

全国普通高等院校  
电子信息与通信类精品教材

QUANGUO PUTONG GAODENG YUANXIAO DIANZI XINXI YU TONGXINLEI JINGPIN JIAOCAI



# 射频通信电路

主编 林云

Radio Frequency



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

全国普通高等院校  
电子信息与通信类精品教材

# 射频通信电路

主 编 林 云  
副主编 曾 浩 胡文江



华中科技大学出版社  
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

射频通信电路/林云 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年8月  
ISBN 978-7-5609-5381-6

I. 射… II. 林… 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(2009)第 084037 号

射频通信电路

林云 主编

策划编辑:张志华

责任编辑:余涛

责任校对:刘竣

封面设计:潘群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:武汉正风图文照排中心

印刷:仙桃市新华印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:19.5

字数:480 000

版次:2009年8月第1版

印次:2009年8月第1次印刷 定价:29.80元

ISBN 978-7-5609-5381-6/TN·142

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 内 容 提 要

本书以移动通信系统为背景,系统介绍射频系统的各个模块的基本原理,分析其设计方法,以及射频系统的构成与设计的基本知识。本书内容主要包括:射频电路的特点与常见的移动通信系统、传输线、噪声与非线性失真、低噪声放大器、功率放大器、振荡器、锁相与频率合成技术、调幅与检波、调角与解调、数字调制与解调、收发信机的结构与设计等。

本书可作为电子信息工程、通信工程、无线电技术、电子科学与工程、自动控制等电类相关专业本科生(或专科生)教材,也可供相关的研究生、技术人员参考。

# 前 言

近 30 年来,以移动通信运用为主的无线技术得到迅速发展,包括无线局域网、全球定位系统、卫星通信、射频识别系统等已经取得巨大的成功。同时,人们对宽带无线通信(Wimax)、4G 通信标准的热情也日益高涨。射频电路作为在整个系统中不可缺少的部分,直接影响着通信系统的性能。近年来,射频技术成为热点的另一理由是,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为无线收发信机的一个瓶颈。目前,高校电子信息类、电子技术类、通信工程类专业都已经把射频电路或通信电路作为一门主要的专业课程。

本书以传输线理论为基础,并兼顾了集总参数内容,以移动通信电路为背景,注重基础理论与系统性。作者参考国内外相关文献,并结合自己的教学体会和科研实践,编写了本书。本书主要特色如下。

(1) 面向学生,始终强调基本概念、基本原理、基本电路和基本测试方法,以理解概念、实现功能为主。

(2) 本书力求精练,易于学生阅读。

(3) 删除陈旧的内容,与时代结合增加了新的内容。

(4) 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,介绍整个系统设计方法。

(5) 强调指标。

(6) 强调系统设计,本书既介绍基本单元电路,也介绍系统设计。

本书共分 11 章。第 1 章为绪论,主要介绍射频电路的特点、谐振回路、通信系统;第 2 章介绍传输线理论;第 3 章介绍噪声与非线性失真;第 4 章介绍低噪声放大器;第 5 章介绍功率放大器;第 6 章介绍振荡器的设计;第 7 章介绍混频器;第 8 章介绍幅度调制与解调;第 9 章介绍角度调制与解调;第 10 章介绍射频锁相与频率合成器;第 11 章介绍无线收发信机的结构。作为一种探索,书中包含了较为丰富的内容供学生与老师选用。

林云编写了第 1、2、3、4、5、11 章,全书的提纲及附录,做了全书的统稿工作,并对其他章节做了部分修改。曾浩编写了第 6、7、10 章,胡文江编写了第 8、9 章。

由于作者水平有限,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 6 月于重庆邮电大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 无线系统发展概况 .....	(1)
1.2 通信系统概述 .....	(2)
1.2.1 通信系统的组成 .....	(2)
1.2.2 发射机和接收机的组成 .....	(3)
1.3 射频频谱 .....	(3)
1.4 射频电路的特点 .....	(5)
1.5 无源元件的射频特性 .....	(5)
1.5.1 金属导体 .....	(5)
1.5.2 电阻器 .....	(7)
1.5.3 电容 .....	(9)
1.5.4 电感.....	(10)
1.6 射频系统的应用.....	(11)
1.6.1 卫星通信系统.....	(11)
1.6.2 GSM 移动通信系统 .....	(12)
1.7 常用的射频/微波接头 .....	(13)
1.8 分贝的概念.....	(13)
1.9 LC 谐振电路的特性 .....	(14)
1.9.1 串联谐振回路.....	(14)
1.9.2 并联谐振回路.....	(16)
习题 1 .....	(17)
<b>第 2 章 传输线理论</b> .....	(19)
2.1 传输线.....	(19)
2.2 传输线的集总元件模型.....	(19)
2.3 传输线上波的传播.....	(20)
2.4 无损传输线.....	(21)
2.5 终端传输线.....	(21)
2.6 终端传输线的特殊情况.....	(24)
2.7 信号源和负载失配.....	(25)
2.8 阻抗圆图.....	(28)
习题 2 .....	(30)
<b>第 3 章 噪声与非线性失真</b> .....	(31)
3.1 概述.....	(31)
3.2 噪声的概念.....	(31)

3.2.1	噪声的产生	(31)
3.2.2	举例说明(以电阻热噪声为例)	(31)
3.2.3	噪声的表示	(32)
3.3	噪声源	(33)
3.3.1	电阻的热噪声及其等效电路	(33)
3.3.2	散弹噪声	(34)
3.3.3	闪烁噪声	(34)
3.3.4	爆米花噪声	(35)
3.4	电路器件的噪声	(35)
3.4.1	双极型晶体管的噪声	(35)
3.4.2	场效应管的噪声	(36)
3.4.3	电抗元件的噪声	(36)
3.4.4	二端口网络的等效输入噪声源	(37)
3.5	噪声系数	(37)
3.5.1	噪声系数的定义	(38)
3.5.2	噪声系数与信号源电阻的关系	(38)
3.5.3	无源有耗网络的噪声系数	(39)
3.6	等效噪声温度	(40)
3.6.1	等效噪声温度定义	(40)
3.6.2	等效噪声温度与噪声系数的关系	(40)
3.6.3	噪声温度的测量	(41)
3.7	多级线性网络级联的噪声系数	(42)
3.8	非线性器件的分析方法	(44)
3.8.1	非线性器件的描述方法	(44)
3.8.2	参数线性化	(46)
3.9	器件非线性的影响	(47)
3.10	灵敏度与动态范围	(51)
3.10.1	灵敏度	(51)
3.10.2	动态范围	(51)
	习题 3	(52)
<b>第 4 章</b>	<b>低噪声放大器</b>	<b>(53)</b>
4.1	引言	(53)
4.2	低噪声放大器的性能指标	(53)
4.3	二端口网络的噪声	(55)
4.4	放大器件的二端口网络噪声参数分析	(58)
4.5	低噪声放大器电路结构	(60)
4.5.1	共源放大器	(61)
4.5.2	共栅放大器	(61)

4.5.3 源极串联电感的共源放大电路	(62)
4.6 S参数低噪声放大器设计	(64)
4.6.1 S参数	(64)
4.6.2 S参数与反射系数的关系	(64)
4.6.3 二端口功率增益	(65)
4.6.4 二端口功率增益的进一步讨论	(67)
4.6.5 稳定性	(68)
4.6.6 单向设计方法	(71)
4.6.7 低噪声放大器设计	(74)
4.6.8 设计总结	(76)
4.7 调谐放大器	(77)
习题4	(78)
<b>第5章 功率放大器</b>	<b>(80)</b>
5.1 概述	(80)
5.2 A、B类功率放大器简介	(81)
5.2.1 A(甲)类功率放大器	(81)
5.2.2 B(乙)类功率放大器	(82)
5.3 C类谐振功率放大器	(83)
5.3.1 电路组成与特点	(83)
5.3.2 输出功率与效率	(85)
5.3.3 动态负载线	(86)
5.3.4 C类功率放大器的性能分析	(88)
5.3.5 C类放大器的馈电电路	(91)
5.4 D类高功率放大器	(92)
5.5 匹配电路	(94)
5.5.1 基本阻抗变换电路	(94)
5.5.2 运用举例	(94)
5.5.3 常用LC匹配网络	(97)
5.6 晶体管的大信号参数	(97)
5.7 高频功率放大器的设计	(98)
5.8 丙类倍频器	(102)
5.9 传输线变压器原理	(102)
5.9.1 传输线变压器及其阻抗变换	(103)
5.9.2 传输线变压器的非理想情况	(104)
5.10 功率合成与功率分配电路	(107)
5.10.1 功率分配器	(107)
5.10.2 功率合成器及线性功放电路	(109)
习题5	(110)



<b>第 6 章 振荡器的设计</b> .....	(112)
6.1 振荡器的基本模型 .....	(112)
6.1.1 反馈型振荡器的工作原理 .....	(112)
6.1.2 反馈振荡器的起振、平衡和稳定条件.....	(113)
6.2 LC 振荡器 .....	(116)
6.2.1 互感耦合 LC 振荡器 .....	(116)
6.2.2 振荡器的相位噪声和频率稳定性 .....	(121)
6.2.3 三点式振荡器 .....	(124)
6.2.4 改进的三点式振荡器 .....	(130)
6.3 其他振荡器 .....	(132)
6.3.1 负阻 LC 振荡器 .....	(132)
6.3.2 晶体振荡器 .....	(135)
6.3.3 压控振荡器 .....	(139)
6.3.4 反馈型 RC 振荡器 .....	(141)
6.3.5 多谐振荡器 .....	(143)
6.4 寄生振荡、间歇振荡及实际使用的振荡电路.....	(143)
6.4.1 寄生振荡和间歇振荡 .....	(143)
6.4.2 实用的振荡电路 .....	(145)
习题 6 .....	(147)
<b>第 7 章 混频器</b> .....	(152)
7.1 混频电路的组成模型 .....	(152)
7.1.1 混频器的类型 .....	(152)
7.1.2 混频器的构成 .....	(152)
7.1.3 混频器的技术指标 .....	(153)
7.1.4 混频器的组成和工作原理 .....	(155)
7.2 三极管混频电路的分析 .....	(156)
7.2.1 三极管混频电路的工作原理 .....	(156)
7.2.2 实用三极管混频电路 .....	(159)
7.2.3 场效应管混频电路 .....	(161)
7.2.4 混频失真 .....	(161)
7.3 平衡混频器 .....	(165)
7.3.1 二极管平衡混频器 .....	(165)
7.3.2 二极管双平衡混频器(二极管环形混频器) .....	(167)
7.3.3 双差分平衡混频器 .....	(167)
习题 7 .....	(168)
<b>第 8 章 幅度调制与解调</b> .....	(172)
8.1 概述 .....	(172)
8.2 调幅波的基本性质 .....	(172)

8.2.1 普通调幅(AM) .....	(173)
8.2.2 双边带调幅(DSB) .....	(175)
8.2.3 单边带调幅(SSB) .....	(176)
8.3 调幅信号的产生 .....	(176)
8.3.1 AM 和 DSB .....	(176)
8.3.2 SSB 信号的产生 .....	(177)
8.4 幅度解调 .....	(178)
8.4.1 相干解调 .....	(178)
8.4.2 包络检波 .....	(179)
8.5 幅度调制与解调基本电路 .....	(179)
8.5.1 二极管环形调制器 .....	(180)
8.5.2 利用乘法器实现调幅和同步检波 .....	(182)
8.5.3 包络检波电路 .....	(188)
习题 8 .....	(193)
<b>第 9 章 角度调制与解调</b> .....	(197)
9.1 角度调制的基本性质 .....	(197)
9.1.1 调频波 .....	(198)
9.1.2 调相波 .....	(198)
9.1.3 单音调制的角调波 .....	(198)
9.1.4 调角波的波形与频谱分析 .....	(199)
9.1.5 调角波的通信可实施性分析 .....	(202)
9.1.6 调角波的带宽 .....	(203)
9.2 调频波的产生与解调 .....	(204)
9.3 调频基本电路 .....	(205)
9.3.1 调频电路的主要性能指标 .....	(205)
9.3.2 直接调频的实现及性能分析 .....	(205)
9.3.3 间接调频方法及调相电路的优势 .....	(214)
9.4 调角波的解调基本电路 .....	(218)
9.4.1 鉴频电路的主要性能指标 .....	(218)
9.4.2 斜率鉴频器 .....	(219)
9.4.3 相位鉴频器 .....	(220)
9.5 数字调制与解调 .....	(228)
9.5.1 二进制数字调制与解调原理 .....	(229)
9.5.2 二进制数字调制系统的性能比较 .....	(235)
9.5.3 多进制数字调制系统 .....	(237)
习题 9 .....	(243)
<b>第 10 章 射频锁相与频率合成器</b> .....	(247)
10.1 锁相环路的分析 .....	(247)

10.1.1	锁相环路概述	(248)
10.1.2	锁相环路的基本环路方程	(249)
10.1.3	一阶锁相环	(253)
10.1.4	二阶锁相环	(257)
10.1.5	二阶锁相环路跟踪性能的线性分析	(258)
10.2	锁相环路的噪声和稳定性	(262)
10.3	频率合成器的基本原理	(265)
10.3.1	频率合成器的主要指标	(265)
10.3.2	锁相频率合成的方法	(266)
10.4	锁相频率合成电路的设计举例	(268)
	习题 10	(269)
<b>第 11 章</b>	<b>无线收发信机的结构</b>	<b>(271)</b>
11.1	概述	(271)
11.2	接收机方案	(273)
11.2.1	超外差式接收机	(273)
11.2.2	直接下变频方案	(276)
11.2.3	镜频抑制接收方案	(279)
11.2.4	数字中频方案	(281)
11.2.5	亚采样接收器	(283)
11.3	发射机方案	(283)
11.3.1	直接变换发射机方案	(283)
11.3.2	两步变换发射机方案	(284)
11.4	增益控制电路	(285)
11.5	收发信机实际电路	(286)
11.5.1	GSM 接收机框图介绍	(286)
11.5.2	GC87 型 GSM 射频原理电路	(286)
11.6	无线收发信机的主要指标	(290)
11.6.1	发信机技术指标	(290)
11.6.2	接收机指标	(292)
	习题 11	(292)
<b>附录</b>	<b>GC87 手机射频电路</b>	<b>(295)</b>
	部分习题参考答案	(296)
	参考文献	(302)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 无线系统发展概况

无线系统经过一百多年的发展,已经给人们的生活带来了深刻的变化。在现实生活中,人们无处不感觉到它的存在,正如“无线”本身一样。到现在为止,它飞速发展的步伐仍没有丝毫减慢的迹象。

1864年,英国物理学家麦克斯韦(Clerk Maxwell)发表了《电磁场的动力理论》这一著名论文,总结了前人在电磁学方面的工作,得出电磁场方程;从理论上证明了电磁波的存在,为后来的无线电发明和发展奠定了坚实的理论基础。1887年,德国物理学家赫兹(H. Hertz)用实验证实了电磁波是客观存在的。他在实验中证明:电磁波在自由空间的传播速度与光速相同,并能产生反射、折射、驻波等与光波性质相同的现象。麦克斯韦的理论得到了证实。从此以后,许多国家的科学家都在努力研究如何利用电磁波传输信息的问题,这就是无线电通信,其中著名的科学家包括法国的勃兰利(Branly)、俄国的波波夫和意大利的马可尼(Guglielmo Marconi)等。在这些科学家中,马可尼的贡献最大。他于1895年首次在几百米的距离用电磁波进行通信并获得成功,1901年又首次完成了横渡大西洋的通信。从此无线电通信进入了实用阶段。但这时的无线电通信设备是:发送设备用火花发射机、电弧发生器或高频发电机等;接收设备则用粉末(金属屑)检波器。直到1904年,弗莱明发明电子二极管之后,才开始进入无线电电子学时代。

1907年,李·德·福雷斯特(Lee de Forest)发明了电子三极管,用它可组成具有放大、振荡、变频、调制、检波、波形变换等重要功能的电子线路,为现代千变万化的电子线路提供了“心脏”器件。因而电子管的出现是电子技术发展史上第一个重要里程碑。

1948年,肖克莱(W. Shockley)等人发明了晶体三极管,它在节约电能、缩小体积与减轻重量、延长寿命等方面远远胜过电子管,因而成为电子技术发展史上第二个重要里程碑。晶体管在许多方面已取代了电子管的传统地位而成为极其重要的电子器件。

20世纪60年代开始出现的将“管”、“路”结合起来的集成电路,通过几十年的发展已取得极其巨大的成功。中、大规模乃至超大规模集成电路的不断涌现,已成为电子线路,特别是数字电路发展的主流,对人类进入信息社会起到不可估量的推动作用。这可以说是电子技术发展史上第三个重要里程碑。

从发明无线电开始,传输信息就是无线电技术的首要任务。直到今天虽然无线电电子技术领域在迅速扩大,但信息的传输与处理仍然是它的主要内容。射频电子线路所涉及的单元电路都是从传输与处理信息这一基本点出发来进行研究的。因此,有必要在本书的开头概述无线电信号的传输原理,介绍通信系统的组成框图,以便为以后各章单元电路之间的相互联系获得初步的概念,这将有助于今后的学习。

## 1.2 通信系统概述

### 1.2.1 通信系统的组成

电子通信系统是用于发送来自信源的消息或信息到一个或多个目的地的系统。由于信源产生的消息可以是语音、图像、多媒体、数据信号等,因而典型的通信系统可用图 1-1 来表示。

输入换能器是将信源的输出转换成电信号。例如,话筒是用来将声音信号转换成电信号;数码相机的 CCD 是将光信号转变成电信号。输出换能器则将接收的电信号变成用户需要的形式,如声音、图像、文本等。例如,电视显像管是将电信号变成光信号(图像)。

发射机是将电信号变成适合于信道传输的形式。从换能器输入的信号一般频率较低,直接进行无线传输比较困难,因而必须把这种信息“附加”在一个适于信道传输的信号上。在现代无线通信中,这种适于天线发射的信号往往用一个高频正弦波来实现。把信息“附加”在高频载波上的方式称为调制。如果把信息“附加”在载波的幅度上,称之为调幅,如调幅无线电广播。如果输出信息(换能器的输出)被“附加”在载波的频率上则称为调频,例如,调频无线电广播,GSM 手机的发射信号等均属于调频信号。如果输出信息被“附加”在载波的相位上则称为调相。如果信息是数字信号,则上述三种调制方式分别称为 ASK、FSK、PSK。除调制外,发射机一般还要完成信号的放大、滤波、混频等功能。对于数字通信系统还要完成采样、模数变换、编码等功能。

在电子通信系统中要调制的理由有两条:① 低频信号(基带信号)从天线上以电磁能量的形式辐射特别困难,按照天线原理,天线要进行有效的发射,其尺寸与电磁波的波长应是同一数量级;② 信息信号通常占用同样的频带,如果信号从两个或多个源同时发射,它们会相互干扰。例如,所有的商业 FM 台广播语音及音乐信号,它们占用音频频带,从 300 Hz~15 kHz。要避免相互干扰,每个台要将它的信息转换到某一个特定的频带或信道上。信道(channel)通常用来代表分配给特定业务的一个指定的频带。一个标准的语音频带信道占用大约 3 kHz 带宽,并常用于语音质量信号的传输。商业 AM 广播信道占用大约 10 kHz 频带。而微波和卫星无线信道需要 30 MHz 或更多的带宽。

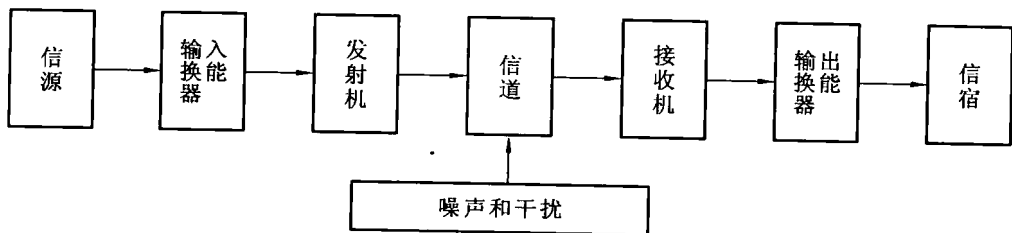


图 1-1 通信系统组成框图

信道是用于将信号从发射机送到接收机的物理介质。信道可分为有线信道和无线信道两类。无线信道是指自由空间。有线信道包括各种有形介质,如电缆,光纤等。信号在信道中的传播特性不仅与介质和环境特点有关,还与信号的频率有关。信号通过信道时一般会有噪声和干扰加入。在无线通信中,噪声是指天线接收的大气噪声和接收机内部的噪声。干扰有各种形式,包括闪电、汽车点火等。

接收机的功能是恢复包含在接收信号中的信息。恢复信号的过程一般是解调,这是与调

制互逆的过程,即从正弦信号中取出有用信号(原基带信号),抑制噪声与干扰。接收机除了要完成解调以外,一般还要完成滤波、混频、放大等功能。对于数字系统,接收机还要完成采样、数模变换、译码等功能。

### 1.2.2 发射机和接收机的组成

发射机主要由采样部分、编码器、混频器、调制器构成,如图 1-2 所示。

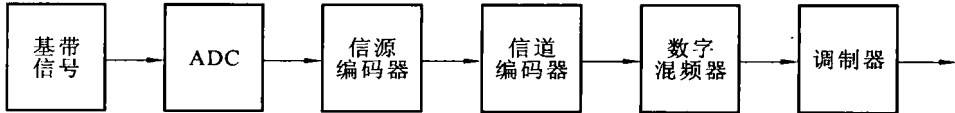


图 1-2 发射机的组成部分

接收机主要由放大器、混频器、解调器、解码器构成,如图 1-3 所示。

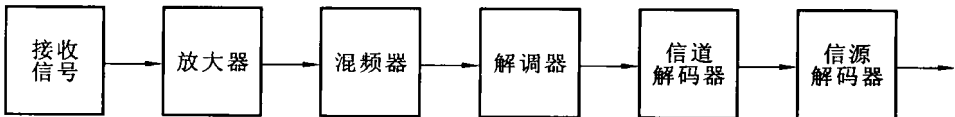


图 1-3 接收机的组成部分

有些发射机和接收机里只有模拟信号,因而也就没有编码和解码部分,由这种发射机和接收机构成的通信系统称为模拟通信系统。反之,如果接收和发射链路存在数字信号,则称为数字通信系统。由于数字信号的可靠性高等,因此现代通信系统已广泛采用数字通信系统。

## 1.3 射频的频谱

在无线信号从天线发射后,它在空中就按电磁波的规律进行传播。电磁波的频谱包括很广泛的频率,不仅包括无线电波,而且还包括红外线、可见光、紫外线、X 射线、 $\gamma$  射线等。为了方便区别,电磁波的频谱被分成了很多波段。过去的一百年来,人们对电磁波谱进行过多种分类尝试,但是第一个被工业界和政府部门广泛接受的分类方法诞生于第二次世界大战后,它由美国国防部提出。目前广泛采用的分类方法是由美国电气电子工程师协会(IEEE)提出并推广的,如表 1-1 所示。

表 1-1 电磁波频谱划分

波段	缩写	频率范围	波长		波长相对尺度
极低频	ELF	30 Hz~300 Hz	1 000 km~10 000 km		地球直径
音频	VF	300 Hz~3 000 Hz	100 km~1 000 km		山峰高度
甚低频	VLF	3 kHz~30 kHz	10 km~100 km		
低频	LF	30 kHz~300 kHz	1 km~10 km	长波	
中频	MF	300 kHz~3 000 kHz	0.1 km~1 km	中波	建筑物高度
高频	HF	3 MHz~30 MHz	10 m~100 m	短波	

续表

波段	缩写	频率范围	波长		波长相对尺度
甚高频	VHF	30 MHz~300 MHz	1 m~10 m	米波	人的高度
特高频	UHF	300 MHz~3 000 MHz	0.1 m~1 m	分米波	书本
超高频	SHF	3 GHz~30 GHz	1 cm~10 cm	厘米波	
极高频	EHF	30 GHz~300 GHz	0.1 cm~1 cm	毫米波	手机
红外线	IR	300 GHz~ $10^5$ GHz	$0.76 \mu\text{m}$ ~ $0.75 \text{mm}$	红外线	
可见光	VL	$10^5$ GHz~ $10^7$ GHz	$0.39 \mu\text{m}$ ~ $0.76 \mu\text{m}$	可见光	
紫外线	UV		$0.005 \mu\text{m}$ ~ $0.39 \mu\text{m}$		
X射线		$10^9$ GHz 以上	$10^{-8} \mu\text{m}$ ~ $0.005 \mu\text{m}$		
$\gamma$ 射线			$10^{-8} \mu\text{m}$ 以下		

以上这些波段的划分并不是唯一的,还有其他各种不同的波段划分方法,它们分别由不同的学术组织和政府机构提出,甚至在相同的名称代号下有不同的范围,因此波段代号只是指大致的频率范围。其次,以上这些波段的分界也并不严格,工作于分界线两边临近频率的系统并没有质和量上的跃变,这些划分完全是人为的,仅是一种助记符号,不存在物理上的差别。

**极低频:**是在 30 Hz~300 Hz 范围内的信号,它包括交流配电信号和低频遥测信号。

**音频:**是在 300 Hz~3 000 Hz 范围内的信号,它包括通常与人类语音相关的频率。标准电话信道带宽为 300 Hz~3 000 Hz,通常称为话音频率或话音频带信道。

**甚低频:**是在 3 kHz~30 kHz 范围内的信号,它包括人类听觉范围的高端。甚低频用于某些特殊的政府或军事系统,比如核潜艇通信。

**低频:**是在 30 kHz~300 kHz 范围内的信号,主要用于船舶和航空导航。

**中频:**是在 300 kHz~3 MHz 范围内的信号,主要用于商业 AM 无线电广播(535 kHz~1 605 kHz)。

**高频:**是在 3 MHz~30 MHz 范围内的信号,常称为短波。很多双向无线电通信使用这个频率范围。例如,美国之音和自由欧洲无线广播在短波带内。业余无线电和民用波段无线电也使用短波范围内的信号。

**甚高频:**是在 30 MHz~300 MHz 范围内的信号,常用于移动通信、船舶航空通信、商业 FM 广播(88 MHz~108 MHz)及频道 2~13(54 MHz~216 MHz)的商业电视广播。

**特高频:**是在 300 MHz~3 GHz 范围内的信号,由商业电视广播频道 14~83、陆地移动通信业务、蜂窝电话、某些雷达和导航系统、微波及卫星无线电系统所使用。一般说来,1 GHz 以上的频率被认为是微波频率。

**超高频:**是在 3 GHz~30 GHz 范围内的信号,主要用于微波及卫星无线电通信系统的频率。

**极高频:**是在 30 GHz~300 GHz 范围内的信号,除了十分复杂、昂贵及特殊应用外,很少用于无线电通信。

**红外线:**是在 0.3 THz~300 THz 范围内的信号。红外线的应用通常与热有关。红外信号常用于热寻制导系统、电子摄影及天文学。

可见光:是在  $0.3 \text{ PHz} \sim 3 \text{ PHz}$  范围内的信号,落在人类可见范围。光波通信常与光纤一起使用,近年来光纤已经成为电子通信系统的一种主要传输介质。

紫外线、X 射线、 $\gamma$  射线及宇宙射线,目前还没有用于通信系统。

不同的波段由于传播特性和传输信息效率的不同而有不同的应用。调幅广播频段为  $535 \text{ kHz} \sim 1\,605 \text{ kHz}$ ,短波无线电频段为  $3 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ ,调频电台频段为  $88 \text{ MHz} \sim 108 \text{ MHz}$ ,甚高频电视 2~4 频道频段为  $54 \text{ MHz} \sim 72 \text{ MHz}$ ,甚高频电视 5~6 频道频段为  $76 \text{ MHz} \sim 88 \text{ MHz}$ ,超高频电视 7~13 频道频段为  $174 \text{ MHz} \sim 216 \text{ MHz}$ ,超高频电视 14~83 频道频段为  $470 \text{ MHz} \sim 890 \text{ MHz}$ ,美国蜂窝电话频段为  $824 \text{ MHz} \sim 849 \text{ MHz}$ 、 $869 \text{ MHz} \sim 894 \text{ MHz}$ ,欧洲 GSM 蜂窝电话频段为  $880 \text{ MHz} \sim 915 \text{ MHz}$ 、 $925 \text{ MHz} \sim 960 \text{ MHz}$ ,全球定位系统频段为  $1\,575.42 \text{ MHz} \sim 1\,227.60 \text{ MHz}$ ,微波炉频段为  $2.45 \text{ GHz}$ ,美国直播系统频段为  $11.7 \text{ GHz} \sim 12.5 \text{ GHz}$ ,美国 ISM 波段频段为  $902 \text{ MHz} \sim 928 \text{ MHz}$ 、 $2.400 \text{ GHz} \sim 2.484 \text{ GHz}$ 、 $5.725 \text{ GHz} \sim 5.850 \text{ GHz}$ ,卫星通信频段为  $4 \text{ GHz} \sim 6 \text{ GHz}$ 、 $10.7 \text{ GHz} \sim 12.75 \text{ GHz}$ 、 $13.75 \text{ GHz} \sim 14.5 \text{ GHz}$ ,美国超宽带无线电频段为  $3.1 \text{ MHz} \sim 10.6 \text{ MHz}$ 。

射频是一个比较模糊的概念,还没有一个大家公认的频率范围定义。从广义上看,射频是指通过天线能够向外辐射电磁波的所有频率。但是,由表 1-1 可见,在中频及以下频段,电磁波波长在几百米的数量级,根据天线有关原理,通常的电路板(10 cm 左右)在此频段向外辐射的能量非常微弱,此种电路的分析方法,可以采用低频电子线路的设计方法。因而,通常将频率在  $30 \text{ MHz} \sim 4 \text{ GHz}$  的频率划为射频频率。有些厂家把射频的上限确定在  $9 \text{ GHz}$ 。

## 1.4 射频电路的特点

射频电路由于工作频率高,具有与低频电路不同的一些特点,如分布参数、趋肤效应、向外辐射等。

分布参数是指元件的特性延伸到一定的空间范围内,不局限于元件自身。分布参数元件的电磁场分布在附近空中,其特性要受周围环境的影响。由于电磁场呈分布状态,因而分布参数广泛存在于射频电路中。

分布电容主要是指元件自身封装、元件之间、元件到接地平面和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。分布电感与元件通常为串联关系。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,由于射频电路频率较高,必须考虑分布参数的影响。

趋肤效应是指电流集中在导体表层区域中,导致有效导电面积变小,使导体交流电阻增加。在射频电路中,趋肤效应更加显著。

由于射频电路工作频率很高,信号很容易向外辐射,这种辐射既可以在电路内部发生,也可以在电路外部发生。因而,元件间的耦合、元件与电路的耦合、电路与环境的耦合都是射频电路必须考虑的问题。

## 1.5 无源元件的射频特性

### 1.5.1 金属导体

从低频电子电路分析中可以知道,电阻是与频率无关的常数,通常导线电阻很小,可以将



其忽略,因而设计时,它从来没有被作为单独的元件来考虑。但当工作频率进入射频微波波段时,其情况就大不相同,电阻与金属引线不仅仅具有自身的电阻和电感,而且它们还是频率的函数,对电路性能的影响已经不能忽略。

设圆柱状直铜导线的半径为  $a$ , 长度为  $l$ , 材料电导率为  $\sigma$ , 则其直流电阻为

$$R_{dc} = \frac{l}{\pi a^2 \sigma} \quad (1-1)$$

对于直流信号来说,可以认为导线的全部横截面都可以用来传输电流  $I$ , 或者说电流充满在整个导线横截面上,其电流密度为

$$J_{z0} = \frac{I}{\pi a^2} \quad (1-2)$$

但在交流状态下,由于交流电流会产生磁场,根据法拉第电磁感应定律,此磁场必会产生电场,与此电场联系的感生电流密度的方向将会与原始电流相反。这种效应在导线的中心部位即  $r=0$  处最强,造成了在  $r=0$  附近的电阻显著增加,因而电流将趋向于在导线周界附近流动,这种现象将随着频率的升高而加剧,这就是通常所说的“趋肤效应”。进一步研究表明,随着频率升高,电流密度沿轴线的分布为

$$J_z = \frac{\rho I J_0(pr)}{2\pi a J_1(pa)} \quad (1-3)$$

式中,  $\rho^2 = -j\omega\mu\sigma$ ;

$J_0(pr)$ 、 $J_1(pa)$ ——零阶和一阶贝塞尔函数,如图 1-4 所示。

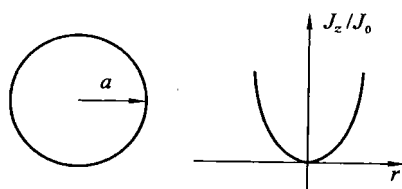


图 1-4 交流电流密度的横截面分布(归一化)

在射频微波频段( $f > 500$  MHz),此导线相对于直流状态的电阻和电感可分别表示为

$$R \approx \frac{a}{2\delta} R_{dc} \quad (1-4)$$

$$L \approx \frac{a}{2\omega\delta} R_{dc} \quad (1-5)$$

式中,  $\delta$ ——趋肤深度,  $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-\frac{1}{2}}$ 。 (1-6)

从式(1-6)可以看出,趋肤深度与频率的平方成反比,因而随着频率的升高,趋肤深度是按平方律减小的。图 1-5 表示半径  $a=1$  mm 的铜线在不同频率下  $J_z/J_0$  相对于半径  $r$  的曲线,由这些曲线可以看出,当频率达到 1 MHz 左右时,就已经出现了严重的趋肤效应,当频率达到 1 GHz 时电流几乎仅在导线的表面流动,径向穿透深度可以忽略。式(1-4)、式(1-5)是假定趋肤深度远小于半径得出的,即  $\delta \ll a$  时成立。

**【例 1】** 已知铜的电导率为  $\sigma = 6.45 \times 10^7$  S/m,磁导率为  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m,求在  $f=1$  kHz, 10 kHz, 1 MHz, 10 MHz, 100 MHz, 1 GHz 时的趋肤深度。

**解** 由式(1-6)可以算出趋肤深度分别为

$$f=1 \text{ kHz 时, } \delta=2 \text{ mm};$$

$$f=10 \text{ kHz 时, } \delta=0.62 \text{ mm};$$

$$f=1 \text{ MHz 时, } \delta=62.2 \text{ } \mu\text{m};$$

$$f=10 \text{ MHz 时, } \delta=19.7 \text{ } \mu\text{m};$$

$$f=100 \text{ MHz 时, } \delta=6.2 \text{ } \mu\text{m};$$

$$f=1 \text{ GHz 时, } \delta=1.97 \text{ } \mu\text{m}.$$

由于半径为  $a$  的圆柱形导体在工作频率升高时,其趋肤深度远小于半径,相当于其有效的