



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

高频电子线路 (第4版)

胡宴如 主编



高等教育出版社
Higher Education Press



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

高频电子线路

第四版 上册

清华大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

高频电子线路

(第4版)

胡宴如 主编

高等教育出版社

内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是在“十五”国家级规划教材《高频电子线路》(第3版)的基础上,总结课程教学改革实践并汲取各方面的建议和意见修订而成的。

全书由绪论,小信号选频放大器,高频功率放大器,正弦波振荡器,振幅调制、解调与混频电器,角度调制与解调电路,反馈控制电路共7章和附录“集成接收机与发射机应用举例”等组成。每节后有复习与讨论题,每章有小结和习题。

本书以应用为目的,力求重点突出、层次分明、深入浅出、概念清楚。与本书配套有教学课件、考试系统和自测系统,便于教与学。

本书可作为高职高专院校电气、电子、通信、自动化、应用电子等专业的教材,也可供相关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/胡宴如主编. —4版. —北京:高等教育出版社,2008.12

ISBN 978-7-04-024980-4

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第166120号

策划编辑 孙杰 责任编辑 李葛平 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉
版式设计 王艳红 责任校对 殷然 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京鑫海金澳胶印有限公司

开本 787×1092 1/16
印张 14
字数 330 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 1993年11月第1版
2008年12月第4版
印次 2008年12月第1次印刷
定价 19.30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

物料号 24980-00

第 4 版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是在“十五”国家级规划教材《高频电子线路》(第3版)的基础上,总结了课程教学改革实践经验并汲取各方面的建议和意见修订而成的。全书保持原有风格和特点,以应用为目的,力求重点突出、层次分明、深入浅出、概念清楚,并注意将理论讲授、课堂讨论、自学、作业以及实践训练等教学环节有机结合,以充分调动学生的学习积极性和主动性。因此,本次修订根据现代通信技术的发展和高职高专教学特点,对原书部分章节内容进行适当补充、删减和修改,新编了附录“集成接收机与发射机的应用举例”,重新整合全书各章节复习讨论题、习题,降低难度,加强基本概念的巩固,促进应用能力的提高。

本书内容以模拟通信系统基本功能电路为主,全书由7章和附录组成。

第1章为绪论,简要介绍通信系统的组成、无线电波的传播特点、非线性电子线路的基本概念及本课程特点。第2章为小信号选频放大器,主要介绍LC并联谐振回路的基本特性、小信号谐振放大器的工作原理以及集中选频放大器的组成,对放大器的噪声作简单介绍。第3章为高频功率放大器,主要讨论丙类谐振功率放大器的电路、工作原理及特性以及传输线变压器及宽带高频功率放大器的工作原理。第4章为正弦波振荡器,主要介绍反馈振荡器的工作原理、LC振荡器和晶体振荡器。第5章为振幅调制、解调与混频电路,主要介绍振幅调制、解调与混频原理,同时对相乘器电路以及实用调幅、检波和混频电路进行讨论。第6章为角度调制与解调电路,主要介绍频率调制与解调原理、调频与鉴频电路。第7章为反馈控制电路,主要介绍锁相环路的工作原理及其应用,对自动增益控制及自动频率控制电路只做简单介绍。附录为集成接收机与发射机应用举例,主要介绍几种集成接收机与发射机电路的功能及其应用。

高频电子线路是一门工程性、实践性很强的课程,本课程学习时必须高度重视实践教学环节,坚持理论联系实际。考虑到强化技能训练,便于教学安排,编者将另编有《高频电子线路实验与仿真》一书,以供教学选用和参考。

本书由胡宴如任主编,耿苏燕任副主编,胡旭峰、马丽明、王敏珍等参与本书部分书稿的编写和整理工作。

本书承蒙解放军理工大学蒋榴英副教授仔细审阅,提出了许多宝贵的修改意见及建议,在此表示衷心的感谢。

本书自1993年出版以来,得到了高等学校广大师生的厚爱,编者深感欣慰,借此机会向长期使用本书的有关高等学校及对本书的出版付出辛勤劳动的高等教育出版社有关编辑致以深深的感谢!并对原教材提出过意见和建议的读者表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中不妥和错漏之处,敬请读者继续给予批评指正。

编 者
2008.10

第 3 版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,其第一版于 1993 年出版,曾获国家教委优秀教材二等奖,第二版于 2001 年出版。为了更好地适应高职高专教育发展的需要,现在第二版的基础上进行修改,作为高职高专电子信息工程、通信工程等专业的教材,也可供相应工程技术人员参考。

本次修订将保持第二版的体系和特点,只对部分内容进行调整和修改,使全书内容更加符合高职高专的教学特点。本书以应用为目的,用工程观点删繁就简,加强基本知识、基本理论和基本电路的分析;根据现代电子技术的需要,适当介绍新技术、新器件及其应用;在内容取舍上,尽量做到少而精、重点突出、层次分明、叙述通俗、概念清楚。

全书共 7 章。第 1 章为绪论,简要介绍通信系统的组成和非线性电子线路的基本概念;第 2 章为小信号选频放大器,主要介绍小信号谐振放大器的工作原理及集中选频放大器的组成;第 3 章为高频功率放大器,主要讨论丙类谐振功率放大器的工作原理、电路和传输变压器及宽带高频功率放大器的工作原理;第 4 章为正弦波振荡器,主要介绍 LC 振荡器和晶体振荡器;第 5 章为振幅调制、解调与混频电路,主要介绍频谱线性搬移电路的基本原理及实现电路模型,常用调幅、检波和混频电路;第 6 章为角度调制与解调电路,主要介绍频率调制、解调原理及实用调频和鉴频电路;第 7 章为反馈控制电路,主要介绍锁相环路工作原理、应用和频率合成技术,对自动增益控制电路和自动频率控制电路只做简单介绍。

另外,本书编写中还注意将理论讲授、课堂讨论、自学、作业等教学环节有机结合,以充分调动学生的学习积极性和主动性。所以,每节编有复习与讨论题,每章编有小结和习题,习题内容力求突出本课程的重点和基本要求,并注意到与工程应用相结合。

本书由胡宴如任主编,耿苏燕担任副主编,胡旭峰、李晓鸣、马丽祥等参与本书部分书稿的编写和整理工作。

本书出版以来,得到广大兄弟院校师生的关心和支持,提出了许多宝贵意见和建议,在此谨致以衷心的感谢。书中不妥之处,恳请读者继续给予批评指正。

编者
2004 年 6 月

第二版前言

本书第一版作为高等学校工程专科“八五”规划教材于1993年出版,曾获国家教育委员会优秀教材二等奖。随着科学技术的发展及教育体制改革的深入,原书在某些方面已不能满足当前教学的需要,现根据教育部最新制订的《高职高专教育高频电子技术课程教学基本要求》,结合近年教学改革与实践,在第一版的基础上进行全面修订。修订的基本思路是在保留第一版体系和基本特色的前提下,进一步加强基本知识、基本理论和基本电路的分析;以应用为目的,以必需、够用为度,较大幅度地删减对读者可能要求过高的公式推导;根据现代电子技术的需要,删减陈旧和应用较少的内容,适当增加新发展的和实用性内容;在内容取舍上尽量做到少而精、重点突出、层次清晰,叙述简明通俗、概念清楚。本版与第一版比较,全书篇幅有了较大的压缩,各章内容主要变动情况如下:

第1章绪论由第一版绪论及第二章(高频功率放大器)中非线性电子线路概念等内容组成。

第2章小信号选频放大器是将第一版第一章(高频小信号放大器)内容中删去串联谐振回路、耦合谐振回路、晶体管Y参数等效电路及放大器噪声后重新整理而成。

第3章谐振功率放大器由第一版第二章(高频功率放大器)中谐振功率放大器和功率合成技术两部分内容组成,第一版中参量混频器内容移至第5章。

第4章正弦波振荡器由第一版第三章(正弦波振荡器)内容组成,删去第一版中LC振荡器起振条件的推导及特殊振荡现象。

第5章振幅调制、振幅解调与混频电路由第一版中第四章(振幅调制与解调电路)和第五章(混频器)的内容组成。以相乘器电路为核心对原有内容重新整理,加强频谱搬移电路基本原理的分析。

第6章角度调制与解调电路,保留了第一版中内容,进行了适当的删减。

第7章锁相环路与频率合成技术,保留第一版中内容,但是删去第一版中锁相环路的跟踪特性的数学分析,并从实用性出发对锁相环路的基本工作原理及频率合成原理进行分析。另外,将第一版第四章中自动增益控制电路内容并入本章。

另外,为了便于组织课堂讨论,每节新编有复习与讨论题。每章还编有小结,同时对原有习题进行了整理和补充,以利于读者深入理解教材内容。

本书由胡宴如主编,胡宴如、章忠全和耿苏燕共同完成本版的修订工作。

本版承东南大学谢嘉奎教授仔细审阅,并提出了详细的修改意见,对提高本版质量起到了重要作用。多年来,许多兄弟院校的教师对本书提出了许多建议,在此谨向他们表示衷心的感谢,并恳请对本书继续提出批评和指正。

编者

2001年2月于南京

第一版前言

本书是以国家教育委员会组织制订的《高等学校工程专科电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》为依据,按照高等学校工程专科电子线路教材编审小组1990年12月审定的《高频电子线路》教材编写大纲进行编写,作为高等学校工程专科电子、通信类等专业的教材和相近专业的教学参考书,也可供有关工程技术人员自学和参考。

根据高等工程专科教育培养技术应用型人才的特点,本书强调以应用为目的,以生产第一线正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主,突出原理分析为应用服务,减少理论推导,加强基本概念的叙述。为了适应新技术发展的需要,本书对某些新技术的应用也做了适当的介绍。

本书以模拟通信系统为主线来连贯各功能电路,加强了全书的系统性和完整性,这样既便于读者了解和掌握各基本应用电路之间的内在联系以及在整个系统中的作用和地位,同时又使得各基本电路的讨论不是孤立的、分割的。

考虑到集成电路的迅速发展和广泛应用,本书对基本电路分析时充分考虑到集成电路的应用,对应用电路的介绍也以集成电路为主。但是,鉴于分立元件电路目前仍为集成电路技术的基础,同时一些分立元件电路目前仍然得到应用,所以本书对分立元件电路的分析仍占一定比例。力求把分立元件电路和集成电路结合起来,把集成电路的内容渗透到各章之中,这样既加强了集成电路的概念和应用,又不削弱电路的基础知识。

高频电子线路是一门工程性、实践性很强的课程,学生通过本课程的学习,不但应该掌握必要的基础理论知识,而且还应在分析问题、解决问题和实际动手等能力方面得到锻炼和提高。对于这些能力的培养,理论教学与实践性教学环节必须密切联系、互相配合,才会取得比较好的效果。本书从以下几个方面来加强这些能力的培养:

(1) 在分析问题的方法上,由常用基本电路入手,讲清基本原理,然后适当综合,再应用到实用电路的分析中去。联系实际应用时,不过多地分析具体细节,而注意引导读者如何确切地进行工程近似来分析实用电路,并进行电路性能的估算,从而掌握选择电路元器件的基本原则。

(2) 注意与实践课的配合,教材内容上要相互衔接,各有侧重,避免脱节和不必要的重复。基本原理、典型电路、基本应用电路等,主要在理论教材中介绍,而有关电路的测试、调整的原理和方法以及器件的参数选择等还必须在实践中学习和提高,故这些方面的内容应在实践课教材中叙述。

(3) 增加必要的例题和实用电路的分析。例题着重于问题的分析过程和解题方法的介绍。对电路实例的分析则力求由浅入深,引导读者运用基本概念、基本原理和基本方法来分析较复杂的问题。例题和电路实例可作为习题课和讨论课内容。

(4) 各章都附有一定数量的习题,习题的内容力求突出本课程的特点和基本要求,而且注意到与工程应用相结合。

为满足不同行业、不同专业的需要,本书按理论教学时数 80 学时(《高等学校工程专科电子线路(Ⅰ)、(Ⅱ)课程教学基本要求》规定参考学时上限为 72 学时)编写,书中编写了部分加宽加深的内容,可供选讲或自学。选讲内容在编排上加注“*”号,以示区别。

本书由胡宴如主编,第三、四章由章忠全执笔,其他各章均由胡宴如执笔。

江汉大学陆兆熊副教授担任本书的主审,对本书初稿进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵意见和修改建议;本书在编写过程中得到了高等学校工程专科电子线路教材编审小组的大力支持和帮助。在此谨致以衷心的感谢。

限于编者水平,加之时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者
1992 年 2 月

目 录

第1章 绪论	1	3.1 丙(C)类谐振功率放大器的工作原理	34
1.1 通信与通信系统	1	3.1.1 基本工作原理	34
1.1.1 通信系统的基本组成	1	3.1.2 余弦电流脉冲的分解	36
1.1.2 无线电发送与接收设备	2	3.1.3 输出功率与效率	37
1.1.3 无线电波段的划分和无线电波的传播	5	复习与讨论题	39
复习与讨论题	7	3.2 谐振功率放大器的特性分析	39
1.2 非线性电子线路的基本概念及本课程的特点	7	3.2.1 谐振功率放大器工作状态与负载特性	39
1.2.1 线性与非线性电路	7	3.2.2 V_{CC} 对放大器工作状态的影响	41
1.2.2 非线性电路的基本特点	8	3.2.3 U_{im} 和 V_{BB} 对放大器工作状态的影响	42
1.2.3 本课程的主要内容及特点	9	复习与讨论题	44
复习与讨论题	9	3.3 谐振功率放大器电路	44
本章小结	10	3.3.1 直流馈电电路	44
习 题	10	3.3.2 滤波匹配网络	46
第2章 小信号选频放大器	12	3.3.3 谐振功率放大器应用电路	50
2.1 谐振回路	12	复习与讨论题	51
2.1.1 并联谐振回路的选频特性	12	3.4 丙类倍频器与高效率功率放大器	51
2.1.2 阻抗变换电路	16	3.4.1 丙类倍频器	51
复习与讨论题	20	3.4.2 丁(D)类功率放大器	52
2.2 小信号谐振放大器	20	3.4.3 戊(E)类功率放大器	54
2.2.1 单谐振回路谐振放大器	20	复习与讨论题	54
2.2.2 多级单谐振回路谐振放大器	23	3.5 宽带高频功率放大器	54
复习与讨论题	25	3.5.1 传输线变压器	54
2.3 集中选频放大器	25	3.5.2 功率合成技术	58
2.3.1 集中选频滤波器	25	3.5.3 宽带高频功率放大器电路	61
2.3.2 集中选频放大器应用举例	27	复习与讨论题	62
复习与讨论题	28	本章小结	62
2.4 放大器的噪声	28	习 题	63
2.4.1 噪声的来源	28	第4章 正弦波振荡器	66
2.4.2 噪声系数	30	4.1 反馈振荡器的工作原理	66
复习与讨论题	31	4.1.1 反馈振荡器产生振荡的基本原理	66
本章小结	31	4.1.2 振荡的平衡条件和起振条件	67
习 题	32	复习与讨论题	70
第3章 高频功率放大器	34	4.2 LC正弦波振荡器	70

4.2.1 三点式振荡器的基本工作原理	70	5.5.2 二极管环形混频器和双差分对混频器	125
4.2.2 电感三点式振荡器	71	5.5.3 晶体管混频电路	127
4.2.3 电容三点式振荡器	72	5.5.4 混频干扰	128
4.2.4 改进型电容三点式振荡器	73	复习与讨论题	130
4.2.5 振荡器的频率稳定和振幅稳定	76	本章小结	130
复习与讨论题	78	习 题	131
4.3 石英晶体振荡器	78	第6章 角度调制与解调电路	136
4.3.1 石英谐振器及其特性	78	6.1 调角信号的基本特性	136
4.3.2 石英晶体振荡器	80	6.1.1 瞬时频率与瞬时相位概念	136
复习与讨论题	82	6.1.2 调频信号与调相信号	137
4.4 RC正弦波振荡器	82	6.1.3 调角信号的频谱和带宽	141
4.4.1 RC串并联选频网络	82	复习与讨论题	144
4.4.2 RC桥式振荡器	84	6.2 调频电路	144
复习与讨论题	85	6.2.1 概述	144
4.5 负阻正弦波振荡器	86	6.2.2 变容二极管直接调频电路	144
4.5.1 负阻器件的伏安特性	86	6.2.3 间接调频电路	148
4.5.2 负阻振荡电路	87	6.2.4 扩展最大频偏的方法	151
复习与讨论题	88	复习与讨论题	152
本章小结	88	6.3 鉴频电路	152
习 题	89	6.3.1 鉴频特性及鉴频的实现方法	152
第5章 振幅调制、解调与混频电路	93	6.3.2 斜率鉴频器	154
5.1 相乘器与频谱搬移电路	93	6.3.3 相位鉴频器	157
5.1.1 相乘器及其频率变换作用	93	6.3.4 脉冲计数式鉴频器	163
5.1.2 振幅调制基本原理	94	6.3.5 限幅器	164
5.1.3 振幅解调基本原理	100	复习与讨论题	166
5.1.4 混频基本原理	102	本章小结	167
复习与讨论题	102	习 题	168
5.2 相乘器电路	104	第7章 反馈控制电路	172
5.2.1 非线性器件的相乘作用	104	7.1 自动增益控制电路	172
5.2.2 二极管双平衡相乘器	109	7.1.1 自动增益控制电路的作用	172
5.2.3 双差分对模拟相乘器	112	7.1.2 增益控制电路	174
复习与讨论题	115	复习与讨论题	175
5.3 振幅调制电路	115	7.2 自动频率控制电路	175
5.3.1 低电平振幅调制电路	116	7.2.1 工作原理	176
5.3.2 高电平振幅调制电路	117	7.2.2 应用举例	176
复习与讨论题	119	复习与讨论题	177
5.4 振幅检波电路	119	7.3 锁相环路(PLL)	177
5.4.1 二极管包络检波电路	119	7.3.1 锁相环路基本原理	178
5.4.2 同步检波电路	122	7.3.2 锁相环路组成部件特性	179
复习与讨论题	124	7.3.3 锁相环路的捕捉与跟踪	181
5.5 混频电路	125		
5.5.1 概述	125		

7.3.4 集成锁相环路	182	习 题	196
7.3.5 锁相环路的应用	185	附录 集成接收机与发射机应用举例	199
复习与讨论题	188	一、集成调幅单片收音机	199
7.4 频率合成器	188	二、集成直接调频发射机	201
7.4.1 频率合成器的主要技术指标	188	三、集成调频接收机	204
7.4.2 锁相频率合成器	189	部分习题答案	207
7.4.3 直接数字频率合成器(DDS)	194	参考文献	210
复习与讨论题	195		
本章小结	196		

第1章

绪 论

引言 自从无线电技术问世以来,它对社会生产和人类生活产生了非常深刻的影响。随着科学技术的不断发展,无线电技术已广泛应用于国民经济、军事和日常生活各个领域,技术水平也越来越高。

无线电技术最早应用于通信,通信技术的发展和现代化,充分反映了无线电技术的发展。本书将结合通信系统来讨论用于各种无线电技术设备和系统的高频电子线路。下面先对通信系统做简要的介绍,然后讨论非线性电子线路的基本概念。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信系统的基本组成

通信的一般含义是从发送者到接收者之间信息的传输。用电信号(或光信号)传输信息的系统称为通信系统,也称电信系统。

通信系统基本组成如图 1.1.1 所示,它由输入变换器、输出变换器、发送设备、接收设备和信道等组成。

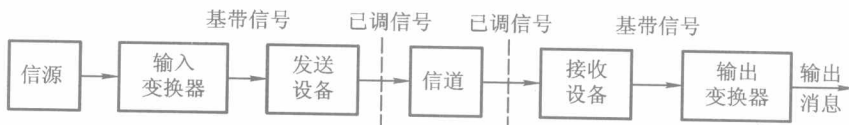


图 1.1.1 通信系统基本组成

信源就是信息的来源,它有不同形式,例如语言、音乐、文字、图像、电码等。输入变换器的作用是将信源输入的信息转换成电信号,该信号称为基带信号;不同的信源需要不同的变换器,例如话筒、摄像机、电话机等。

发送设备用来将基带信号进行某种处理并以足够的功率送入信道,以实现信号有效的传输,其中最主要的处理为调制,发送设备的输出信号为已调信号。

信道是信号传输的通道,又称传输媒介,它大体分为无线信道和有线信道两大类。无线信道包括地球表面、地下、水下、地球大气层及宇宙空间;有线信道包括架空明线、同轴电缆、光缆等。

不同的信道有不同的传输特性,相同的媒介对不同频率的信号传输特性也是不相同的。

接收设备及输出变换器和发送设备及输入变换器的作用相反。由信道传送过来的已调信号由接收设备取出并进行处理,得到与发送端相对应的基带信号(这一过程称为解调)。该基带信号经输出变换器即可复原成原来形式的信息。

通信系统的种类很多,按所用信道的不同可分为有线通信系统和无线通信系统。按传输的基带信号不同可分为模拟通信系统和数字通信系统,前者传输幅度随时间连续变化的信号,而后者传输在时间和数值上离散取值的信号。图 1.1.1 中基带信号为模拟信号时,即为模拟通信系统;基带信号为数字信号时,即为数字通信系统。

1.1.2 无线电发送与接收设备

发送和接收设备是通信系统中的核心部分,不同的通信系统,其发送和接收设备的组成不尽相同,但基本结构相似。下面以无线电广播系统为例来说明发送和接收设备的基本组成。

一、无线电广播发送设备

图 1.1.2 所示为无线电调幅广播发送设备的组成框图,图中还画出了各部分输出电压的波形。

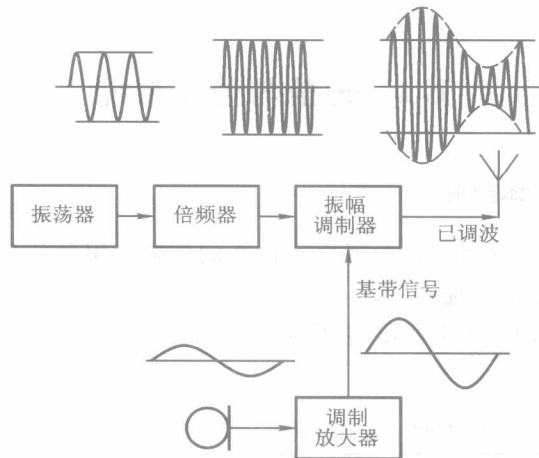


图 1.1.2 无线电调幅广播发送设备组成框图

振荡器用来产生高频信号。倍频器可将振荡器产生的高频信号频率整倍数升高到所需值,其输出即为载波频率信号。在倍频器后通常还可设置高频功率放大器,用来放大载波信号,使之有足够的功率推动末级调制器。调制放大器实际上是低频放大器,它由低频电压和功率放大级组成,用来放大话筒所产生的微弱话音信号,然后送入调制器。振幅调制器是将输入的高频载波信号和低频调制信号变换成高频已调信号,并以足够大的功率输送到天线,然后辐射到空间。

二、无线电调幅广播接收设备

无线电调幅广播接收设备的组成框图如图 1.1.3 所示。为了提高接收机的性能,目前广泛采用超外差接收方式,超外差式接收机结构的特点是具有混频器。图 1.1.3 中高频放大器用来对天线所收到的有用频率信号进行初步的选择和放大,以便抑制其他频率的无用信号。高频放

大器输出的载频为 f_c 的已调信号和本机振荡器所提供的频率为 f_L 的高频等幅信号同时输入混频器,在其输出端就可获得载频频率较低的中频已调信号,通常取中频频率 $f_1 = f_L - f_c$ 。中频放大器为中心频率固定在 f_1 上的选频放大器,它可以进一步滤除无用信号,并将有用信号放大到足够值,然后经检波器解调,可恢复出原基带信号,经低频放大后输出。为了有助于理解各组成部分的作用,在图 1.1.3 中画出了各部分输出的电压波形。

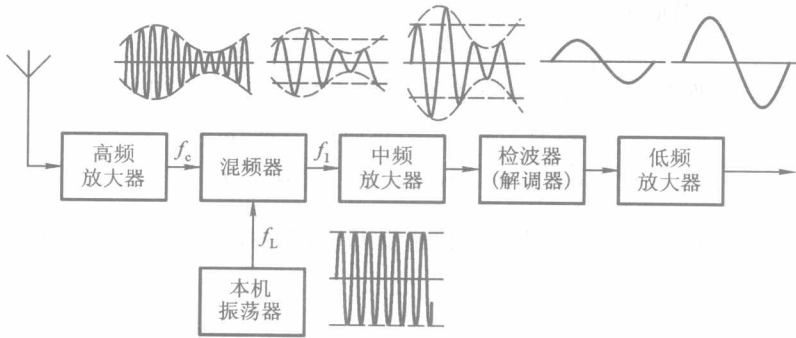


图 1.1.3 超外差式调幅接收机组成框图

由以上讨论可以看出,发送和接收设备中除了低频放大电路外,其他主要是处理高频信号的电路,它包括能对高频信号进行选频放大的高频电压和功率放大器,能产生高频信号的振荡器,能对基带信号进行变换和处理的调制器、解调器、混频器和倍频器等,这些都是本书要讨论的主要内容。其中,除高频电压放大器(含中频放大器)是线性电子线路外,其他均属于非线性电子线路。一般来说,线性电路输出信号与输入信号的波形和频率相同,只是幅度发生了变化;非线性电路输出信号与输入信号相比较,波形和频率分量都不相同。

三、调制基本原理

调制过程对通信系统至关重要,因为调制方式在很大程度上决定了系统可能达到的性能。

在无线电通信系统中,电信号是通过天线以电磁波的形式向空间辐射传输的。理论和实践证明,只有当电信号的频率很高,以致它的波长与天线的尺寸相近时(例如发射天线的尺寸至少应该是发射信号波长的 $1/10$),电信号才能有效辐射传输。一般基带信号频率很低,例如话音只有 $0.1 \sim 6$ kHz,假如是 1 kHz,则其波长为 300 km,需用 30 km 长的天线,这显然是无法实现的。采用调制就可以把低频基带信号调制在高频载波信号上,从而易于实现电信号的有效传输。同时,不同电台可以采用不同频带的高频电磁波,以避免相互之间的干扰,实现信道的复用。在频率域内实现信道的复用称为频率复用(同样,在时间域里,利用脉冲调制或编码调制可使各路信号在同一信道交错传输,这样的信道复用称为时间复用)。

用待传输的基带信号去改变高频载波信号的某一参量,就可以实现调制。如用基带信号去改变高频载波信号的振幅,则称为振幅调制,简称调幅,用符号 AM^① 表示;如用基带信号去改变高频载波信号的频率或相位,则称为频率调制(简称调频,用符号 FM^② 表示)或相位调制(简称

① AM 为振幅调制 Amplitude Modulation 的缩写。

② FM 为频率调制 Frequency Modulation 的缩写。

调相,用符号 PM^①表示)。经过调制后的高频信号带有基带信号的信息,称为已调信号。

下面以振幅调制为例,来说明调制的基本特点。

设调幅电路输出高频载波信号为

$$u_c = U_{m0} \cos(\omega_c t) \quad (1.1.1)$$

式中, $\omega_c = 2\pi f_c$, f_c 为载波频率。

若基带信号为一单频低频信号

$$u_\Omega = U_{\Omega m} \cos(\Omega t) = U_{\Omega m} \cos(2\pi F t) \quad (1.1.2)$$

将 u_Ω 输入调幅电路以改变式(1.1.1)所示高频信号的振幅,则可得到已调波信号为

$$\begin{aligned} u_o &= [U_{m0} + k_a U_{\Omega m} \cos(\Omega t)] \cos(\omega_c t) \\ &= U_{m0} [1 + m_a \cos(\Omega t)] \cos(\omega_c t) \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

式中, $m_a = \frac{k_a U_{\Omega m}}{U_{m0}}$ 称为调幅系数,它说明载波振幅受基带信号控制的程度。 k_a 为由调制电路决定的常数。

由式(1.1.3)可见,已调信号的振幅 $U_{m0} [1 + m_a \cos(\Omega t)]$ 与低频信号 u_Ω 成线性变化关系,习惯上将已调信号的振幅变化称为包络变化。图 1.1.4(a)、(b)、(c) 分别画出了基带信号、载波信号及已调信号的波形。

将式(1.1.3)用三角函数关系展开,则得

$$\begin{aligned} u_o &= U_{m0} \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} m_a U_{m0} \cos[(\omega_c + \Omega)t] + \\ &\quad \frac{1}{2} m_a U_{m0} \cos[(\omega_c - \Omega)t] \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

由式(1.1.4)可知,被单频低频信号调幅后的高频已调信号由振幅为 U_{m0} 、角频率为 ω_c 的载波和两个振幅相同、角频率分别为 $\omega_c + \Omega$ 和 $\omega_c - \Omega$ 的高频波组成,其频谱图如图 1.1.5 所示。 $f_c + F$ 和 $f_c - F$ 对称地排列在载频 f_c 的两侧,将 $f_c + F$ 称为上边频, $f_c - F$ 称为下边频。可见,振幅调制也可以看成是频率的搬移,即将低频信号 F 搬移到载波频率 f_c 的两边。

若基带信号为一多频的低频信号,则其每个频率分量都对载频调幅而产生两个对应的边频分量,如图 1.1.6 所示。由图可见,调制后调制信号的频谱被线性地搬移到载频的两边,成为调幅波的上、下两个边带,故已调波信号在载波频率 f_c 附近占据一定的频带。设基带信号的最高频率为 F_{\max} ,则已调信号的频带宽度为

$$BW = 2F_{\max} \quad (1.1.5)$$

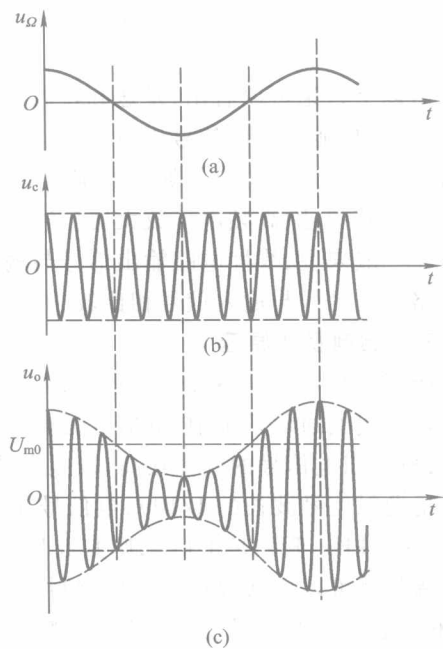


图 1.1.4 振幅调制波形
(a) 基带信号波形 (b) 载波信号波形
(c) 已调信号波形

① PM 为相位调制 Phase Modulation 的缩写。

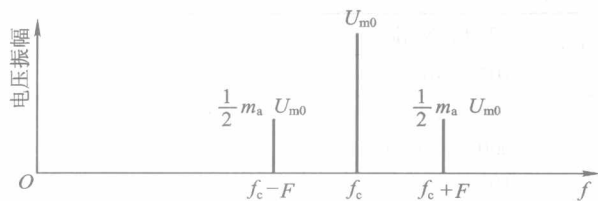


图 1.1.5 调幅波频谱

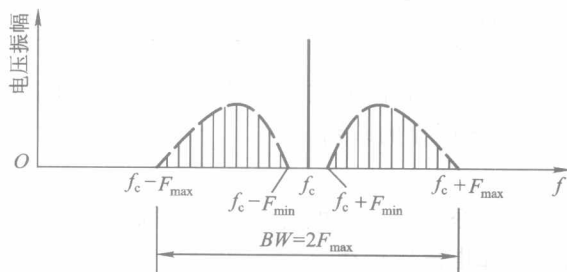


图 1.1.6 多频调幅的已调信号频谱分布

这就是说,为使发送和接收设备不失真地传输该已调信号,其高频电子线路的频带宽度应大于 $2F_{max}$ 。

对于其他各种调制,已调信号同样也要占据一定的频带宽度,这是关于信号和调制的一个基本概念。

1.1.3 无线电波段的划分和无线电波的传播

一、无线电波段的划分

目前无线电通信系统使用的频率范围从几十千赫到几十吉赫,这样宽广范围的高频信号,在信号的产生、放大、发送和接收方法等方面就大不一样,特别是不同频率的无线电波的传播特点更不相同。为了便于分析和应用,习惯上将无线电的频率范围划分为若干个区域,称为频段,也称波段。

无线电波在空间传播的速度与光速相同,为 $c = 3 \times 10^8$ m/s,高频信号的频率 f (Hz) 与其波长 λ (m) 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1.6)$$

无线电波段可以按频率划分,也可以按波长划分。表 1.1.1 中列出了按波长划分的波段名称、相应的波长范围及相应的频段名称。