

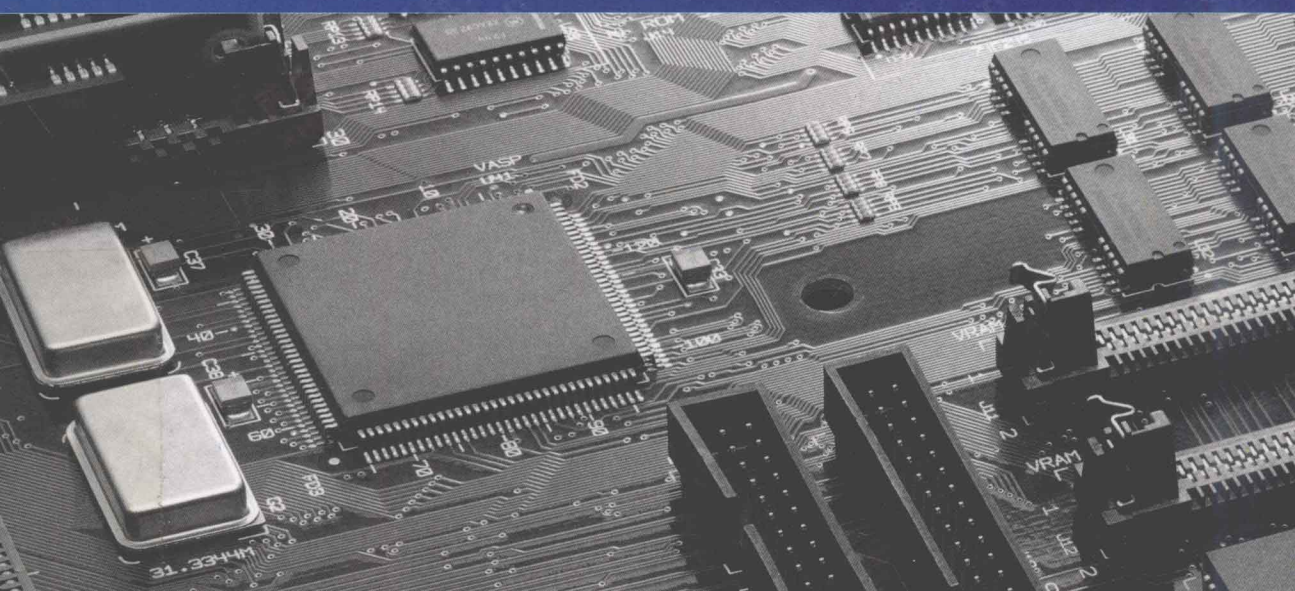
高等学校电子信息类专业
“十二五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

高频电路原理 及应用

主 编 朱代先
副主编 李白萍 吴文峰
 刘晓佩 刘凌志

 西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

高频电路原理及应用

主 编 朱代先
副主编 李白萍 吴文峰
 刘晓佩 刘凌志

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是为满足高等学校应用型人才培养的需要而编写的。全书共8章,包括绪论,选频网络,高频小信号放大电路,高频功率放大器,振荡器,振幅调制、解调及混频,角度调制与解调,自动控制电路。

本书本着突出重点、便于教学、注重实用的原则,着重于物理概念的叙述,避免繁琐的公式推导,加强高频电路基本理论和基本电路的分析,注重器件与电路的紧密结合,增强集成电路应用等内容的比例,使得集成电路的设计性和综合性更强。本书将理论讲授、课堂讨论、自学、作业等教学环节有机结合,以充分调动学生学习的积极性和创造性。本书每章末均编有思考题与习题,以便于学生巩固所学内容。

本书可作为通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的本科生及专科生教材,也可作为相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电路原理及应用/朱代先主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2011.9

高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2631-4

I. ①高… II. ①朱… III. ①高频—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 146889 号

策 划 云立实

责任编辑 任倍萱 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 24

字 数 567千字

印 数 1~3000册

定 价 40.00元

ISBN 978-7-5606-2631-4/TN·0615

XDUP 2923001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

高频电路是通信、电子、信息等专业一门重要的专业基础课和技术基础课，主要研究讨论各种无线电设备和通信系统中基本单元电路的结构、原理和分析方法。

随着教学改革的深入和科学技术的发展，高频电路的地位和作用也在不断地发生着变化。近年来，由于高校开设课程的增加，高频电路课程的学时有很大程度的减少，这就需要不断调整和更新这门课程的内容，以满足实际教学的需要。为此，我们在编写本书时，力求控制篇幅、精选内容、突出重点，以便于教学。

本书内容主要包括：绪论，选频网络，高频小信号放大电路，高频功率放大器，振荡器，振幅调制、解调及混频，角度调制与解调，自动控制电路。在编写本书时，采用了分立元件讲原理，而集成芯片讲应用的形式；以基本电路原理和基本方法为重点，适当结合实际应用，介绍采用集成电路搭建电子通信系统中各种电路的实例。这样既加深了学生对基本电路的理解，又通过理论联系实际培养了其在电路设计中的实际动手能力，使学习效果事半功倍。

本书力求做到简明扼要、深入浅出、通俗易懂，以达到既便于教师授课，又便于学生自学的目的。本书既适合作为电子信息类本专科生的教材，也可供相关工程技术人员作为电路设计的参考书。本书建议学时数为 50~60，在实际教学中，可以根据不同专业的要求，对内容酌情进行删减。

本书由朱代先主编，李白萍、吴文峰、刘晓佩、刘凌志担任副主编。全书共 8 章。朱代先编写了本书的第 1 章和第 8 章的 8.3~8.7 节；李白萍编写了第 2 章的 2.4、2.5 节，第 4 章的 4.6~4.8 节，第 7 章的 7.4~7.7 节和第 8 章的 8.1、8.2 节；吴文峰编写了第 6 章和第 7 章的 7.1~7.3 节；刘晓佩编写了第 4 章的 4.1~4.5 节和第 5 章；刘凌志编写了第 2 章的 2.1~2.3 节和第 3 章。

在本书编写过程中，吴延海老师给以很多建设性的意见和指导，在此表示衷心的感谢。同时，也要感谢朱仲明、王帆两位同学，他们在本书的绘图、文字录入等方面做了大量的工作。

由于编者水平有限，教材中难免存在不妥之处，恳请读者不吝赐教。

编著者

2011 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线电通信发展简史	1
1.2 无线电系统概述	3
1.2.1 通信系统的组成	3
1.2.2 无线电波的传播	4
1.2.3 无线电通信系统的工作原理	6
1.3 信号、调制和频谱	7
1.4 本课程的特点	11
思考题与习题	12
第 2 章 选频网络	13
2.1 概述	13
2.2 单谐振回路	16
2.2.1 并联谐振回路	16
2.2.2 串联谐振回路	22
2.3 串并联阻抗等效互换和回路阻抗变换	23
2.3.1 串并联阻抗等效互换	23
2.3.2 回路的阻抗变换	25
2.3.3 LC 选频匹配网路	30
2.4 耦合谐振回路	32
2.5 其他形式的滤波器	37
2.5.1 石英晶体滤波器	38
2.5.2 声表面滤波器	40
2.5.3 陶瓷滤波器	42
本章小结	43
思考题与习题	44
第 3 章 高频小信号放大电路	47
3.1 概述	47
3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	49
3.2.1 晶体管 y 参数等效电路	49
3.2.2 混合 Π 型等效电路	51
3.2.3 混合 Π 型等效电路参数与 y 参数转换关系	52
3.2.4 晶体管的高频参数	53
3.3 单级单调谐回路谐振放大器	54
3.3.1 单调谐放大器的工作原理和等效电路	55

3.3.2 单调谐放大器的性能指标分析	56
3.4 多级单调谐回路谐振放大器	61
3.5 双调谐回路谐振放大器	62
3.6 谐振放大器的稳定性	65
3.6.1 影响谐振放大器稳定性的因素	66
3.6.2 改善谐振放大器稳定性的措施	67
3.7 集成谐振放大电路和集中选频放大器	69
3.8 放大器的噪声	71
3.8.1 电子噪声的来源及特性	71
3.8.2 噪声的分类、表示与计算方法	72
3.8.3 减小噪声对通信系统影响的方法	79
本章小结	80
思考题与习题	80

第4章 高频功率放大器	83
4.1 非线性电路的基本概念	83
4.1.1 非线性元件的分类和作用	83
4.1.2 非线性元件的特性	84
4.1.3 非线性电路的分析方法	87
4.2 高频功率放大器概述	90
4.3 谐振功率放大器的工作原理	91
4.3.1 电路组成	91
4.3.2 工作原理	92
4.4 谐振功率放大器工作状态分析	94
4.4.1 谐振功率放大器的折线分析法	94
4.4.2 谐振功率放大器的动态特性	99
4.4.3 丙类功率放大器的负载特性	101
4.4.4 各级电压对工作状态的影响	102
4.4.5 工作状态的分析与计算	104
4.5 高频功放的实用电路	105
4.5.1 直流馈电电路	106
4.5.2 输入和输出匹配网络	108
4.6 其他类型高频功率放大器	112
4.6.1 丁类功率放大器	113
4.6.2 戊类功率放大器	116
4.6.3 宽带高频功率放大器	116
4.7 功率合成器	120
4.7.1 功率合成(分配)原理	120
4.7.2 功率合成(分配)网络	121
4.7.3 功率合成电路应用电路	122
4.8 高频功率放大器应用实例	123
本章小结	126
思考题与习题	126

第 5 章 振荡器	129
5.1 概述	129
5.2 反馈振荡器的原理	129
5.2.1 反馈振荡器的原理分析	129
5.2.2 平衡条件	131
5.2.3 起振条件	131
5.2.4 稳定条件	132
5.3 LC 振荡器	133
5.3.1 振荡器的组成原则	134
5.3.2 电容反馈振荡器	134
5.3.3 电感反馈振荡器	136
5.3.4 互感耦合振荡器	138
5.3.5 两种改进的电容三端式振荡	140
5.3.6 其他形式的 LC 振荡器	143
5.4 振荡器频率稳定度	147
5.5 石英晶体振荡器	149
5.5.1 石英晶体振荡器的特性	150
5.5.2 石英晶体振荡器电路	152
5.5.3 高稳定晶体振荡器	155
5.6 实用振荡器电路分析	157
本章小结	159
思考题与习题	160
第 6 章 振幅调制、解调及混频	164
6.1 概述	165
6.1.1 调制、解调原理	165
6.1.2 调制的分类	166
6.2 振幅调制	167
6.2.1 振幅调制信号分析	167
6.2.2 振幅调制电路	175
6.3 振幅调制信号的解调	201
6.3.1 振幅解调的方法	201
6.3.2 包络检波器	203
6.3.3 同步检波器	211
6.4 混频电路	214
6.4.1 混频概述	214
6.4.2 混频电路	218
6.4.3 混频产生的干扰	224
6.5 调幅收音机实例	228
本章小结	230
思考题与习题	231
第 7 章 角度调制与解调	237

7.1 概述	237
7.2 调角波的性质	238
7.2.1 调频波与调相波的表示式	238
7.2.2 调角波的频谱与频带宽度	243
7.3 调频信号的产生	246
7.3.1 调频信号产生的方法	247
7.3.2 直接调频电路	249
7.3.3 间接调频电路	254
7.4 鉴频电路	259
7.4.1 鉴频概述	259
7.4.2 斜率鉴频器	262
7.4.3 相位鉴频器	264
7.4.4 比例鉴频器	269
7.5 其他形式的鉴频器	271
7.5.1 符合门鉴频器	271
7.5.2 脉冲计数式鉴频器	273
7.6 调频通信系统的组成	274
7.6.1 调频发射机的组成	274
7.6.2 调频接收机的组成	275
7.7 实用集成电路举例	276
本章小结	280
思考题与习题	281

第8章 自动控制电路	285
8.1 概述	285
8.2 反馈控制的基本原理	286
8.2.1 反馈控制系统的组成、工作过程和特点	286
8.2.2 反馈控制系统的基本分析	288
8.3 自动增益控制(AGC)电路	294
8.3.1 自动增益控制的基本原理	294
8.3.2 自动增益控制电路	297
8.3.3 AGC 性能指标及 AGC 系统的增益控制特性	306
8.4 自动频率控制(AFC)电路	309
8.4.1 自动频率控制的基本原理	310
8.4.2 自动频率控制电路	313
8.4.3 主要性能指标	315
8.5 锁相环路(PLL)基本原理	315
8.5.1 锁相环路的工作原理	316
8.5.2 锁相环的基本方程与模型	317
8.5.3 锁相环路的线性分析	324
8.5.4 锁相环路的应用	328
8.5.5 集成锁相环	335
8.6 频率合成器	341

8.6.1 频率合成器的主要技术指标	341
8.6.2 频率合成器的类型	344
8.6.3 间接频率合成法(锁相环路法)	349
8.6.4 直接数字频率合成器	355
8.6.5 集成频率合成器	361
8.7 移动通信设备实用电路举例——900 MHz 移动电话	368
本章小结	369
思考题与习题	370
参考文献	373

第1章 绪 论

1.1 无线电通信发展简史

无线电技术已广泛应用于无线电通信、广播、电视、雷达、导航等领域,尽管它们在传递信息形式、工作方式和设备体制等方面有所差别,但它们都是利用高频(射频)无线电波来传递信息的,因此设备中发射和接收、检测高频信号的基本功能电路大都相同。本书主要结合无线电通信这一方式讨论设备和系统中高频电路的组成、工作原理及工程设计计算。

信息传输是人类社会生活的重要内容。现代人类社会是建立在信息传输和信息交换的基础上的。广义地说,凡是在发信者和收信者之间,以任何形式进行的信息传输和交换,都可称之为通信。通信是推动人类社会进步与发展的巨大动力。通信的目的是克服距离上的障碍,迅速而准确地传递信息。从古代的烽火到近代的旗语,都是人们快速远距离通信的手段。19世纪,在电磁学理论与实践已有坚实的基础后,人们又开始寻求用电磁能量传递信息的方法。1837年,莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,创造了莫尔斯电码,开创了通信的新纪元。1876年,贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话,直接将语言信号变为电信号沿导线传送。电报、电话的发明,为迅速准确地传递信息提供了新手段,是通信技术的重大突破。电报、电话都是沿导线传送信号的。能否不通过导线而在空间传送信号呢?答复是肯定的,这就是无线电通信。

1864年,英国物理学家麦克斯韦(J. 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,得出了电磁场方程,也就是著名的麦克斯韦方程。它阐述了电磁在空间的分布特性,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)以卓越的实验技巧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。麦克斯韦的理论从而得到了证实。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。其中著名的有英国的罗吉(O. J. Lodge)、法国的勃兰利(Branly)、俄国的波波夫(A. C. Попов)、意大利的马可尼(Guglielmo Marconi)等人。

在以上这些人中,以马可尼的贡献最大。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：发送设备为火花发射机、电弧发生器或高频发电机等，接收设备则为粉末(金属屑)检波器。直到1904年，弗莱明(Fleming)发明了电子二极管，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、检波和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。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，肖克利(W. Shockley)等人发明了晶体三极管，它在节约电能、缩小体积与重量、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。晶体管在许多方面取代了电子管的传统地位，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，几十年来已取得极其巨大的成就。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。

1958年美国研制成功第一块集成电路，1967年研制成功大规模集成(LSI)电路，1978年研制成功超大规模集成(VLSI)电路，从此电子技术进入了微电子技术时代。无线电技术从诞生到现在，对人类的生活和生产活动产生了非常深刻的影响。20世纪初首先解决了无线电报通信问题；接着又解决了用无线电波传送语言和音乐的问题，从而开展了无线电话通信和无线电广播；以后传输图像的问题也解决了，出现了无线电传真和电视。20世纪30年代中期到第二次世界大战期间，为了防空的需要，无线电定位技术迅速发展和雷达的出现，带动了其他科学的兴起，如无线电天文学、无线电气象学等。20世纪40年代电子计算机诞生了，它能对复杂的数学问题进行快速计算，代替了部分脑力劳动，因而得到飞速发展。20世纪50年代以来，宇航技术的发展又促进了无线电技术向更高的阶段发展。在自动控制方面，由于应用了信息论和控制论，不仅能使生产高度自动化，而且具有各种功能的机器人也已制造出来了。

无线电技术给人们带来的影响是无可争议的。如今每一天大约有15万人成为新的无线用户，全球范围内的无线用户数量目前已经超过2亿。这些人包括大学教授、仓库管理员、护士、商店负责人、办公室经理和卡车司机。他们使用无线电技术的方式和他们自身的工作一样都在不断地更新。

无线电技术的发展是从利用电磁波传输信息的无线电通信扩展到计算机科学、宇航技术、自动控制以及其他各学科领域的。可以说，上至天文，下至地理，大到宇宙空间，小到基本粒子等科学的研究，从工农业生产到社会、家庭生活，都离不开无线电技术。无线电技术的发展过程是不断延伸和扩展人的感觉器官和大脑部分功能的过程。无线电话、电视、雷达延伸和扩展了眼、耳的功能，电子计算机延伸和扩展了大脑的部分功能。人类的感覺器官和大脑联合工作，能感知、传递和处理信息，现在已发展起来的各种控制系统正部分地模拟、延伸和扩展人类对于信息的感知、传递和处理的综合运用功能。无线电技术的发展虽然头绪繁多、应用广泛，但其主要任务是解决信息传输和信息处理问题。高频电子线路所涉及的单元电路都是从传输与处理信息这两个基本点出发来进行研究的，因此，我们仍以普遍应用的、典型的无线电通信系统为例来说明它的工作原理和工作过程。

1.2 无线电系统概述

1.2.1 通信系统的组成

通信既是人类社会的重要组成部分,又是社会发展和进步的重要因素。实现消息传递所需设备的总和,称为通信系统。19世纪末迅速发展起来的以电信号为消息载体的通信方式,称为现代通信系统。现代通信系统由输入变换器、发送设备、信道、接收设备及输出变换器五部分组成。在信号的传输过程中,各个环节都不可避免地会受到各种噪声的干扰。为简化分析过程,可将各环节的噪声干扰等效到信道部分,最后形成现代通信系统的组成框图,如图1.1所示。其中,各个组成部分的功能介绍如下。

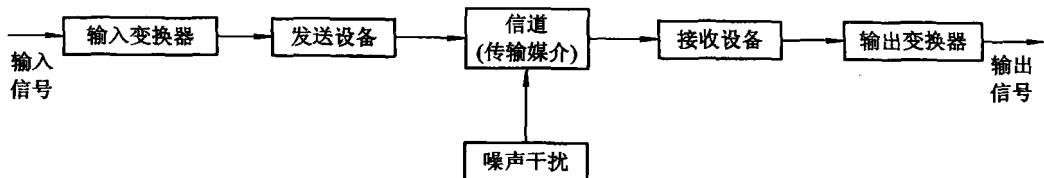


图 1.1 通信系统基本组成框图

1. 输入变换器

输入变换器的主要任务是将发信者提供的非电量消息(如声音、景物等)变换为电信号,它能反映待发送的全部消息,通常具有“低通型”频谱结构,故称为基带信号。当输入消息本身就是电信号时(如计算机输出的二进制信号),可省略输入变换器而直接进入发送设备。

2. 发送设备

发送设备主要有两大任务:一是调制,二是放大。

所谓调制,就是将基带信号变换成适合信道传输的频带信号。调制就是利用基带信号去控制载波信号的某一参数,让该参数随基带信号的大小而线性变化的处理过程。通常又将基带信号称为调制信号,将高频振荡信号称为载波信号。将经过调制后的高频振荡信号称为已调信号或已调波。

所谓放大,是指对调制信号和已调信号的电压和功率进行放大、滤波等处理,以保证送入信道的已调信号功率足够大。

3. 信道

信道是连接收、发两端的信号通道,又称传输媒介。通信系统中的信道可分为两大类:有线信道(如架空明线、电缆、波导、光缆等)和无线信道(如海水、地球表面、自由空间等)。不同信道有不同的传输特性,相同媒介对不同频率的信号传输特性也是不同的。下一节我们讨论信号在自由空间里的传播特性。

4. 接收设备

接收设备的任务是将信道传送过来的已调信号进行处理,以恢复出与发送端相一致的

基带信号, 这种从已调波中恢复基带信号的处理过程称为解调。显然, 解调是调制的反过程。由于信道的衰减特性, 经远距离传输到达接收端的信号电平通常是很微弱的(微伏数量级), 需要放大后才能解调。同时, 在信道中还会存在许多干扰信号, 因而接收设备还必须具有从众多干扰信号中选择有用信号、抑制干扰的能力。

5. 输出变换器

输出变换器的作用是将接收设备输出的基带信号变换成原来形式的消息, 如声音、景物等, 供受信者使用。

6. 噪声干扰

噪声虽然不是通信的组成部分, 但其在通信系统中时刻都存在着。在图 1.1 中只标出了信道的噪声, 实际上通信系统的各个部分都会受到噪声的干扰。所谓噪声, 就是在电子设备中与有用信号同时存在的一种随机变化的电流或电压, 即使没有通信信号, 它也存在。例如, 收音机中常听到的“沙沙”声, 电视图像中的雪花点都是典型的噪声。

根据分类方式的不同, 通信系统的种类很多。按传输消息的物理特征可将其分为电话、电报、传真通信系统、广播电视通信系统和数据通信系统等; 按传输的基带信号的物理特征可将其分为模拟和数字通信系统; 而按传输媒介的物理特征可将其分为有线通信系统和无线通信系统。

1.2.2 无线电波的传播

众所周知, 任何载有消息的无线电波都占有一定的信号带宽。载波频率越高, 可利用的总带宽(或波段)就越宽, 因此利用高频可以在同一波段中实现许多不同对象间的消息传输。此外, 某些频带很宽的消息(如电视图像、多路话音、雷达信号等)只能在很高的频率上才能传输。例如, 电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz, 它只适于在几十兆赫兹以上的频率上传输。

为了讨论无线电波的传播, 我们必须考虑信号的频率特性。任何信号都具有一定的频率和波长。我们这里所讲的频率特性就是无线电信号的频率或波长。电磁波辐射的波长范围如图 1.2 所示。

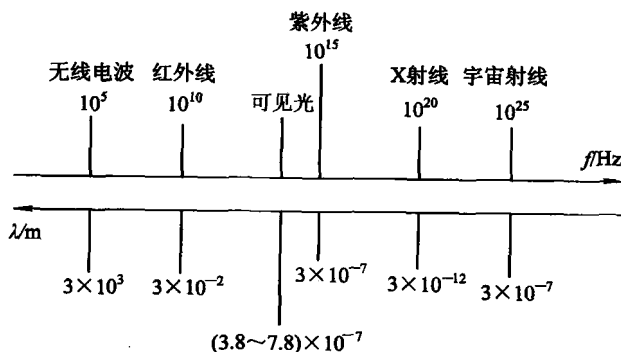


图 1.2 电磁波谱分布

在实际生活中, 为了讨论问题的方便, 将不同频率的电磁波人为地划分成若干频段或波段, 其相应名称和主要应用举例列于表 1.1 中。应该指出, 各种波段的划分是相对的, 因为各波段之间并没有显著的分界线, 但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。无线通

信系统使用的频率范围很宽阔,从几十千赫兹到几百兆赫兹。习惯上按电磁波的频率范围划分为若干个区段,称为频段或波段。无线电波在空间的传播速度 $c=3\times 10^8$ m/s,则无线电信号的频率与其波长的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

式中,频率 f 的单位为 Hz,波长 λ 的单位为 m。

表 1.1 波段的划分

波段名称		波段范围	频率范围	频段名称
超长波		10 000~100 000 m	3~30 kHz	甚低频(VLF)
长波		1000~10 000 m	30~300 kHz	低频(LF)
中波		100~1000 m	0.3~3 MHz	中频(MF)
短波		10~100 m	3~30 MHz	高频(HF)
超短波(米波)		1~10 m	30~300 MHz	甚高频(VHF)
微波	分米波	10 cm~1 m	0.3~3 GHz	特高频(VLF)
	厘米波	1~10 cm	3~30 GHz	超高频(SHF)
	毫米波	1 mm~10 cm	30~300 GHz	极高频(EHF)
	亚毫米波	0.1~1 mm	300~3000 GHz	超极高频

应当指出,不同频段的信号具有不同的分析与实现方法,对于米波以上的信号通常用集总参数的方法来分析与实现,而对于米波以下的信号一般应用分布参数的方法来分析与实现。另外,从表中可以看出,频段划分有一个“高频”段,其频率范围在 3~30 MHz,这是狭义的解释,它指的是短波波段。本课程涉及的波段可从中波到微波波段。

在自由空间媒介里,电磁能量是以电磁波的形式传播的。然而,不同频率的电磁波却有不同的传播方式。1.5 MHz 以下的电磁波主要沿地表传播,称为地波,如图 1.3 所示。由于大地不是理想的导体,当电磁波沿其传播时,有一部分能量被损耗掉。频率越高,趋表效应越严重,损耗越大,因此频率较高的电磁波不宜沿地表传播。1.5~30 MHz 的电磁波主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波,如图 1.4 所示。电离层是由于太阳和星际空间的辐射引起大气上层电离形成的。电磁波到达电离层后,一部分能量被吸收,一部分能量被反射和折射到地面。频率越高,被吸收的能量越小,电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后,电磁波就会穿透电离层而不再返回地面。因此频率更高的电磁波不宜用天波传播。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波,如图 1.5 所示。由于地球表面的弯曲,空间波传播距离受限于视距范围。架高收发天线可以增大其传输距离。在实际无线通信中,还有一种对流层散射传播方式,如图 1.6 所示。

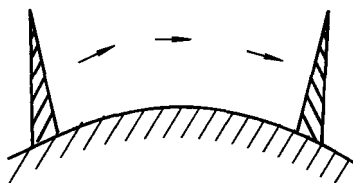


图 1.3 电磁波沿地表绕射

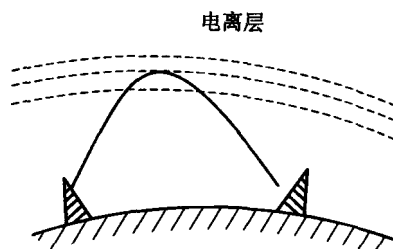


图 1.4 电磁波的折射与反射

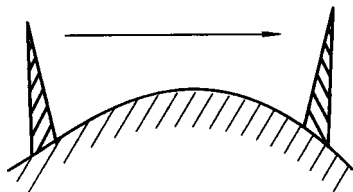


图 1.5 电磁波的直射

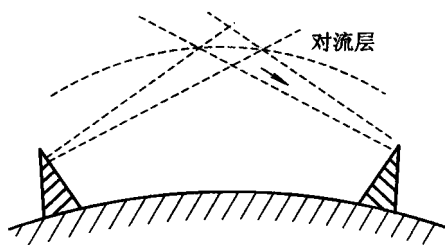


图 1.6 对流层散射传播

1.2.3 无线电通信系统的工作原理

在无线通信系统中，传输媒介是自由空间。根据电磁波的波长或频率范围，电磁波在自由空间的传播方式不同，且信号传输的有效性和可靠性也不同，由此使得通信系统的构成及其工作机理也有很大的不同。

由天线理论可知，要将无线电信号有效地发射出去，天线的尺寸必须和电信号的波长为同一数量级。由原始非电量信息经转换而成的原始电信号一般是低频信号，波长很长。例如，音频信号一般仅在 15 kHz 以内，对应波长为 20 km 以上，要制造出如此巨大的天线是不现实的。另外，即使这样巨大的天线能够制造出来，由于各个发射台发射的均为同一频率的信号，这样也会造成它们之间的相互干扰。为了有效地进行传输，必须采用几百千赫兹以上的高频振荡信号作为运载工具，将携带信息的低频电信号“装载”到高频振荡信号上（这一过程称为调制），然后经天线发送出去。到了接收端后，再把低频电信号从高频振荡信号上“卸取”下来（这一过程称为解调）。其中，未经调制的高频振荡信号称为载波信号，低频电信号称为调制信号，经过调制并携带有低频信息的高频振荡信号称为已调波信号。采用调制方式以后，由于传送的是高频已调波信号，故所需天线尺寸可大大缩小。另外，不同的发射台可以采用不同频率的高频振荡信号作为载波，这样在频谱上就可以加以区分。

发射机和接收机是无线电通信系统的核心部件，它们是为了使基带信号在信道中有效和可靠地传输而设置的。图 1.7 和图 1.8 分别给出了无线电通信系统中发送设备与接收设备的方框图。

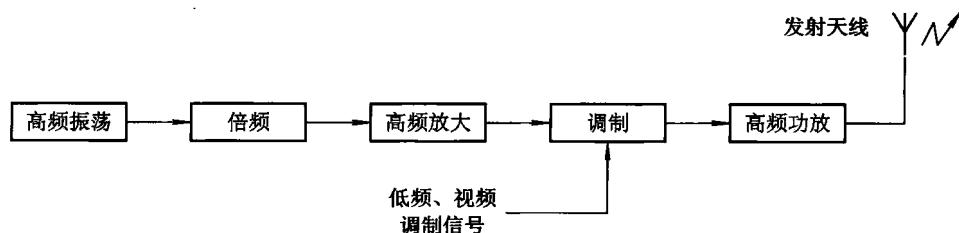


图 1.7 无线电通信系统发送设备方框图

由图 1.7 可见，发送设备所涉及的基本功能电路包括：高频振荡器、倍频器、高频放大器、调制器、高频功放和发射天线等。它的工作过程为：振荡器产生一定频率的最初高频振荡信（一般是正弦信号），通常其功率很小。倍频器主要是以提高发射机的频率以及扩

展发射机的波段范围,使其频率倍增到载波频率(f_c)上,高频放大器的主要功能是将小的等幅振荡信号加以放大,达到一定的功率,以便于后续的调制。它通常由若干级放大器组成。调制器主要把基带信号加载到载波上,完成信号调制。功率放大器主要把调制信号放大到足够高的功率,送给天线进行发射。

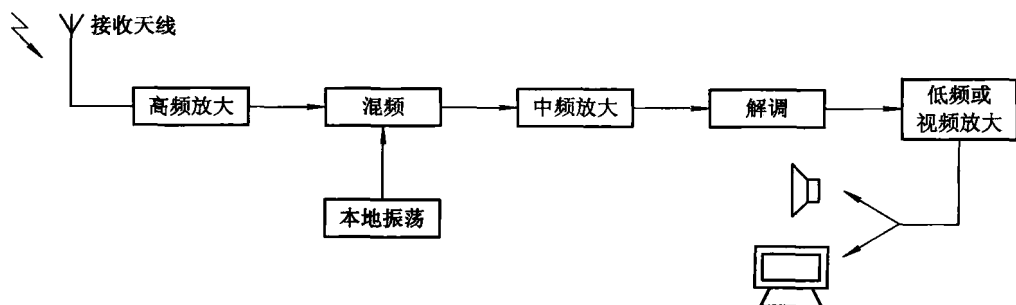


图 1.8 无线电通信系统接收设备方框图

接收设备主要由接收天线、高频小信号放大器、混频器、本地振荡器、中频放大器、解调器和低频信号(基带)放大器等组成。它的工作过程为:接收天线接收到微弱的高频调制信号,首先进行高频放大,然后和本地振荡器产生的高频信号进行混频,得到中频信号,再送入中频放大器进行放大,最后进行解调,恢复出原来的低频信号(基带信号)。其中,混频电路起频率变换作用,其输入是各种不同载频的高频已调波信号和本地振荡信号,输出是一种载频较低而且固定的高频已调波信号(习惯上称此信号为中频信号)。也就是说,混频电路可以把接收到的不同载频的各发射台高频已调波信号变换为同一载频(中频)的高频已调波信号,由于工作频段较低而且固定,其性能可以做得很好,从而达到满意的接收效果。这种接收方式称为超外差方式。

以上这些基本功能电路中,大部分属于高频电子线路。另外,包括自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制(锁相环)在内的反馈控制电路也是高频电子线路所要研究的重要对象,因为这是通信系统中必不可少的部分。

在高频电子线路中,大部分是非线性电路,如振荡电路、调制和解调电路、混频电路、倍频电路等。非线性电路必须采用非线性分析方法。非线性微分方程是描述非线性电路的数学模型,但在工程上常采用一些近似分析和求解的方法。

1.3 信号、调制和频谱

在高频电路中,我们要处理的无线电信号主要有三种:基带信号、高频载波信号和已调信号。基带(消息)信号就是在没有调制前的原始电信号。在高频电子线路中,也称之为调制信号。如话音、数据、电报、图像、视频信号就是常见的消息信号。话音信号与图像信号是随时间连续变化的信号,是一种模拟信号。数据和电报信号是取离散值时间的信号,是一种数字信号。图 1.9(a)、(b)分别表示模拟信号和数字信号的波形。图 1.9(b)中的 1 和 0 是二进制数字信号。

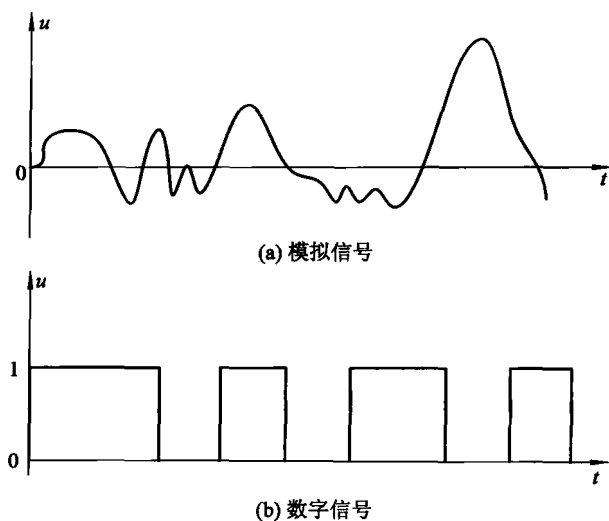


图 1.9 模拟信号和数字信号的波形

表示和分析一个信号通常有时域和频域两种方法。在时域中，我们通常用数学方式将信号表示为电压和电流的时间函数或者直接画出波形图。对于简单的信号（如正弦波信号、周期性信号），用时域表示是很方便的。对于较复杂的信号，比如话音信号、图像信号，由于其复杂性和随机性，难以用数学表达式和波形直接描述，若采用频域的分析方法则较为方便。一个确定的时间信号 $f(t)$ ，总可以分解为许多不同频率的单一正弦信号。周期性的时间信号可以用傅里叶级数分解为许多个离散的频率分量（各分量间成谐波关系）；非周期的时间信号可以用傅里叶变换分解为连续谱，信号为连续谱的积分。通过对这些分量的研究就可以了解信号的许多特性，如信号的频率分布、信号的带宽等。在研究和设计某些电子电路时，常常需要了解信号的这些特性。频域分析方法还有一个好处，就是它可以用仪器对信号（甚至是随机信号）进行测量分析。频谱分析仪就是其中最有用的一种仪器。

设周期性时间信号为 $f(t)$ ，当 $f(t)$ 是连续函数时，或只有有限个间断点（在周期内）时，它可以展开为傅里叶级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1.2)$$

或

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{jn\omega t} \quad (1.3)$$

式中， $\omega = 2\pi/T$ ， T 为周期性函数，且有，

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt & (n = 0, 1, 2, \dots) \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt & (n = 1, 2, \dots) \\ C_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} \, dt & (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \end{cases} \quad (1.4)$$

式(1.3)是周期信号的指数形式。 C_n 是复数， n 可取整数，表示展开式中还有“负”频率