有类似光线的直线传输特性,而且由于频率的升高,射频信号的波长更短。例如,900MHz 的射频信号,自由空间的波长只有 30cm 左右,如果使用长度为 $\lambda/4$ 的单极天线,天线长度大约为 7cm。射频高端频段信号的直线传输和天线体积小的特性,特别适合于无线通信系统的应用。射频高端频段信号的另一个重要

的特性是可以穿透电离层,实现卫星通信。因此,射频通信技术在无线通信系统中得到了广泛应用。

经过近十年的发展,越来越多的通信系统使用了射频通信技术。射频通信系统的主要优点包括以下几点。

- (1) 由于射频频率更高,可以利用更宽的频带获得更高的信息容量。
- (2) 射频电路中电容和电感尺寸缩小,通信设备的体积进一步减小。
- (3) 射频通信可以提供更多的可用频谱,解决频率资源日益紧张的问题。
- (4) 通信信道之间的频率间隙增大,减小了信道的相互干扰。
- (5) 可以利用小尺寸天线实现较高增益,便于移动通信系统的实现。

近年来,射频通信电路的主要应用领域包括卫星通信、个人移动通信(GSM、CDMA和3G)、无线局域网(WLAN)、航空通信、车载和船载通信、高速数字通信、光纤通信、电视广播和电台广播等。在光纤通信系统中,使用低损耗的光纤来传输调制的光信号。由于光信号具有极高的频率,通信系统具有很高的信息容量,而且可以避免电磁场的干扰。在光纤通信系统的发射端和接收端,都需要进行光信号和电信号的相互转换,也需要相应电信号的处理电路,例如,调制电路和解调电路。这些相关电路的设计都需要用到射频电路设计的知识。

射频通信电路主要的应用是在无线通信系统。不同射频通信系统具有类似的结构,典型的射频通信系统包括调制、变频、放大、解调等部分。下面以移动通信系统为例简单介绍射频通信系统的一些参数和基本电路结构。

根据信号调制方式和频带宽度的不同,移动通信有几种标准,如IS-54、IS-95和GSM等,载波频率都集中在900~1800MHz,属于射频的频率范围。表1-2列出了6种主要移动通信系统的参数比较。

表 1-2 移动通信系统的参数

系统名称	IS-54	IS-95	GSM	CT2	DCS1800	DECT
频带(上行)/MHz	869~894	869~894	935~960	864~868	1805~1880	1880~1900
频带(下行)/MHz	824~849	824~849	890~915	864~868	1710~1785	1880~1900
频带宽度/MHz	50	50	50	2	150	20
通道选择	TDMA/FDMA	CDMA/FDMA	TDMA/FDMA	FDMA	TDMA/FDMA	TDMA
信道宽/kHz	30	1250	200	100	200	1728
信道/载波	3	55~62	8	1	16	12
通道数	832	20	124	40	375	10
用户数	2496	15960	992	40	5984	120
双工方式	FDD	FDD	FDD	TDD	FDD	TDD
通道比特率/kbit/s	48.6	12288	271	73	271	1152
调制	$\pi/4$ DQPSK	BPSK/OQPSK	GMSK	FSK	GMSK	GMSK
移动峰值功率/W	0.6~3	0.2~2	2~20	0.01	0.25~2	0.25
移动平均功率/W	0.6~3	0.2~2	0.25~2.5	0.005	0.03~0.25	0.01

以 GSM 移动通信系统为例,表 1-3 列出了移动通信 GSM900 和 GSM1800 系统的相关射频参数。在 GSM900 标准中, P 波段的上行频率和下行频率的间隔为 45MHz, 上行和下行频带宽度均为 25MHz, 系统共占用 50MHz 的频率资源。在上行/下行的 25MHz 带宽内, 提供了 124 个信道, 每个信道的带宽为 200kHz, 调制方式为 GMSK。在此通信系统中, 需要设计工作在 900MHz 的放大电路、滤波电路、混频电路、振荡电路等。只有使用射频电路设计方法才能获得一个性能优良的 GSM 移动通信系统。

表 1-3 GSM900 和 GSM1800 的 RF 数据

系统相关射频参数	GSM900		GSM1800
	P 波段	G1 波段	L 波段
频率范围			
上行频率/MHz(手机发射)	890~915	880~890	1710~1785
下行频率/MHz(基站发射)	935~960	925~935	1805~1880
双工间隔/MHz	45	55	95
占用频谱/MHz	2×25	2×10	2×75
通道数	124	49	374
绝对无线信道号(ARFCN)	1~124	975~1023	512~885
同时用户数	992	392	2992
信道间隔/kHz	200		
调制方式	GMSK ($B \times T$)=0.3		
数据传输速率/kbit/s	270.88		
比特持续期/ μ s	2.69		

GSM 手机实际上是工作在脉冲状态, GSM 的无线信道是由不断重复出现的帧组成, 每个帧是持续时间为 4.62ms 的射频信号。每个帧内包含 8 个 577 μ s 的时间间隙, 每一个时间间隙包含一系列的脉冲串用于构成一个信息包。发射时间间隙和接收时间间隙之间有 2 个时间间隙的空闲, 以避免发射信号和接收信号的相互干扰。一个帧可以容纳 8 对发射和接收的时间间隙, 也就是 8 个用户可以分时共用一个 200kHz 的信道。通过这种时分多址(TDMA)的方式, GSM 通信系统利用有限的频带资源提供更多的信道。以 200kHz 为信道的带宽, GSM900 上行和下行 25MHz 的带宽内只能容纳 124 个信道。通过时分多址的方式, 每个信道可以容纳 8 个用户, 将使 GSM900 理论上可以扩充到 992 个并发用户。

图 1-1 给出了一款 IS-54 手机射频前端电路的结构框图。天线接收到的信号经过双工器进入接收通道, 通过带通滤波电路(BPF)后进入低噪声放大电路(LNA)。870.03MHz 的输入射频信号与压控振荡电路(VCO)产生的 953.19MHz 的本振信号混频, 生成 83.16MHz 的第一中频信号。第一中频信号再与 82.71MHz 的本振信号混频, 生成 450kHz 的第二中频信号, 经过限幅器送入 DSP 进行处理。在手机的发射通道中, 利用 VCO 产生的 953.19MHz 信号与 128.16MHz 的信号混频, 产生 825.03MHz 的射频信号, 经过移相网络产生相位相差 90°的正交信号, 分别受到数字信号的 I/Q 正交调制, 完成数字信号对射频信号的调制。再通过放大电路和滤波电路, 进入射频功率放大电路。获得足够的功率增益后, 通过天线将包含数字调

制信息的射频信号辐射出去。正交调制 I/Q 输入信号和 450kHz 的中频信号相关的处理电路都可以使用低频电路设计方法来实现。由于手机接收信号和发射信号位于不同的时间，可以控制双工器以分时的方式连接到接收通道和发射通道。

实际手机电路中为了提高信号频率和相位的稳定性，需要利用锁相环(PLL)控制压控振荡电路的频率和相位，还必须使用幅度控制电路控制接收和发射通道放大电路的增益，以适应信号强度的变化。另外，还要加入温度补偿电路提高稳定性，增加电源控制模块尽可能降低功率消耗。

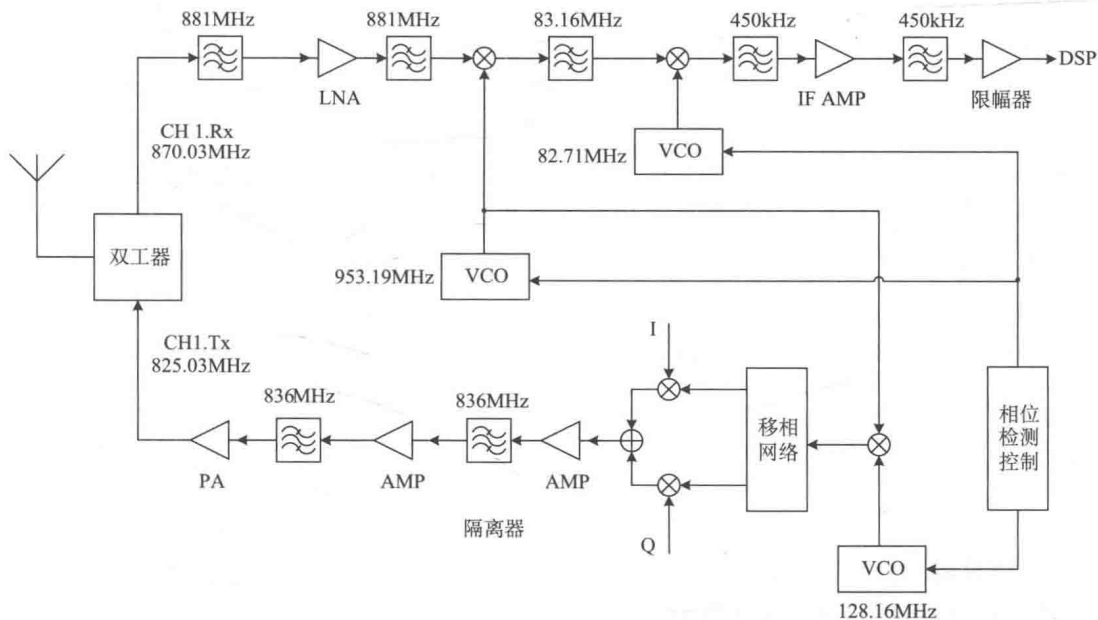


图 1-1 IS-54 手机前端电路框图

在图 1-1 所示的手机电路中，涉及很多射频电路的设计，包括滤波电路、低噪声放大电路、功率放大电路、混频电路、调制解调电路和压控振荡电路等。这些电路都需要使用射频电路的设计方法。本书将首先介绍射频电路设计的基本理论，然后逐章讨论常用的射频通信单元电路，包括电路基本原理和设计方法。

1.3 射频电路设计的特点

在射频电路设计中，由于电路工作频率较高，必须考虑相位偏移、噪声、损耗和匹配等因素的影响。射频电路设计具有与低频电路设计不同的特点，如分布参数、趋肤效应和传输线设计等。

1.3.1 分布参数

集总参数元件是指一个独立的局域性元件，能够在一定的频率范围内提供特定的电路性能。在低频电路设计中，可以把元件看作集总参数元件，认为元件的特性仅由元件自身决定，元件的电磁场都集中在元件内部。例如，电阻、电感和电容等都被看做集总参数元件。一个

电容的容抗由电容器自身的特性决定,不会受周围元件的影响。如果把其他元件靠近这个电容器,其容抗不会随之变化。

分布参数元件是指一个元件的特性延伸扩展到一定的空间范围内,不再局限于元件自身。由于分布参数元件的电磁场分布在附近空间中,其特性要受周围环境的影响。例如,一段不连续微带传输线构成的分布参数电容,其特性延伸到了微带线附近。如果把介质靠近微带线,会扰动电磁场分布而影响等效电容的大小。

在低频电路设计中,通常可以把元件看作集总参数元件;在射频电路设计中,经常会涉及一些分布参数元件。同一个元件,在低频电路设计中可以看作集总参数元件,但是在射频电路设计中可能需要作为分布参数元件进行处理。例如,一定长度的一段传输线,在低频电路中可以看作集总参数元件;在射频电路中,就必须看作分布参数元件。

分布电容主要指在元件自身封装、元件之间、元件到接地平面、线路板布线间形成的非期望电容。分布电容通常与元件为并联关系。分布电感是指元件引脚、连线、线路板布线等形成的非期望电感。分布电感通常与元件为串联关系。在低频电路设计中,通常忽略分布电容和分布电感对电路的影响。随着电路工作频率的升高,在射频电路设计中必须同时考虑分布电容和分布电感的影响。

例 1-1 如果分布电容为 $C_D=1\text{pF}$,请计算在 $f=2\text{kHz}$ 、 2MHz 和 2GHz 时,分布电容的容抗 X_D 。

解 分布电容 C_D 的容抗 X_D 为

$$X_D = \frac{1}{\omega C_D} = \frac{1}{2\pi f C_D}$$

从而计算得到分布容抗 X_D 如下:

- (1) 当 $f=2\text{kHz}$ 时,容抗 $X_D=79.6\text{M}\Omega$ 。
- (2) 当 $f=2\text{MHz}$ 时,容抗 $X_D=79.6\text{k}\Omega$ 。
- (3) 当 $f=2\text{GHz}$ 时,容抗 $X_D=79.6\Omega$ 。

1pF 的电容大概相当于两个相互靠近的 $1/8\text{W}$ 金属膜电阻之间的分布电容,或者相当于印刷线路板一小块覆铜板的对地电容。频率为 2kHz 和 2MHz 时, 1pF 的电容具有很高的容抗,可以忽略不计。频率为 2GHz 时, 1pF 的电容只有 79.6Ω 的容抗,已经与射频电路的标准阻抗 $Z_0=50\Omega$ 可以比拟。因此,分布电容会影响射频元件的阻抗并改变电路的特性,在射频电路设计中需要考虑分布电容的影响。

例 1-2 如果分布电感 L_D 为 1nH ,求在 $f=2\text{kHz}$ 、 2MHz 和 2GHz 时,分布电感 L_D 的感抗 X_D 。

解 根据感抗的计算公式可以得到

$$X_D = \omega L_D = 2\pi f L_D$$

在代入数据进行计算得到分布电感 L_D 的感抗 X_D 分别如下:

- (1) 当频率 $f=2\text{kHz}$ 时,感抗 $X_D=12.6\times 10^{-6}\Omega$ 。
- (2) 当频率 $f=2\text{MHz}$ 时,感抗 $X_D=12.6\times 10^{-3}\Omega$ 。
- (3) 当频率 $f=2\text{GHz}$ 时,感抗 $X_D=12.6\Omega$ 。

1nH 的电感大概相当于元件较长的引脚形成的电感,或者相当于印刷线路板上一段弯曲

的细导线的电感。频率为 2kHz 和 2MHz 时, 分布电感的影响可以忽略不计。频率为 2GHz 时, 分布电感具有 12.6Ω 的感抗, 可以与射频通信电路中 $Z_0=50\Omega$ 的标准阻抗相比拟。因此, 在射频电路设计中, 也必须考虑这些分布电感的影响。

在射频电路设计中, 分布电感的影响可能使电容器呈现出电感特性; 分布电容的影响也可能使电感器呈现出电容特性。通常元件同时受分布电容和分布电感的影响, 随频率的升高元件特性变化比较复杂。这些分布参数可能改变电路的特性, 影响电路的工作状态。在射频电路设计中, 必须解决好分布参数对电路影响的问题, 才能设计出性能良好的电路。

1.3.2 $\lambda/8$ 设计准则

随着工作波长的变短, 电路板上不同位置电压的相位差变大, 因此必须考虑电压和电流空间分布的变化。如果考虑电路板上连线长度、宽度等参数对信号相位和阻抗的影响, 就需要使用基于分布参数的传输线理论分析电路特性。

通常使用 $\lambda/8$ 准则, 判断是否使用传输线理论进行电路分析和设计。当电路板的几何尺度小于 $\lambda/8$ 时, 可以不使用传输线理论进行电路设计; 当电路板的几何尺度大于 $\lambda/8$ 时, 必须使用传输线理论进行电路设计。这里没有以工作频率作为是否使用传输线理论的标准, 而是以工作波长和电路尺度的相对关系作为判断标准。

例 1-3 某 CPU 的内部核心电路尺寸为 5mm 左右, 时钟频率为 2GHz。请判断 CPU 内部电路设计是否需按照传输线理论进行分析和设计。

解 2GHz 信号对应的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0.15\text{m}$$

计算得到 $\frac{\lambda}{8} \approx 19\text{mm}$ 。按照 $\lambda/8$ 的设计准则, $l = 5\text{mm} < \frac{\lambda}{8}$, 可以不按照传输线理论进行电路设计。

例 1-4 射频电路尺寸为 10cm 左右, 工作频率达到了 900MHz。请判断该电路设计是否需按照传输线理论进行分析和设计。

解 900MHz 信号对应的波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0.33\text{m}$$

计算得到 $\frac{\lambda}{8} \approx 4\text{cm}$ 。按照 $\lambda/8$ 的设计准则, $l = 10\text{cm} > \frac{\lambda}{8}$, 必须按照传输线理论进行电路设计。

1.3.3 趋肤效应

趋肤效应使电流集中在导体表层区域中, 导致有效导电面积的变小, 使导体的交流电阻增加。在射频电路中, 趋肤效应更加显著, 需要特别注意。趋肤深度 δ 定义为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.1)$$

其中, f 为工作频率; μ 为导体的磁导率; σ 为导体的电导率。例如, 铜的电导率为