



普通高等教育“十五”国家级规划教材

高频电子线路

曾兴雯 主编

曾兴雯 刘乃安 陈 键 编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

高频电子线路

曾兴雯 主编

曾兴雯 刘乃安 陈 健 编

高等教育出版社

内容简介

“高频电子线路”是通信工程、电子信息工程及其相关专业的专业基础课程。本书内容包括绪论、高频电路基础、高频谐振放大器、正弦波振荡器、频谱的线性搬移电路、振幅调制、解调与混频、角度调制与解调、反馈控制电路、高频电路新技术和典型整机线路介绍。

本书可作为通信工程、电子信息工程等专业的本科生教材，也可作为大专、电大、职大的教材和有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/曾兴雯主编. —北京: 高等教育出版社, 2004.1
ISBN 7-04-013040-8

I. 高… II. 曾… III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 099666 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	北京印刷二厂		
开 本	787×960 1/16		
印 张	26.5	版 次	2004 年 1 月第 1 版
字 数	510 000	印 次	2004 年 1 月第 1 次印刷
插 页	2	定 价	31.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

在信息时代飞速发展的今天，对信息的获取、传输与处理的方法越来越受到人们的重视，信息科学技术已成为 21 世纪国际社会经济发展和世界经济发展的新的强大推动力。信息作为一种资源，只有通过广泛地传播与交换，促进人们的交流与合作，才能创造和产生出巨大的经济效益。信息的传播与交换是依靠各通信系统实现的。

“高频电子线路”是通信工程、电子信息工程等电子信息类专业重要的专业基础课程，有很强的理论性、工程性和实践性。随着科学技术的迅速发展，“高频电子线路”从内容和形式上都发生了很大变化，各相关专业对该门课程的要求也发生了较大变化，编写出符合专业需要、适应科学技术发展的新教材，是我们编写本教材的基本原则。根据我们多年的教学和科研实践，对高频电子线路的内容和重点有了较深刻的认识，在参考了国内外有关教材的基础上，确定了本教材“控制篇幅，精选内容，突出重点，便于教学”的编写指导思想。

随着科学技术的发展，专业的教学计划需要调整，课程的内容和形式也必须随之而调整，要不断的引进新的思想、新的技术和新的器件，更新内容。作为一门专业基础课教材，本书在强调课程的基本概念、基本原理、基本电路和基本分析方法的基础上，与科学技术的发展紧密结合，将本课程所涉及的高新技术、新器件（部件）充实其中，即强调了基础性、实践性，又不失其先进性。

全书共分十章。

第一章为绪论，主要介绍通信系统的组成、通信系统的一些基本概念、本课程的特点和难点等。

第二章为高频电子线路基础，主要介绍高频电路中的元器件和基本电路，重点在谐振回路。本章另一个内容是电子噪声，介绍了电子噪声的来源与特性、噪声系数和噪声温度的概念、计算方法和用途。

第三章为高频谐振放大器，主要内容有高频小信号放大器的工作原理、性能指标、稳定性，高频集成放大器等；高频功率谐振放大器的工作原理、分析方法、外部特性、实际线路等。

第四章介绍正弦波振荡器的原理、LC 振荡器的原理和实际线路、晶体振

荡器、振荡器的频率稳定性分析等。

第五章主要介绍频谱的线性搬移电路的原理和线路组成，包括二极管电路、差分对电路、三极管和场效应管电路。

第六章介绍振幅调制、解调和混频的原理和实现方法。振幅调制、解调和混频均属于频谱的线性搬移，在实现方法上是相同的。第五章和第六章属于同一单元，第五章为第六章具体频谱搬移电路的实现打基础。

第七章介绍角度调制，重点是频率调制和解调的原理、实现方法。频率调制与解调是频谱的非线性搬移，其实现方法有别于频谱的线性搬移。相位调制的原理与电路与频率调制相似。

第八章介绍反馈控制电路，包括自动增益控制电路、自动频率控制电路、锁相环和频率合成器电路的原理和实现电路。

第九章介绍高频电路的新技术，主要有高频集成电路、高频电路 EDA 及软件无线电技术等。

第十章介绍典型整机电路。

本书由曾兴雯主编，参加编写的还有刘乃安、陈健。刘乃安编写了第一、二、七、九章，陈健编写了第三、四、十章，曾兴雯编写了第五、六、八章。

本书是在我校其他老师的工作基础上和支持下完成的。首先我们要感谢我们的恩师杜武林教授，可以这样说，没有杜教授的支持和为我们打下的基础，就不可能有本书的出版，我们以此书的出版献给我们敬爱的杜武林教授。同时要感谢张厥盛教授、魏矜教授和李纪澄教授，对他们为本书的贡献表示敬意。

西北工业大学的王永生教授在百忙中审阅了本书，提出了很好的意见和建议，对此我们表示深深的谢意。

由于作者水平有限，本书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月 于西安电子科技大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

策划编辑	张培东
责任编辑	李 刚
封面设计	于文燕
责任绘图	朱 静
版式设计	王艳红
责任校对	康晓燕
责任印制	宋克学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 无线通信系统概述	1
一、无线通信系统的组成	1
二、无线通信系统的类型	4
第二节 无线电信号与调制	4
一、时间特性	6
二、频谱特性	6
三、传播特性	7
四、调制特性	9
第三节 本课程的特点	9
参考文献	11
思考题与练习题	11
第二章 高频电路基础	12
第一节 高频电路中的元器件	12
一、高频电路中的元件	12
二、高频电路中的有源器件	14
第二节 高频电路中的基本电路	16
一、高频振荡回路	16
二、高频变压器和传输线变压器	28
三、石英晶体谐振器	32
四、集中滤波器	37
五、衰减器与匹配器	40
第三节 电子噪声及其特性	42
一、概述	42
二、电子噪声的来源与特性	43
第四节 噪声系数和噪声温度	50
一、噪声系数	50
二、噪声系数的计算	52
三、噪声系数的测量	57
四、噪声温度	58

参考文献	59
思考题与练习题	59
第三章 高频谐振放大器	62
第一节 高频小信号放大器	62
一、高频小信号谐振放大器的工作原理	63
二、放大器性能分析	64
三、高频谐振放大器的稳定性	66
四、多级谐振放大器	69
五、高频集成放大器	71
第二节 高频功率放大器的原理与特性	73
一、工作原理	74
二、高频谐振功率放大器的工作状态	78
三、高频功放的外部特性	82
第三节 高频功放的高频效应	85
一、少数载流子的渡越时间效应	85
二、非线性电抗效应	86
三、发射极引线电感的影响	87
四、饱和压降的影响	87
第四节 高频功率放大器的实际线路	88
一、直流馈电线路	88
二、输出匹配网络	90
三、推挽连接线路	95
四、高频功放的实际线路举例	96
第五节 高频功放、功率合成与射频模块放大器	97
一、D类高频功率放大器	98
二、E类高频功率放大器	102
三、功率合成器	103
四、射频模块放大器	106
参考文献	110
思考题与练习题	111
第四章 正弦波振荡器	114
第一节 反馈振荡器的原理	114
一、反馈振荡器的原理分析	114
二、平衡条件	115
三、振荡器的起振条件	116
四、稳定条件	118

五、振荡线路举例——互感耦合振荡器	119
第二节 LC 振荡器	119
一、振荡器的组成原则	119
二、电容反馈振荡器	122
三、电感反馈振荡器	124
四、两种改进型电容反馈振荡器	125
五、场效应管振荡器	128
六、压控振荡器	128
七、单片集成振荡器举例	131
第三节 振荡器的频率稳定度	133
一、频率稳定度的意义和表征	133
二、振荡器的稳频原理	134
三、提高频率稳定度的措施	135
第四节 LC 振荡器的设计方法	136
第五节 石英晶体振荡器	138
一、石英晶体振荡器频率稳定度	138
二、晶体振荡器电路	138
三、高稳定度晶体振荡器	142
第六节 振荡器中的几种现象	144
一、间歇振荡	144
二、频率拖曳现象	145
三、振荡器的频率占据现象	147
四、寄生振荡	149
参考文献	151
思考题与练习题	152
第五章 频谱的线性搬移电路	156
第一节 非线性电路的分析方法	156
一、非线性函数的级数展开分析法	157
二、线性时变电路分析法	160
第二节 二极管电路	162
一、单二极管电路	163
二、二极管平衡电路	166
三、二极管环形电路	169
第三节 差分对电路	173
一、单差分对电路	173
二、双差分对电路	177
第四节 其他频谱线性搬移电路	180

一、晶体三极管频谱线性搬移电路	180
二、场效应管频谱线性搬移电路	182
参考文献	184
思考题与练习题	184
第六章 振幅调制、解调与混频	187
第一节 振幅调制	187
一、振幅调制信号分析	188
二、振幅调制电路	196
第二节 调幅信号的解调	210
一、调幅解调的方法	210
二、二极管峰值包络检波器	211
三、同步检波	223
第三节 混频	226
一、混频的概述	226
二、混频电路	231
第四节 混频器的干扰	240
一、信号与本振的自身组合干扰	241
二、外来干扰与本振的组合干扰	243
三、交叉调制干扰(交调干扰)	245
四、互调干扰	247
五、包络失真和阻塞干扰	248
六、倒易混频	248
参考文献	249
思考题与练习题	250
第七章 角度调制与解调	259
第一节 角度调制信号分析	259
一、调频信号的时域分析	259
二、调频信号的频域分析	261
三、调频信号的功率	266
四、调频波与调相波的比较	266
第二节 调频器与调频方法	269
一、调频器	269
二、调频方法	270
第三节 调频电路	272
一、直接调频电路	272
二、间接调频电路	282

第四节 鉴频器与鉴频方法	285
一、鉴频器	285
二、鉴频方法	287
第五节 鉴频电路	294
一、叠加型相位鉴频电路	294
二、比例鉴频器	301
三、乘积型相位鉴频器	304
四、其他鉴频电路	307
第六节 调频收发信机及附属电路	309
一、调频发射机	309
二、调频接收机	310
三、附属与特殊电路	311
第七节 调频多重广播	315
一、调频立体声广播	315
二、电视伴音的多重广播	316
参考文献	317
思考题与练习题	318
第八章 反馈控制电路	323
第一节 自动增益控制电路	324
一、工作原理	325
二、自动增益控制电路	325
三、AGC 的性能指标	327
第二节 自动频率控制电路	328
一、工作原理	328
二、主要性能指标	329
三、应用	329
第三节 锁相环的基本原理	330
一、工作原理	331
二、基本环路方程	332
三、锁相环工作过程的定性分析	337
四、锁相环路的线性分析	340
五、锁相环路的应用	346
第四节 频率合成器	349
一、频率合成器及其技术指标	349
二、频率合成器的类型	351
三、锁相频率合成器	357
四、集成锁相环频率合成器	360

参考文献	366
思考题与练习题	366
第九章 高频电路新技术	370
第一节 高频电路的集成化	370
一、高频集成电路的类型	370
二、高频电路的集成化技术	371
三、高频集成电路的发展趋势	374
第二节 高频集成电路	377
一、集成无源元件	377
二、高频单元集成电路	378
三、高频组合集成电路	381
四、高频系统集成电路	383
第三节 高频电路 EDA	387
一、EDA 技术及其发展	387
二、EDA 技术的特征与 EDA 方法	388
三、EDA 工具	390
四、高频电路 EDA	391
第四节 软件无线电 (Software Radio) 技术	395
一、软件无线电台的基本结构	395
二、软件无线电台中的调制解调算法	398
三、软件无线电台应用举例	400
参考文献	403
思考题与练习题	403
第十章 典型整机线路介绍	404
第一节 短波 100W 收发信机	404
一、收发信机的主要性能指标	404
二、收发信机的组成原理	405
三、关键电路分析	407
第二节 KG107 UHF 通信机	409
一、收信机电路	410
二、发信机电路	410
三、频率合成器	412
四、VCO 电路	412
参考文献	413
思考题与练习题	413

第一章 绪论

本书主要讨论用于各种电子系统和电子设备中的高频电子线路。通信系统，特别是无线通信系统，已广泛应用于国民经济、国防建设和人们日常生活的各个领域。通信的目的与任务是传递消息。无线通信系统的一个重要特点就是利用高频（无线电）信号来传递消息。

通信中传递的消息的类型很多，传输消息的方法也很多。现代通信大多以电（或光）信号的形式出现，因此，通常被称作电信。传输电信号的媒质（或介质）可以是有线的，也可以是无线的，而以无线的形式最能体现高频电路的应用。尽管各种无线通信系统在所传递消息的形式、工作方式以及设备体制组成等方面有很大差异，但设备中产生、接收和检测高频信号的基本电路都是相同的。本书将主要结合无线通信来讨论高频电路的线路组成、工作原理和分析、设计、仿真方法。这不仅有利于明确学习基本电路的目的和加强对有关设备及系统的概念，而且对于其他通信系统也有典型意义。

第一节 无线通信系统概述

高频电路是通信系统，特别是无线通信系统的基础，是无线通信设备的重要组成部分。

一、无线通信系统的组成

麦克斯韦（Maxwell）在 1861 年从理论上预言了电磁波的存在，通过 1888 年赫兹（Hertz）的火花放电实验得以证明。从 1896 年马可尼（Marconi）的无线通信实验开始，出现了无线通信技术，并逐步涉及陆地、海洋、航空、航天等固定和移动无线通信领域。现在的无线通信技术已相当成熟，并还在继续发展。

无线通信或称无线电通信的类型很多，可以根据传输方法、频率范围、用途等来分类。不同的无线通信系统，其设备组成和复杂度虽然有较大差异，但它们的基本组成不变，图 1-1 是模拟语音无线通信系统基本组成的方框图。

图 1-1 中话筒和扬声器属于通信的终端设备，分别为信源和信宿。上下两个音频放大器分别是为放大话筒输出信号和推动扬声器工作而设置的，是低频部件，本书不讨论。发送端的音频放大器输出的信号控制高频载波振荡器的某个（些）参数，从而实现调制；下面的解调器就是针对上面发射端的调制而进行的检波（调制的逆过程）。已调制信号的频率若不够高，可根据需要进行倍频或上混（变）频；若幅度不够，可根据需要进行若干级（通常有预放、激励和输出三级）放大，经天线辐射出去。接收机一般都采用超外差（super heterodyne）的形式，在通过高频选频放大（初步的选择放大并抑制其他无用信号）后进行下混（变）频，取出中频后再进行中频放大（主选择放大，具有较大的放大增益和较强的滤波能力）和其他处理，然后进行解调。超外差接收机的主要特点就是接收信号的选择放大作用主要由频率固定的中频放大器来完成，当信号频率改变时，只要相应地改变本地振荡信号频率即可。图 1-1 中虚线以上部分为发送设备（发信机），虚线以下部分为接收设备（收信机），天线及天线开关为收发共用设备。信道为自由空间。

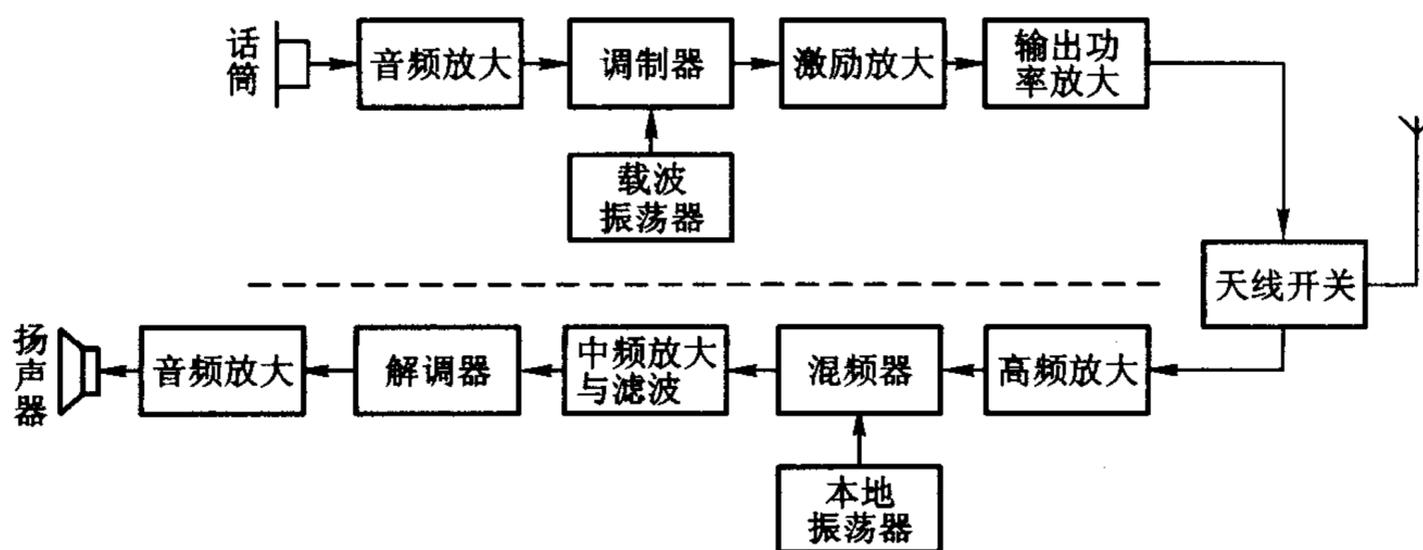


图 1-1 无线通信系统的基本组成

随着技术的发展，数字无线通信应用日益广泛。数字无线通信系统的组成与图 1-1 相似，只需将模拟通信终端换成数字通信终端或者在模拟通信终端与调制解调器之间分别增加模拟-数字转换器（ADC）和数字-模拟转换器（DAC）即可。数字无线通信系统容易实现小型化，性能更加优越。在数字无线通信系统中，接收机的结构有多种类型，除了传统的超外差结构外，还有数字中频（Digital IF）结构、直接变换结构（Direct Conversion）等。对于超外差结构，中频比信号载频低得多，因此在中频上实现对有用信号的选择要比在载频上选择对滤波器 Q 值的要求低得多，容易实现稳定的高增益放大，同时也

便于解调或 A/D 变换。超外差结构的最大缺点就是组合干扰频率点多，特别是对于镜像频率干扰的抑制颇为麻烦，因此出现了多种镜频抑制接收方案。数字中频结构就是将混频后的中频信号正交数字化，然后进行数字解调。数字中频接收的最大优点就是可以共享 RF/IF 模块，由于解调和同步均采用数字化处理，灵活方便，也便于产品的集成和小型化。但是，在宽带通信中，需要选用高速的 A/D 变换器、宽带取样保持电路以及速度足够快的数字处理芯片。直接变换结构如图 1-2 所示，就是让本地振荡频率等于载频，使中频为零，因此也称为零中频 (Zero IF) 结构，也就不存在镜像频率，从而也就避免了镜频干扰的抑制问题。另外，直接变换结构中射频部分只有高放和混频器，增益低，易满足线性动态范围的要求；由于下变频后为低频基带信号，只需用低通滤波器来选择信道即可，省去了价格昂贵的中频滤波器，也便于电路的集成。但是，直接变换结构也存在着本振泄漏、直流偏移、两支路平衡与匹配问题等缺点。随着 ADC 位置向天线端的前移，数字无线通信系统逐渐向软件无线电 (Software Radio) 系统发展。

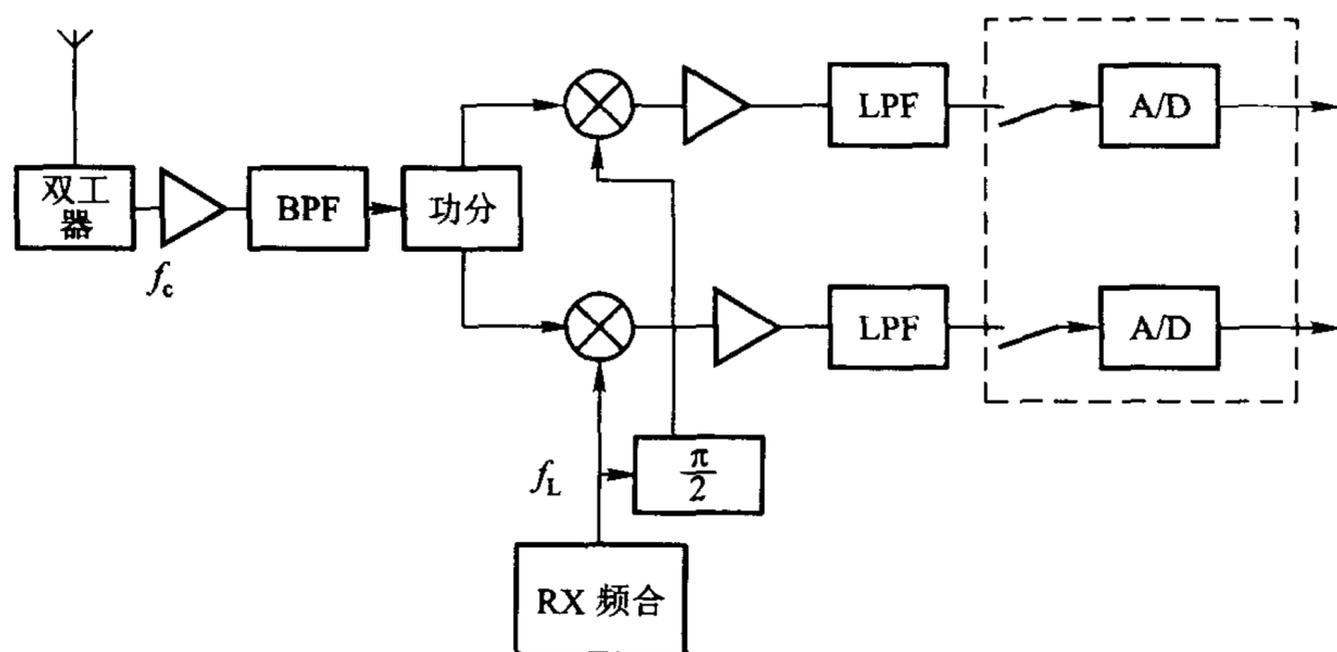


图 1-2 直接变换接收机结构

无论无线通信系统的组成结构如何变化，但其中必定要包含高频电路，而且包含的高频电路的基本内容几乎不变，主要包括以下内容：

- (1) 高频振荡器（信号源、载波信号或本地振荡信号）；
- (2) 放大器（高频小信号放大器及高频功率放大器）；
- (3) 混频或变频（高频信号变换或处理）；
- (4) 调制与解调（高频信号变换或处理）。

在无线通信系统中通常需要某些反馈控制电路。这些反馈控制电路主要是自动增益控制 (AGC) 或自动电平控制 (ALC) 电路、自动频率控制 (AFC) 电路和自动相位控制 (APC) 电路（也称锁相环 PLL）。此外，还要考虑高频电

路中所用的元件、器件和组件以及信道或接收机中的干扰与噪声问题。需要说明的是，虽然许多通信设备可以用集成电路（IC）来实现，但是上述的单元电路通常都是由有源的和无源的元器件构成的，既有线性电路，也有非线性电路。这些基本单元电路的组成、原理及有关技术问题，就是本书的研究对象。

应当指出，实际的通信设备比上面所举例子要复杂得多。比如发射机的振荡器和接收机的本地振荡器就可以用更复杂的组件——频率合成器（FS）来代替，它可以产生大量所需频率的信号。

二、无线通信系统的类型

无线通信系统的类型，可以根据不同的方法来划分。按照无线通信系统中关键部分的不同特性，有以下一些类型：

(1) 按照工作频段或传输手段分类，有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。所谓工作频率，主要指发射与接收的射频（RF）频率。射频实际上就是“高频”的广义语，它是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

(2) 按照通信方式来分类，主要有（全）双工、半双工和单工方式。所谓单工通信，指的是只能发或只能收的方式；半双工通信是一种既可以发也可以收但不能同时收发的通信方式；而双工通信是一种可以同时收发的通信方式。图 1-1 的例子是半双工方式，将天线开关换成双工器就成了双工方式。

(3) 按照调制方式的不同来划分，有调幅、调频、调相以及混合调制等。

(4) 按照传送的消息的类型分类，有模拟通信和数字通信，也可以分为语音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

各种不同类型的通信系统，其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同。但是组成设备的基本电路及其原理都是相同的，遵从同样的规律。本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路，认识其规律。这些电路和规律完全可以推广应用到其他类型的通信系统。

第二节 无线电信号与调制

自然界中存在的电磁波的波谱很宽，如图 1-3 所示，无线通信中所用的无线电波只是一种波长比较长的电磁波，占据的频率范围很广。在自由空间中，波长与频率存在以下关系：

$$c = f\lambda \quad (1-1)$$

式中： c 为光速， f 和 λ 分别为无线电波的频率和波长，因此，无线电波也可以认为是一种频率相对较低的电磁波，无线电波的频率是一种不可再生的重要

资源。

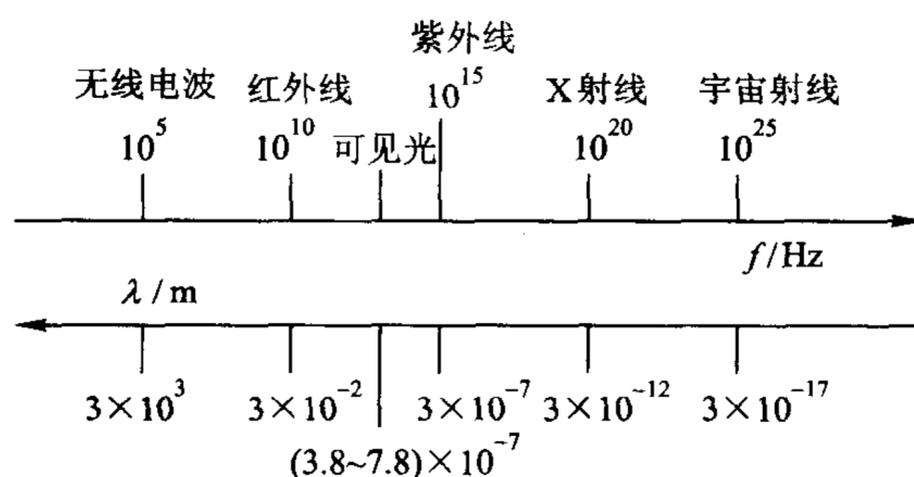


图 1-3 电磁波波谱

对频率或波长进行分段，分别称为频段或波段。不同频段信号的产生、放大和接收的方法不同，传播的能力和方式也不同，因而它们的分析方法和应用范围也不同。表 1-1 列出了无线电波的频（波）段划分、主要传播方式和用途等。表中关于频段、传播方式和用途的划分是相对而言的，相邻频段间无绝对的分界线。

表 1-1 无线电波的频（波）段划分表

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途	
长波(LW)	$10^3 \sim 10^4$ m	30 ~ 300 kHz	低频(LF)	地波;远距离通信	
中波(MW)	$10^2 \sim 10^3$ m	300 kHz ~ 3 MHz	中频(MF)	地波、天波;广播、通信、导航	
短波(SW)	10 ~ 100 m	3 ~ 30 MHz	高频(HF)	天波、地波;广播、通信	
超短波(VSW)	1 ~ 10 m	30 ~ 300 MHz	甚高频(VHF)	直线传播、对流层散射;通信、电视广播、调频广播、雷达	
微波	分米波(USW)	10 ~ 100 cm	300 MHz ~ 3 GHz	特高频(UHF)	直线传播、散射传播;通信、中继与卫星通信、雷达、电视广播
	厘米波(SSW)	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz	超高频(SHF)	直线传播;中继和卫星通信、雷达
	毫米波(ESW)	1 ~ 10 mm	30 ~ 300 GHz	极高频(EHF)	直线传播;微波通信、雷达

“高频”也是一个相对的概念，表中的“高频”指的是短波频段，其频率范围为 3 ~ 30 MHz，这只是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频 (RF, Radio Frequency)，其频率范围非常宽。只要电路尺寸比工作波长小得多，仍可用集中参数来分析实现，都可认为属于“高频”范围。就目前的技术水平来讲，“高频”的上限频率可达微波频段（如 3 GHz）。