

“一五” 高职高专电气电子相关专业规划教材



TONGXIN DIANZI XIANLU

通信电子线路

● 刘素芳 主编



河南科学技术出版社

“十一五”高职高专电气电子相关专业规划教材

通信电子线路

刘素芳 主编

河南科学技术出版社

·郑州·

内 容 提 要

本教材重点介绍了通信系统中的基本单元电路及原理。教材共分7章, 主要包括: 通信系统导论, 高频小信号放大器, 高频功率放大器, 正弦波振荡器, 调幅、解调与混频, 角度调制与解调及反馈控制电路。章后附有小结和思考与练习, 以及相应的实验项目; 书末还附有收音机安装和调试实验及EWB 仿真软件介绍。

本教材可供高职高专院校通信工程、电子信息工程等相关专业使用, 也可作为电大、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

通信电子线路/刘素芳主编. —郑州: 河南科学技术出版社,
2009. 9

(“十一五” 高职高专电气电子相关专业规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5349 - 4278 - 5

I. 通… II. 刘… III. 通信系统 - 电子电路 - 高等学校:
技术学校 - 教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 067875 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028 65788613

网址: [www. hnstp. cn](http://www.hnstp.cn)

策划编辑: 孙 彤

责任编辑: 张 建

责任校对: 张 恒

封面设计: 李 冉

版式设计: 栾亚平

责任印制: 朱 飞

印 刷: 河南龙华印务有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 11. 75 字数: 286 千字

版 次: 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 25. 00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

序

从 20 世纪 90 年代末开始,我国高等职业教育进入了快速发展时期。目前,我国高等职业教育的规模,无论是院校数量还是学生数量,都占据了高等教育总规模的半壁江山。高等职业教育是高等教育的一种新类型,承担着为我国走新型工业化道路、调整经济结构和转变增长方式培养高综合素质、高技能人才的任务。随着我国经济建设步伐的加快,特别是随着我国由制造大国向制造强国的转变,现代制造业对高综合素质、高技能专业人才的需求更为迫切。面对这一形势,高职高专院校的电气电子相关专业根据市场和社会需要,开展教学研究和改革,更新教学内容,改进教学方法,推进精品专业、精品课程和教材建设,取得了丰硕的成果。及时总结这些成果并以教材形式予以体现,推广至更多的院校,无疑是一件意义深远的事情。为了适应高职高专教学改革的需要,鼓励教师编写富有特色的教材,促进高职高专电气电子相关专业教学质量的不断提高,河南科学技术出版社根据共同参与、共同建设、共同发展的原则,组织编写了《“十一五”高职高专电气电子相关专业规划教材》。

本套教材涵盖了高职高专电气电子相关专业的专业基础课、主干专业课和实训课。本套教材按照高职教育“以服务为宗旨,以就业为导向”的指导思想和培养高综合素质、高技能人才的基本要求组织编写,对传统的课程体系和教学内容进行了整合和更新,精简了理论内容,突出了专业技能和理论知识应用能力的培养,缩短了学生专业技能与生产一线需求的距离,进一步体现了高职教育的人才培养特色。

参加本套教材编写的作者都是长期从事高职高专教学工作的教师,他们对高等职业技术人才的培养、对电气电子相关专业的课程体系和教学改革具有深刻的理解和思考,在教学实践中积累了丰富的经验。从某种意义上说,本套教材是有关高职高专院校电气电子相关专业多年教学改革成果的体现和凝练。相信这套教材将在高职高专教学工作中发挥积极的作用,并期待着它不断完善,成为高职高专教材中的精品体系。

刘宪林

2008 年 12 月 1 日

“十一五” 高职高专电气电子相关专业规划教材 编审委员会名单

主 任	刘宪林			
副主任	(按姓氏笔画排序)			
	王玉中	宁玉伟	祁和义	李新德
	肖 珑	员 莹	宋海军	张惠敏
	张新成	赵 军	赵章吉	耿长清
	徐其兴	徐思成	高士忠	董作霖
委 员	(按姓氏笔画排序)			
	上官同英	付 涛	刘素芳	许春香
	牟光臣	李 伟	李德明	杨志帮
	张伟敏	张志军	张桂香	张湘洁
	周 铜	郑文杰	赵新颖	郝文玲
	姚 燕	梅 杨	雷万忠	蔡振伟

前 言

《通信电子线路》是电子与信息技术专业的一门重要的专业基础课程。本教材结合高职高专教学特点,突出实用性与实践性,以模拟通信系统的组成原理为主线,讲述通信系统各功能电路的基本单元及分析方法。在内容的编排上,尽量做到思路清晰、简明扼要、重点突出。本教材力求突出以下特点:

(1) 内容安排以“必需”、“够用”为原则。避免过于复杂的理论推导,重点介绍各单元电路的工作原理和基本分析方法,以及从单元到系统、从分立到集成、从基本原理到功能电路的实现方法,强调了这些功能电路间的联系及其应用。

(2) 反映通信系统的新技术。以模拟通信系统的组成原理为主线,并适当介绍了现代通信的新方向、新器件及新电路。

(3) 突出实用性与实践性。章末附有相应的实验项目,书末还附有收音机安装与调试实验及 EWB 仿真软件介绍。

本教材由郑州铁路职业技术学院刘素芳担任主编,负责统稿,并编写了第 1 章、第 2 章、第 5 章的 5.1 节及实验 1;黄河科技学院陈万里编写了第 3 章、实验 2 及附录 1;郑州铁路职业技术学院黄根岭编写了第 4 章、实验 3 及附录 2;郑州铁路职业技术学院付涛编写了第 5 章的 5.2~5.5 节、实验 4 及实验 5;河南机电高等专科学校李明编写了第 6 章及实验 6;河南职业技术学院屈芳升编写了第 7 章及实验 7。

由于编者水平有限,本教材中难免存在不当之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2009 年 5 月

《通信电子线路》编写人员

主 编 刘素芳

副主编 屈芳升 李 明

编 者 (按姓氏笔画排序)

付 涛 刘素芳 李 明

陈万里 屈芳升 黄根岭

目 录

第 1 章 通信系统导论	1
1.1 概述	1
1.2 无线通信系统信道	5
1.3 通信电子线路的信号变换	7
1.4 非线性电路分析基础	9
1.5 现代通信技术的发展方向	11
1.6 本课程特点	12
小结	13
思考与练习	13
第 2 章 高频小信号放大器	15
2.1 概述	15
2.2 选频网络	17
2.3 小信号谐振放大器	25
2.4 谐振放大器的稳定性	30
2.5 集中选频放大器	32
实验 1 高频小信号谐振放大器	33
小结	36
思考与练习	36
第 3 章 高频功率放大器	37
3.1 谐振功率放大器	37
3.2 晶体管倍频器	49
3.3 功率合成技术	51
实验 2 高频谐振功率放大器	52
小结	54
思考与练习	55
第 4 章 正弦波振荡器	56
4.1 反馈型振荡器	56
4.2 LC 正弦波振荡器	59
4.3 石英晶体振荡器	64

4.4 RC 振荡器	67
实验3 RC 正弦波振荡器	70
小结	72
思考与练习	73
第5章 调幅、检波与混频	76
5.1 频谱搬移电路及特性	76
5.2 振幅调制	80
5.3 调幅电路	85
5.4 检波器	88
5.5 混频器	94
实验4 调幅实验	101
实验5 检波实验	102
小结	103
思考与练习	103
第6章 角度调制与解调	106
6.1 调角波	106
6.2 调频电路	112
6.3 调角波的解调	117
实验6 三管调频发射机的制作	124
小结	126
思考与练习	126
第7章 反馈控制电路	128
7.1 自动增益控制电路	128
7.2 自动频率控制电路	133
7.3 锁相环路	134
7.4 锁相环路的应用	143
实验7 锁相环路性能测试	151
小结	152
思考与练习	152
附录1 AM/FM 收音机的安装与调试	153
附录1.1 工作原理	153
附录1.2 电路板装配与调整	155
附录2 EWB 电子电路仿真软件简介	163
附录2.1 概述	163
附录2.2 功能介绍	163
附录2.3 基本操作	174
参考文献	180

第1章 通信系统导论

通信的主要任务是准确而迅速地传递信息。通信系统是传递、交换及处理信息的系统，是实现信息传递过程的全部技术设备和信道的总和。

1.1 概述

信息可以是语音、音乐、文本、图像和数据等。通信系统能够实现信息的传输，如广播与传统电话是实现声音传播的通信系统，可视电话与电视是实现声音、图像传播的通信系统。

1.1.1 通信系统的组成

无线电通信、广播、雷达、导航等都是利用高频无线电波来传递信息。尽管它们在传递信息形式、工作方式及设备等方面有很大不同，但设备中产生、接收、检测高频信号的基本电路大致相同。

一个完整的通信系统包括输入变换器(信源)、发送设备、信道(传输媒介)、接收设备、输出变换器(信宿)五部分，如图1-1所示。

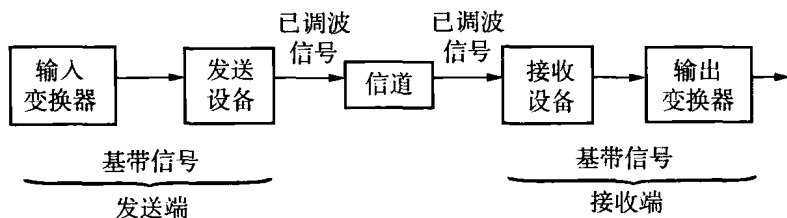


图 1-1 通信系统的组成

1. 输入变换器 待传送的原始信息一般是非电量形式，如文字、数据、语音、音乐、图像等。输入变换器将原始信息转换成电信号，这时的电信号可称为基带信号(或调制信号)。输入变换器包括话筒、摄像机等各种传感器。

2. 发送设备 发送设备将基带信号变换成适于信道传播的形式。变换中最主要的处理称为调制，发送设备输出的信号称为已调波信号。

3. 信道 信道即传送信息的通道，如电缆、光缆及自由空间等。

按信道的不同将通信系统分为有线通信和无线通信。有线通信指通过导线传递电信号的通信方式。无线通信是通过自由空间传送电信号的通信方式。两种通信方式的本质都是利用电磁波来传递信息。本教材主要讨论无线通信系统。

4. 接收设备 接收设备处理由信道传来的已调波信号, 从中还原出与信源相对应的基带信号。这种处理叫做解调。

5. 输出变换器(信宿) 输出变换器负责将接收设备输出的基带信号还原成信息原始形式。如输出变换器中的喇叭用来还原声音, 显像管用来说恢复图像。

1.1.2 通信系统的分类

(1) 按传输信息的物理特征, 可以分为电话、电报、传真通信系统, 广播电视通信系统, 数据通信系统等。

(2) 按传输信号的传送类型, 可以分为模拟通信系统和数字通信系统。

(3) 按传输媒介(信道)的物理特征, 可以分为有线通信系统和无线通信系统。在无线模拟通信系统中, 信道是指自由空间。

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, 但是系统中的设备的基本电路及其原理都是相同的, 遵循同样的规律。本教材将以模拟通信为重点来论述模拟通信系统中发送设备和接收设备的工作原理与组成, 并讨论构成这些设备的基本电路, 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。

1.1.3 无线电信号的发射条件

音频即人耳能听到的声音频率, 约在 $20\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$, 它在空气中传播的速度很慢, 约为 340 m/s , 且随着传播的距离加大而迅速衰减。

要实现音频信号的远距离无线传播, 不能用音频频率发射, 原因如下:

(1) 音频信号不能直接辐射到空中。由天线理论可知, 天线长度 L 必须和电信号波长 λ 同一数量级, 即 $L \geq \frac{1}{10}\lambda$ 时, 才能把电信号向空中有效地辐射传播出去。我们知道无线电波在空间的传播速度 $c = \lambda f$, 而其中 $c = 3 \times 10^8\text{ m/s}$, 无线电波的波长 λ 与频率 f 成反比。由原始非电量信息转换而成的原始电信号(基带信号)一般是低频信号, 波长很长。例如, 音频信号的波长范围是 $15 \times 10^3 \sim 15 \times 10^6\text{ m}$, 若直接发射它们, 要制造出至少 $15 \times 10^2 \sim 15 \times 10^5\text{ m}$ 的巨大天线, 这显然不可能。

(2) 音频信号直接辐射传播, 会造成信号混杂, 无法收听。假如各广播电台都直接用音频频段传播信号, 则各电台信号频率都在 $20\text{ Hz} \sim 20\text{ kHz}$, 它们在空中混在一起, 互相重叠、干扰, 接收设备无法从中选出有用信号。

因此, 为了有效地进行传输, 必须采用几百千赫以上的高频振荡信号作为载体, 将携带信息的音频电信号“驮载”到高频振荡信号上(这一过程称为调制), 由天线发射出去。到接收端, 再把低频电信号从高频振荡信号上“卸载”下来(这一过程称为解调)。这样, 一是所需天线的尺寸大大减小, 二是不同的发射台采用不同频率的高频信号作载体, 彼此互不干扰。如中央人民广播电台中波调幅用 639 kHz , 而河南人民广播电台交通台(调频)的载波频率为 104.1 MHz 。

无线通信中用来驮载音频信号的高频振荡信号叫做载波, 它的频率称为载频, 通常用 f_c 表示。

1.1.4 无线电发送系统的组成

无线电发送系统的组成如图 1-2 所示。

高频振荡器的作用是产生最初的等幅高频振荡信号。

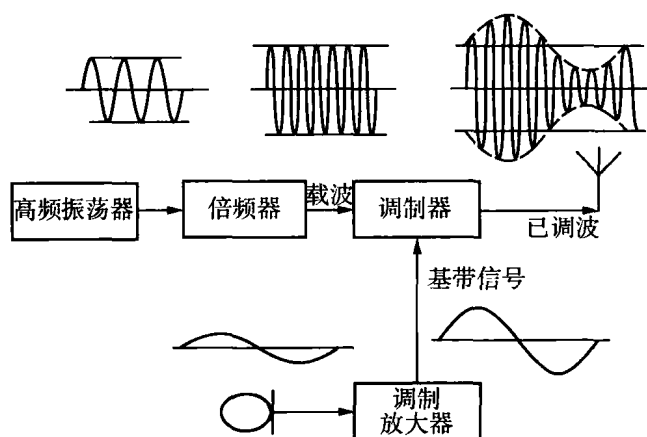


图 1-2 无线电发送系统的组成

倍频器的作用是提高高频振荡信号的频率，产生所需频率的载波信号。为保证高频振荡器的频率稳定度，高频振荡器的振荡频率一般比载波频率低很多。

调制器就是将要传送的信息装载到载波上的装置。调制就是在传送信号的一方（发送端），用我们所要传送的对象（例如语音信号）去控制载波的一个或几个参数（幅度、频率或相位），使载波的幅度（或频率、相位）随要传送的对象信号的规律变化，这里把对象信号本身称为调制信号，调制后形成的信号称为已调波信号。

根据载波受调制参数的不同，可把调制分为调幅、调频和调相三类，使幅度变化的称为调幅（Amplitude Modulation, AM）；使频率变化的称为调频（Frequency Modulation, FM）；使相位变化的称为调相（Phase Modulation, PM）。图 1-3 为调幅信号的波形图，未经调制的高频振荡信号称为载波信号，如图 1-3a 所示；所需传递的低频电信号称为调制信号（又称基带信号），如图 1-3b 所示；经过调制的高频振荡信号称为已调波信号，如图 1-3c 所示。

1.1.5 无线电接收系统的组成

1. 最简单的无线接收机 无线电信号的接收和发送过程恰好相反。在接收处，先由接收天线将收到的电磁波转变为已调波电流（频率为载频 f_c ），然后从这已调波电流中检出原始电信号（频率为 F ）。如果原始电信号为音频信号，最后再由听筒或扬声器将检波取出的音频电流转变为声音信号，这样人就听到了发射机处发送的语音信号。最简单的无线接收机如图 1-4 所示。这样的接收机声音微弱、灵敏度低，已很少使用。目前使用的接收机几乎全是超外差式。

2. 超外差式接收机 超外差式接收机的主要特点就是由频率固定的中频放大器来完成对接收信号的选择和放大；当信号频率改变时，只要相应改变本地振荡信号频率即可。与其他结构的接收机相比，由于中频比载频低得多，超外差式接收机对选频网络的品质因数 Q 值要求低得多，容易实现高增益。

超外差式接收机的组成如图 1-5 所示。

接收天线接收从自由空间传来的电磁波并产生微弱的高频无线电信号，其电压一般只有几十微伏至几毫伏。

高频放大器简称高放，靠调谐电路对天线接收的微弱信号进行选择 and 放大，输出载频为 f_c 的已调波信号。

本地振荡器简称本振，用来产生频率为 f_L 的等幅高频振荡信号。 f_L 始终要比载频 f_c 高出 f_1 ，即满足 $f_L = f_c + f_1$ 。其中 f_1 为中频信号，中频信号是载频为 f_1 的已调波信号。

混频器将高放输出的频率为 f_c 的已调波信号与本振提供的频率为 f_L 的信号混频，产生两信号的频率之和 $(f_L + f_c)$ 与频率之差 $(f_L - f_c)$ 。

中频放大器简称中放，是中心频率为 f_1 的选频放大器，可进一步滤除无用信号，并将有用信号放大到足够幅度。

检波器也称为解调器，是将中放送来的中频调制信号变换为原基带信号。这个信号变换过程是调制的反过程，叫做解调。解调后的信号再经低频放大器（简称低放）、功率放大器（简称功放）放大后从扬声器输出。

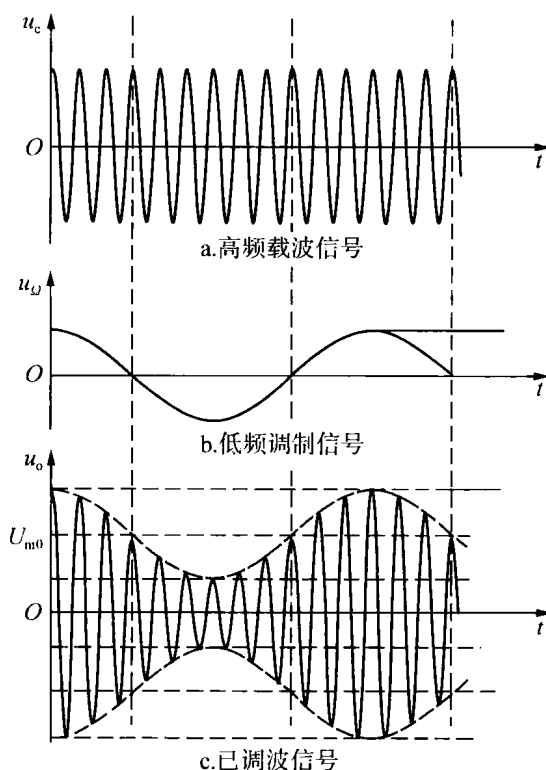


图 1-3 调幅信号波形

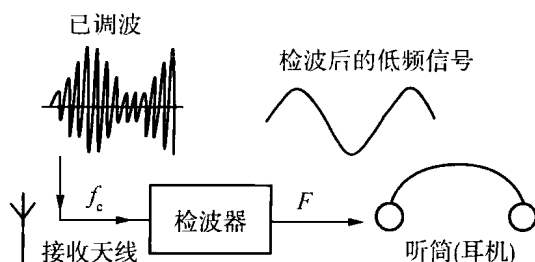


图 1-4 最简单的无线接收机的组成

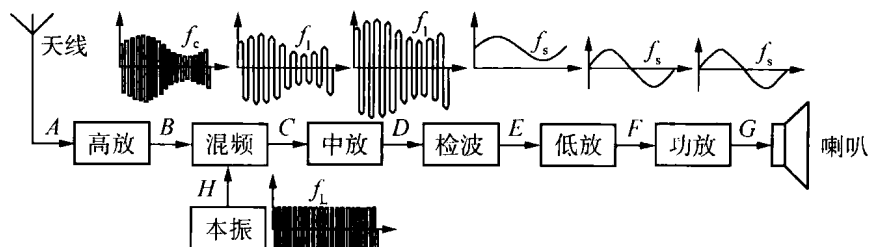


图 1-5 超外差式接收机的组成

其中混频器是超外差式接收机的核心，它将接收到的不同载波频率变为固定的中频，

这就是超外差作用。

1.2 无线通信系统信道

无线通信的信道是自由空间。

1.2.1 无线电波的传播方式

无线电波的传播方式主要有绕射(地波)传播、折射和反射(天波)传播、直射传播等,如图1-6所示。决定传播方式和传播特点的关键因素是无线电信号的频率。

1. 绕射传播 电磁波沿着地球的弯曲表面传播,如图1-6a所示,这样传播的电磁波又称地波。由于大地不是理想导体,当电磁波沿其表面传播时,有一部分能量被损耗掉,损耗随着波长缩短、频率增高而加重。因此,频率较高的电磁波不宜绕射传播,而中长波是绕射传播。

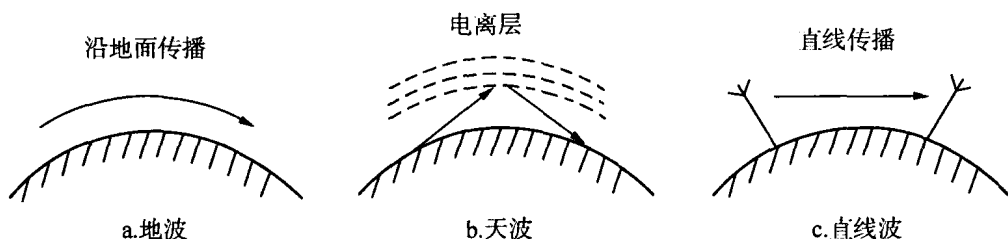


图1-6 无线电波的主要传播方式

2. 折射和反射传播 靠天空中电离层的折射和反射传播的电磁波称为天波,如图1-6b所示。在距离地面50 km以上的大气层中,太阳辐射和星际空间辐射强烈,空气产生电离形成电离层。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,因此高频信号适于用天波传播。但当频率超过一定值后,电磁波就会穿透电离层传播到宇宙空间而不再返回地面,此时只能采用直射传播形式。

3. 直射传播 电磁波从发射天线发出,沿直线传播到接收天线,如图1-6c所示,这样传播的电磁波又称直线波。通常频率在30 MHz以上的电磁波适合直射传播。

1.2.2 无线电波频段的划分

1. 无线电波频段划分及其用途 任何信号都具有一定的频率或波长。频率从几十千赫到几万兆赫的电磁波都属于无线电波。电磁波辐射的波谱很宽,如图1-7所示。

为便于分析和应用,习惯上将无线电的频率范围划分为若干个区域,即对频率或波长进行分段,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,传播的方式也不同,其应用范围也不同。无线电波的频(波)段划分如表1-1所示,其中米波和分米波有时合称为超短波。

表1-1中的高频是一个狭义的概念,指的是短波波段,其频率范围为3~30 MHz;而广义的高频指适合无线电发射和传播的频率,其频率范围非常宽,只要电路的物理尺寸比工作波长小得多,则频率为300 kHz~3 GHz,即中波至分米波均包含在高频范畴,都可以认为是属于高频(就目前技术来讲,高频的上限频率可达3 GHz)。

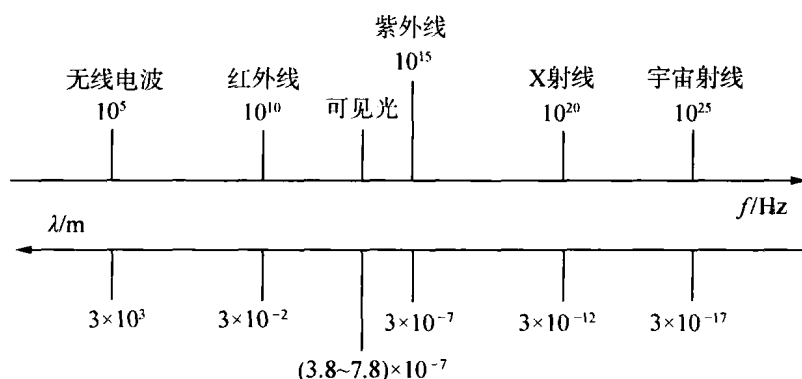


图 1-7 电磁波波谱

表 1-1 无线电波的频(波)段划分及其用途

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
超长波	$10^8 \sim 10^4$ m	3 Hz ~ 30 kHz	VLF(甚低频)	音频、电话、数据终端
长波	$10^4 \sim 10^3$ m	30 ~ 300 kHz	LF(低频)	地波; 导航、信标、电力线通信
中波	$10^3 \sim 10^2$ m	300 kHz ~ 3 MHz	MF(中频)	地波、天波; AM 广播、业余无线电
短波	$10^2 \sim 10$ m	3 ~ 30 MHz	HF(高频)	地波、天波; 移动电话、短波广播、业余无线电
米波(超短波)	10 ~ 1 m	30 ~ 300 MHz	VHF(甚高频)	直线传播、对流层散射; FM 广播、TV、导航移动通信
分米波	100 ~ 10 cm	300 M ~ 3 GHz	UHF(超高频)	直线传播、散射传播; TV、遥控遥测、雷达、移动通信
厘米波	10 ~ 1 cm	3 ~ 30 GHz	SHF(特高频)	直线传播; 微波通信、卫星通信、雷达
毫米波	10 ~ 1 mm	30 ~ 300 GHz	EHF(极高频)	直线传播; 微波通信、雷达、射电天文学

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(含米波, $\lambda \geq 1$ m)的信号通常用集总(中)参数的方法来分析与实现,而对于米波以下($\lambda < 1$ m)的信号一般应用分布参数的方法来分析与实现。

无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

2. 无线电波的分类

(1) 按波长分为超长波、长波、中波、短波、超短波(米波)、分米波、厘米波、毫米波等。

目前无线电广播使用的无线电波段: 535 ~ 1 605 kHz 为中波广播, 2 ~ 24 MHz 为短波广播, 88 ~ 108 MHz 为调频广播。

(2) 按频率分为甚低频、低频、中频、高频、甚高频、超高频、特高频、极高频等。

目前广播电视使用的频率有甚高频段和超高频段。甚高频段中 48.5 ~ 92 MHz 供 1 ~ 5 频道用, 167 ~ 223 MHz 供 6 ~ 12 频道用; 超高频段中 470 ~ 958 MHz 供其他 56 个频道用。

如图 1-8 所示。

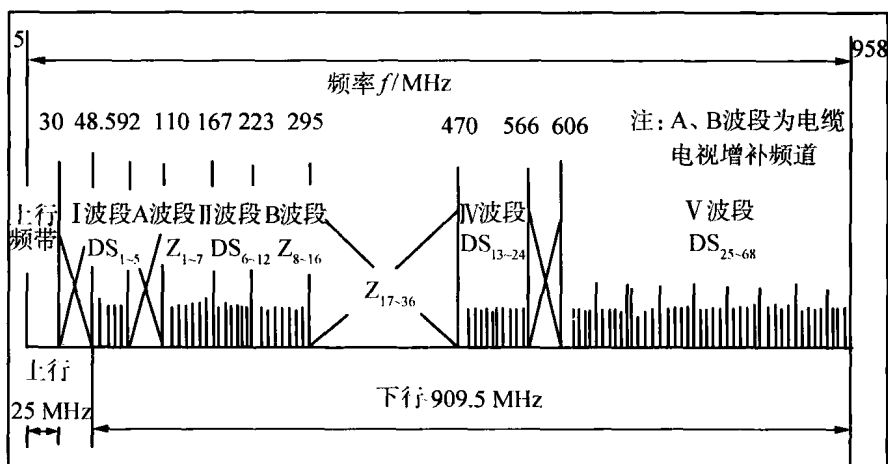


图 1-8 广播电视使用的频率

1.3 通信电子线路的信号变换

1.3.1 通信电子线路中的信号

通信电子线路处理的实际信号千变万化,可分为基带信号(又称调制信号)、高频载波信号和已调波信号三种形式。基带信号直接反映待传播的原始信息,它是低频信号,不能直接发射,必须经调制成为已调波信号才能进行无线传播。调制时的运载基带信号的工具即高频载波信号。

1.3.2 信号的表示方法

通信电子线路要处理的信号常采用数学表达式、波形和频谱来表示。

(1) 数学表达式:一般适于表达较简单的信号。

(2) 波形:一般适于表达较简单的信号。

(3) 频谱:用以表达实际中大量规律复杂或无规律信号的频率变换过程。任何信号都可以分解为许多不同频率的正弦信号之和,各正弦分量按频率分布的情况即为频谱。频谱图中用频率 f 作横坐标,用正弦分量的相对振幅作纵坐标。

如某高频载波信号的表达式为

$$u_c(t) = U_{cm} \cos(\omega_c t) \quad (1-1)$$

式中,载波角频率 $\omega_c = 2\pi f_c$, f_c 为载波频率。该信号波形如图 1-9a 所示,在频谱图上对应为频率 f_c 、幅值 U_{cm} 的一条频谱线,如图 1-9b 所示。

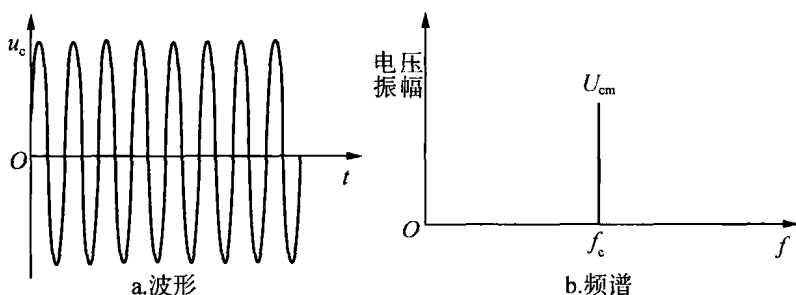
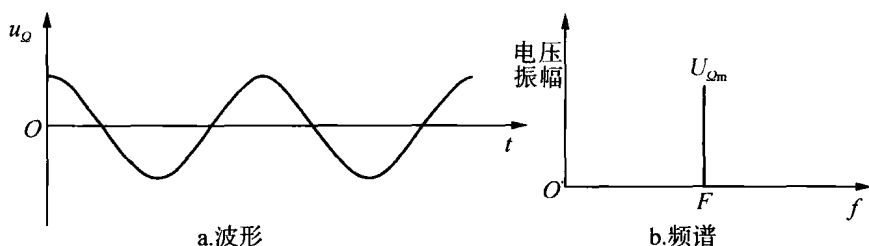
为分析方便,假设基带信号为单一频率的低频信号,其表达式为

$$u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos(\Omega t) \quad (1-2)$$

式中,基带角频率 $\Omega = 2\pi F$, F 为基带频率。该信号波形如图 1-10a 所示,在频谱图上对应为频率 F 、幅度 $U_{\Omega m}$ 的频谱线,如图 1-10b 所示。

1.3.3 调制和已调波信号的频谱分析

1. 调制的主要作用

图 1-9 高频载波 $u_c(t) = U_{cm} \cos(\omega_c t)$ 的波形及频谱图 1-10 基带信号 $u_a(t) = U_{om} \cos(\Omega t)$ 的波形及频谱

(1) 实现信道复用：把多个信号分别安排在不同的频段上同时进行传输。

(2) 提高抗干扰能力：调制可以避免多个信号间的相互干扰。

从频谱分析的角度看，调制还能“进行频谱搬移”，将原来不适宜传输的基带信号搬到适合传输的某一个频段上，再送入信道。

2. 调制过程的频谱分析 调制有调幅、调频和调相三种，具体分析见第 5、6 章的有关叙述。这里仅以调幅为例，讨论用频谱分析的方法解释调制的过程。

调幅就是用基带信号去改变载波信号幅度的过程，经调幅的已调波可表示为

$$u_{AM}(t) = (U_{cm} + k_a U_{om} \cos \Omega t) \cos \omega_c t = U_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \quad (1-3)$$

式中， k_a 为调制灵敏度，是由调制电路决定的比例常数； $m_a = \frac{k_a U_{om}}{U_{cm}}$ 称为调幅波的调制系数（或调幅度），表示载波振幅受基带信号控制的程度；已调波的振幅 $U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t)$ 反映了基带信号的变化规律，称为调幅波的包络。

根据三角函数将式(1-3)展开，得到

$$u_{AM}(t) = U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega) t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega) t \quad (1-4)$$

该式表明，单一频率的基带信号经调幅后的已调波由三个频率分量构成：一是载波分量，频率为 f_c ，振幅为 U_{cm} ；二是频率为 $(f_c - F)$ 的分量，称为下边频；三是频率为 $(f_c + F)$ 的分量，称为上边频。上、下边频的振幅均为 $\frac{1}{2} m_a U_{cm}$ 。波形及频谱如图 1-11 所示。频率为 $(f_c - F)$ 的谱线和频率为 $(f_c + F)$ 的谱线对称排列在载频 f_c 的两侧，可见，调幅即将基带频率 F 搬移到载波频率 f_c 两侧的过程。

实际上的基带信号并不是单一频率，而是占有一定带宽的连续低频信号，可以分解为