



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

高频电子线路

主编 王康年
主审 王 荣



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

高频电子线路

主 编 王康年

副主编 李卫东 蔡凯

参 编 康小平 张洪德

主 审 王荣

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书以无线通信系统中的电子线路为主要内容,介绍高频电子线路的基本原理、分析方法和典型应用。

全书内容共分8章,包括绪论,小信号谐振放大器及电子噪声,高频功率放大器,正弦波振荡器,振幅调制、解调与变频,角度调制与解调,反馈控制电路以及无线电通信设备的组成与分析。本书及时吸纳了通信电子领域内的新技术和新成果,单元功能电路均配有集成电路原理和应用的介绍;考虑到电子电路计算机辅助设计技术的迅速发展,本书尝试将 Multisim 仿真软件与高频电子线路理论教学相结合,对重点教学内容进行仿真举例,并配有相关的仿真练习。

本书是高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材,与本书配套的实验教材《高频电子线路实验》同期出版,可作为高等学校电子工程、通信工程等专业的教材,也可供相关专业技术人员参考。

★ 本书备有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/王康年主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.3

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2206-4

I. 高… II. 王… 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(2009)第 016786 号

策 划 曹 旻

责任编辑 段 蕾 曹 旻

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 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 19.5

字 数 456千字

印 数 1~4000册

定 价 28.00元

ISBN 978-7-5606-2206-4/TN·0490

XDUP 2498001-1

*** 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。

西安电子科技大学出版社
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材
编审专家委员会名单

主任: 杨 震 (南京邮电大学校长、教授)

副主任: 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

通信工程组

组 长: 张德民 (兼)

成 员: (成员按姓氏笔画排列)

王 晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜 兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康 健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

电子信息工程组

组 长: 秦会斌 (兼)

成 员: (成员按姓氏笔画排列)

王 荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴 谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张 彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周 杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷 加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

项目策划: 毛红兵

策 划: 曹 映 寇向宏 杨 英 郭 景

前 言

本书是高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材。全书是按照国家教委电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委会对高频电子线路课程的基本要求编写的。

本书是在作者以前出版的《电子线路》一书的基础上重新编写的。全书在确保教材系统性的基础上,及时吸纳了近年来通信电子领域内的新技术和新成果,增加了专用集成电路应用,DDS 频率合成技术,模拟和数字无线电收、发信机的结构以及软件无线电的介绍。

本书的参考学时为 60 学时左右,教师也可根据需要灵活安排时间。全书内容共 8 章,以无线通信系统中的电子线路为主要内容,侧重于通信系统基本电路的组成、基本原理、基本分析方法和典型应用等内容的介绍。全书内容可分为四大部分:第一部分为第 2~4 章,介绍高频信号的产生和放大,包括正弦波振荡器、小信号谐振放大器和高频功率放大器;第二部分为第 5、6 章,介绍信号的变换,包括各种制式的调制、解调器和变频器;第三部分为第 7 章,介绍反馈控制电路,包括 AGC、AFC、PLL 和频率合成技术;第四部分为第 1、8 章,介绍无线电通信机的整机概念和其它技术。各章均有思考和练习题。考虑到电子电路计算机辅助设计技术的迅速发展,本书尝试将 Multisim 仿真软件与高频电子线路理论教学相结合,对每章的重点教学内容进行仿真举例,并配有仿真习题。与本书配套的实验教材《高频电子线路实验》同期出版。

本书第 1、2、3 章由蔡凯编写,第 4、5、6 章由李卫东编写,第 7、8 章由王康年、张洪德、康小平编写。全书由王康年负责统稿。

由于时间仓促和编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月



第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统概述	1
1.2 电子线路的分类	2
1.3 非线性电子线路的特点及分析方法	4
1.4 高频电子线路在无线电通信中的应用	4
1.4.1 发射设备的工作过程及基本原理	5
1.4.2 接收设备的工作过程及基本原理	6
1.5 无线电波的传播与波段的划分	7
本章小结	10
思考与练习题	11
第 2 章 小信号谐振放大器及电子噪声	12
2.1 小信号谐振放大器概述	12
2.2 LC 谐振回路	13
2.2.1 串、并联谐振回路的基本特性	13
2.2.2 阻抗的串、并联变换	16
2.2.3 回路的部分接入与阻抗变换	18
2.2.4 通信电路中的其它滤波器	20
2.3 晶体管高频等效电路	25
2.3.1 晶体管混合 π 参数等效电路	25
2.3.2 晶体管 Y 参数等效电路	27
2.3.3 混合 π 参数与 Y 参数的关系	28
2.4 晶体管谐振放大器	29
2.4.1 单调谐共射极调谐放大器的工作原理和等效电路	29
2.4.2 共射单调谐回路放大器的主要性能指标	31
2.4.3 多级放大器级联	34
2.5 宽频带放大器	35
2.5.1 宽频带放大器的特点	35
2.5.2 宽频带放大器的电路	36
2.6 集中选频放大器与集成放大器	37
2.6.1 集中选频放大器的组成与特点	37
2.6.2 集成高频小信号放大器	38
2.7 小信号谐振放大器的稳定性	39
2.7.1 晶体管内部反馈的有害影响	39
2.7.2 克服内部反馈的方法	42
2.8 电子噪声及噪声度量	45
2.8.1 电子噪声	45

2.8.2 噪声度量	47
2.8.3 接收机的最高灵敏度及减小噪声系数的方法	52
2.9 小信号谐振放大器的仿真举例	53
本章小结	55
思考与练习题	56
第3章 高频功率放大器	58
3.1 高频功率放大器概述	58
3.2 丙类高频功率放大器的工作原理	59
3.2.1 电路组成及工作原理	59
3.2.2 晶体管特性的折线化	61
3.2.3 晶体管导通的特点和导通角	62
3.2.4 集电极余弦脉冲电流分析	63
3.2.5 谐振回路电压	64
3.2.6 集电极功率和效率	65
3.3 谐振功率放大器的工作状态分析	65
3.3.1 谐振功率放大器的动态特性	66
3.3.2 $U_{fm}(R_c)$ 、 E_c 、 E_b 、 U_{bm} 的变化对放大器工作状态的影响	67
3.3.3 谐振功率放大器的调谐特性	71
3.4 谐振功率放大器的实际电路	72
3.4.1 直流馈电电路	72
3.4.2 偏置电路	73
3.4.3 输入输出匹配电路	74
3.4.4 丙类高频谐振功率放大器的应用	78
3.5 丁类高频功率放大器	78
3.5.1 丁类(D类)高频功率放大器的设计思想和分类	79
3.5.2 电流型丁类高频功率放大器	79
3.5.3 电压型丁类高频功率放大器	81
3.6 传输线变压器和宽频带高频功率放大器	82
3.6.1 传输线变压器	82
3.6.2 宽频带高频功率放大器	84
3.7 功率合成器	85
3.7.1 形成功率合成与分配网络的条件	85
3.7.2 功率合成与分配网络的原理	85
3.7.3 功率合成电路	86
3.8 集成高频功率放大器	88
3.9 高频功率放大器仿真实验举例	89
本章小结	91
思考与练习题	94
第4章 正弦波振荡器	96
4.1 正弦波振荡器概述	96
4.2 反馈型正弦波振荡器的基本原理	97
4.2.1 从反馈放大器到反馈振荡器的演变	97
4.2.2 振荡器的平衡条件	98

4.2.3 振荡的建立和起振条件	99
4.2.4 振荡器的稳定条件	101
4.3 LC 正弦波振荡器	104
4.3.1 三端式 LC 振荡器	104
4.3.2 变压器耦合振荡器	110
4.3.3 集成振荡器	111
4.4 振荡器的频率稳定	113
4.4.1 振荡器的频率稳定度	113
4.4.2 造成频率不稳定的原因	114
4.4.3 振荡器的稳频措施	115
4.5 晶体振荡器	116
4.5.1 石英谐振器的特性	116
4.5.2 石英晶体振荡器电路	118
4.6 振荡器仿真实验举例	121
本章小结	123
思考与练习题	123
第 5 章 振幅调制、解调与变频	126
5.1 调制、解调与变频概述	126
5.2 非线性电路的分析方法	127
5.2.1 幂级数分析法	127
5.2.2 线性时变分析法	128
5.2.3 开关函数分析法	129
5.2.4 折线近似分析法	129
5.3 振幅调制	130
5.3.1 调幅信号分析	130
5.3.2 调幅波的产生电路	135
5.4 振幅解调	145
5.4.1 大信号包络检波	146
5.4.2 同步检波	151
5.5 变频器	156
5.5.1 变频器的作用	156
5.5.2 变频器的组成及性能要求	157
5.5.3 晶体三极管变频器	159
5.5.4 用模拟乘法器构成的混频电路	162
5.5.5 变频干扰及其抑制方法	163
5.6 振幅调制与解调仿真举例	166
本章小结	168
思考与练习题	168
第 6 章 角度调制与解调	173
6.1 概述	173
6.2 调角波的信号分析	175
6.2.1 调频及其数学表达式	175
6.2.2 调相及其数学表达式	177

6.2.3	调频与调相的关系	178
6.2.4	调角波的频谱与有效频带宽度	179
6.2.5	调角波的功率	182
6.3	调频信号的产生	183
6.3.1	调频电路概述	183
6.3.2	调频电路	185
6.3.3	调相和间接调频电路	190
6.3.4	集成压控频率调制器	193
6.3.5	调频信号产生举例	194
6.4	调频信号的解调	195
6.4.1	调频波解调概述	195
6.4.2	斜率鉴频电路	198
6.4.3	相位鉴频电路	200
6.4.4	消除寄生调幅的方法	206
6.5	仿真实验举例	207
	本章小结	209
	思考与练习题	209
第7章	反馈控制电路	213
7.1	自动电平控制(AVC)	213
7.1.1	AVC的基本工作原理	213
7.1.2	AVC电路在接收机中的应用	214
7.1.3	AVC在发射机中的应用	216
7.2	自动频率控制电路(AFC)	217
7.2.1	AFC的基本工作原理	217
7.2.2	AFC的应用	219
7.3	锁相环路(PLL)	220
7.3.1	锁相环的基本组成	220
7.3.2	环路的相位模型和基本方程	225
7.3.3	锁相环的捕捉	226
7.3.4	跟踪特性	229
7.3.5	集成锁相环	233
7.3.6	锁相环的应用	235
7.3.7	频率合成技术简介	241
7.4	锁相环电路的仿真举例	256
	本章小结	258
	思考与练习题	259
第8章	无线电通信设备的组成与分析	262
8.1	无线电通信设备的主要技术指标	262
8.1.1	发射机的主要技术指标	262
8.1.2	接收机的主要技术指标	264
8.2	无线电通信设备的组成	266
8.2.1	无线电发射机的组成	266
8.2.2	无线电接收机的组成	270

8.3 无线电通信设备中的其它问题	276
8.3.1 静噪电路	276
8.3.2 加重技术	278
8.3.3 中频数值的选择	278
8.3.4 现代无线电的调谐技术	279
8.4 无线通信系统实例	282
8.4.1 无绳电话系统	282
8.4.2 数字调谐收音机	284
8.4.3 GSM 移动通信系统	287
8.5 软件无线电简介	290
8.5.1 软件无线电的概念	290
8.5.2 软件无线电系统的基本结构	291
8.5.3 软件无线电的关键技术	291
8.5.4 基于数字化中频的软件无线电	293
8.6 EWB 仿真软件介绍	294
本章小结	298
思考与练习题	298
参考文献	300

第1章 绪 论

通信是指将信息由一地传向另一地。现代通信的主要任务就是快速而准确地传输、交换和处理信息。随着通信技术的日益发展及电子器件的不断更新,实现通信的方式和手段越来越多,相对应的通信形式有有线通信、无线通信、微波通信、卫星通信等等。本书讨论的高频电子线路主要应用于无线通信系统。

1.1 通信系统概述

现代通信通常是利用电信号来完成信息的传递过程的,所以我们通常谈论的通信实际上是指电通信。通信中所传递的信息有各种不同的形式,例如符号、文字、语音、图片、图像、数据等,相应地,也就产生了各种类型的通信业务,比如电报、电话、传真、数据传输、可视电话等。

根据电信号传输媒质的不同,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信是指通过电线、电缆线、光缆线等有线媒质来传递信息,例如电话、有线电视、光纤通信均属有线通信。无线通信是指电信号利用电磁波的传播来完成信息的传输,例如无线广播、移动通信、卫星通信均属无线通信。

无论哪一种通信系统,均可用图1-1所示的通信系统的模型(组成框图)来反映通信系统的共性。当然,根据所研究的对象和问题的不同,可以得到更为具体的系统模型。高频电子线路主要研究无线通信系统中发射设备和接收设备的工作原理和组成,着重讨论构成发射、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型线路和分析方法。

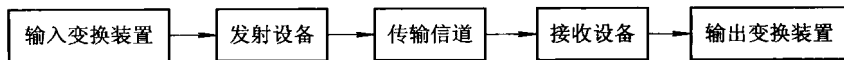


图1-1 通信系统的组成框图

输入变换装置通常用于将信源的输出变换成适合传输的电信号,如话筒可以将语音信号变换成电信号,摄像机可以将图像信号变换成电信号。输出变换装置的作用则是将接收到的电信号变换成适合用户接收的形式,如声音、图像等。

通信系统的核心由三部分组成,即发射设备、传输信道和接收设备。这三部分的主要功能简述如下。

1. 发射设备

发射设备能够将电信号变换成适合信道传输的形式。比如,在无线电广播中,规定了

各发射台的频率范围,发射设备把输入变换装置输出的电信号转换到适当的频率范围进行发射,这样各发射台发送的信号就不会相互干扰。发射设备一般采用调制方式实现这样的信号变换。所谓调制,是指用信息信号去改变载波信号的参数(如振幅、频率、相位),使其随信息信号变化。在调幅发射设备中,就是用信息改变载波信号的振幅,使发送的信息信号包含在载波的振幅变化之中;在调频发射机中,发送的信息包含在载波的频率变化之中。调制的类型很多,究竟采用何种调制方式,要结合所分配的带宽、信号在信道中传播时遭遇到的噪声和干扰类型,以及在发送之前进行信号放大所能采用的电子器件等来综合考虑。另外,调制还使得多个用户的信息可以在同一物理信道上同时发送,例如可利用载波频率的不同来区分用户。

发射设备除了完成调制功能外,还应具备信号滤波、已调信号放大、信号辐射等功能。

2. 传输信道

传输信道是一种用于将来自发射机的信号传输到接收机的物理介质。在无线传输中,信道通常是自由空间;在有线传输中,信道可以采用多种物理介质,包括电线、电缆和光缆等。无论哪种物理介质,其基本特征是所传送的信号会被各种可能因素损伤,引起信号质量变差,如受到产生于接收机前端放大器的热噪声、接收天线接收的人为噪声、大气噪声等加性噪声的影响,再比如,在用于长距离短波无线传输的电离层无线信道上,存在会引起信号恶化的多径传播,这是一种非加性信号干扰,会使信号的振幅随时间的变化而变化,通常称之为衰落。

3. 接收设备

接收设备的功能是将信道传输的信号进行处理,恢复接收信号中包含的信息。如果信号通过载波调制发送,那么接收机必须通过解调从载波中提取信息。在信道传输和恢复信息的过程中会产生一定的干扰和失真,因此,接收设备恢复的信号也会有一定的失真。除了完成信号解调这一主要功能外,接收机还要完成信号的滤波、放大、噪声抑制等其它一系列功能。

本书所描述的通信系统,都基于信息信号具有连续的时变波形。这种连续时间信号波形是模拟信号。模拟信号通过载波调制直接在信道上发送,然后在接收端进行相应的解调,这样的通信系统称为模拟通信系统。

当然,模拟信号还可以先转换成数字信号,再通过数字调制后发送,最后在接收端解调成数字信号。在某些应用中,发送的信息本身就是数字的,如计算机数据。这种传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。在数字通信系统中,发射设备和接收设备还具有以下功能:发射信号的离散化、接收信号的合成、信道的编码与译码、冗余度的消除等。限于篇幅,数字通信系统的工作原理等将不在本书中叙述。

1.2 电子线路的分类

通信系统的基本部件是由电子线路构成的。通常将包含有源器件的电路网络统称为电子线路。电子线路的分类方法很多,按工作频率的高低可分为低频电子线路、高频电子线路

路和微波电子线路；按传输的信号形式可分为模拟电子线路和数字电子线路；按器件的构成可分为分立元件电路和集成电路；按电子线路中所含元件的性质可分为线性电子线路和非线性电子线路。

低频通常指频率低于 300 kHz 的范围，所有在这个频率范围内的电信号的产生、放大、变换和处理都属于低频电子线路的范畴。

高频通常指频率在 300 kHz~300 MHz 的范围，广播、电视、短波通信、移动通信等无线电设备都工作在这个频率范围。所有在这个范围的电信号的产生、放大、变换和处理都属于高频电子线路的范畴。

微波泛指频率高于 300 MHz 的范围，卫星通信、微波中继通信、雷达、导航等设备都工作在这个频率范围。在这个频率范围内电信号的产生、变换和处理都属于微波电子线路的范畴。

需要指出的是，工作频率不同，对有源器件的电性能、电子线路的工艺结构的要求都不尽相同。随着工作频率的提高，对有源器件上限频率的要求也随之提高，必须要考虑器件分布参量(如晶体管的极间电容、电极的引线电感、载流子的扩散漂移时间等)的影响。电子线路由集总参数电路变成了分布参数电路，需要考虑各级间的隔离、屏蔽，电源的馈送等因素。

线路中传输的信号可能是模拟信号，也可能是数字信号。一般将完成模拟信号的产生、放大、变换等技术处理的电子线路称为模拟电子线路，而将完成数字信号的运算、存储等技术处理的电子线路称为数字电子线路。在无线电技术的各个领域，要根据不同的用途和要求选取不同的电路。例如射频放大一般都采用模拟电路，而完成计数、存储等功能则采用数字电路。

随着微电子技术的发展，集成电路技术日趋成熟，已成为未来电子线路发展的方向之一。与分立元件电路相比，集成电路具有体积小、性能稳定、可靠性高、维修使用方便等优点。不过，由于频率响应和功率容量的限制，目前高频、大功率电子线路还是以分立元件电路为主。近年来，专用集成电路的发展非常迅速，如单片集成立体声收音机、两片集成电路结构的彩色电视接收机等。用于通信、雷达的专用集成电路芯片也已大量投入市场，新的产品正在不断地出现。

通常将由线性元件组成的电子线路称为线性电子线路，而将含有非线性元件的电子线路称为非线性电子线路。线性电路一般采用线性代数方程、线性微分方程来描述，而非线性电路则用非线性代数方程、非线性微分方程来描述。需要强调的是，通信系统中的电子线路通常是以半导体器件为核心的，半导体器件本质上是非线性器件，但在实际应用中，根据工作状态的不同，有时是作为非线性器件，而有时又可近似为线性器件，这要视具体场合而定。

本书所研究的电子线路属于高频模拟电子线路，频率在 300 kHz~300 MHz 范围，它主要由线性电路和非线性电路两大部分组成。

对于线性电路，通常采用小信号等效电路分析法，与低频线路的区别仅是采用的参数不同。非线性电路是高频电路的重要组成部分，也是分析的难点所在，在通信技术领域应用非常广泛。因此，在分析高频电子线路之前，有必要对非线性电子线路的特点及分析方法有一个初步的认识。

1.3 非线性电子线路的特点及分析方法

非线性电子线路与线性电路相比,具有以下几方面的特点:

(1) 非线性电子线路不具有叠加性,不能用叠加原理进行分析。例如某非线性电路的输出变量 y 与输入变量 x 之间的关系为平方律关系: $y=ax^2$ 。当输入变量为 x_1 时,输出变量为 $y_1=ax_1^2$;当输入变量为 x_2 时,输出变量为 $y_2=ax_2^2$;当输入变量为 $k_1x_1+k_2x_2$ 时,输出变量为 $a(k_1x_1+k_2x_2)^2$,而不是 $k_1y_1+k_2y_2$,即叠加原理不适用。

(2) 在稳定状态下,非线性电子线路输出变量中包含有输入变量中不具有的频率分量,即信号通过非线性电路后可以产生出新的频率成分。仍以平方律关系为例,当 $x=\sin\omega_1t$ 时, $y=a(\sin\omega_1t)^2=\frac{a}{2}-\frac{a}{2}\cos2\omega_1t$ 。可见,输入信号中仅有 ω_1 频率分量,而输出信号中包含有直流和 $2\omega_1$ 频率分量,这些新的频率分量都是通过非线性电路产生的。再如,当 $x=\sin\omega_1t+\sin\omega_2t$ 时,

$$y = a - \frac{a}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{a}{2} \cos 2\omega_2 t + a \cos(\omega_1 - \omega_2)t - a \cos(\omega_1 + \omega_2)t$$

可见,输入信号中包含 ω_1 和 ω_2 频率分量,而输出信号中包含直流、 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 和 $\omega_1 \pm \omega_2$ 的组合频率分量。

(3) 处于非线性状态工作的有源器件,如晶体三极管、场效应管等,它们的输出响应与器件工作点的选取和输入信号的大小有关。

(4) 描述非线性器件的特性可用三种参量:静态参量(也称为直流参量)、动态参量(也称为交流参量)、折合参量(也称为平均参量)。用这三种参量综合起来描述一个非线性器件的工作状态。如晶体三极管在非线性状态下工作,它的跨导要用直流跨导、交流跨导和平均跨导三个参量来表述。

直流跨导:静态工作点的电流与电压之比,即

$$g_0 = \frac{I_{CQ}}{U_{BEQ}}$$

交流跨导:静态工作点处的电流增量与电压增量之比,即

$$g_m = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{be}}$$

平均跨导:集电极电流的某个谐波分量的幅值与输入电压幅值之比,即

$$g_{cn} = \frac{I_{cn}}{U_{im}}$$

(5) 非线性电子电路的数学描述是非线性方程。非线性微分方程的精确求解是一个难题,二阶以上的非线性微分方程还没有实用的求解方法,在工程上采用近似解法。随着计算机技术的发展,二阶以下的非线性微分方程可以采用计算机数值解法。

1.4 高频电子线路在无线电通信中的应用

应该说高频电子线路的应用非常广泛,尤其在通信方面,信号的传输与处理都离不开

高频电子线路。本书围绕高频电子线路在无线电通信方面的应用展开讨论,着重介绍构成发送设备、接收设备的各个单元电路的工作原理、分析方法及原理电路。

1.4.1 发射设备的工作过程及基本原理

1. 声音信号的传输过程

信息的表现形式多种多样,可以是符号、文字、语音、图片、图像、数据等等。这里我们仅以声音信号的传输过程为例,来介绍发射设备的工作过程和原理。

人耳能听到的声音的频率约在 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$ 左右,通常把这一频率范围称为音频。这种声波的频率较低,波长较长,在空气中传播的速度很慢,衰减很快,所以声音在空气中的传输距离非常有限。如何使声音传输得更远呢?首先需要把声音信号转换为电信号,常用的转换装置就是麦克风,从麦克风得到的电信号通常强度很小,只有几毫伏到零点几伏,需要经过音频放大器放大。经过音频放大器放大后的信号可以利用导线传输,这就是有线广播。但如何实现音频信号的无线传输呢?我们把音频放大器输出的电信号加到天线上,能否实现无线传输呢?根据电磁辐射理论,只有当天线的尺寸和电信号的波长能够相比拟时,才能有效地辐射。声音信号的频率为 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$,则波长为 $15\times 10^3\sim 15\times 10^6\text{ m}$,这样大尺寸的天线无法制造。即使存在这样的天线,可以把音频信号辐射出去,但各个电台发出的信号频率都是 $20\text{ Hz}\sim 20\text{ kHz}$,在空间中将相互混合,使收听者无法正常接收信号。解决问题的方法是将音频信号调制后再发射,即用要传送的音频信号去控制一个高频信号的参数,使其参数随音频信号的变化而变化,由于高频信号的频率很高,这样天线尺寸就可以减小。另外,对于不同的广播电台,可以采用不同的高频频率调制,这样彼此互不干扰。例如中央电视台新闻联播的载波频率为 640 kHz ,重庆经济广播电台的载波频率为 101.5 MHz 。用于调制的高频信号称为载波信号。

从上面的描述可知,声音利用无线电波传输出去,首先把声音变成音频电信号,然后将这种低频信号装载在高频载波中,通过与高频载波波长相当的天线把信号有效地辐射到空间中去。

2. 发射设备的组成

发射设备的组成框图如图 1-2 所示。图 1-2 中振荡器的作用是产生高频的振荡信号,即载波信号,其频率为载波频率,一般我们收听广播时所说的频率就指的是载波频率。

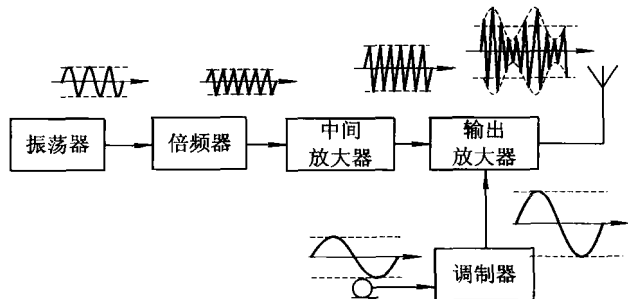


图 1-2 发射设备的组成框图

振荡器产生的振荡信号往往还不能直接用做载波。要使振荡器的频率稳定度高,振荡器的频率就不能太高(这一点我们将在后面的章节中论述),所以在振荡器之后,还需要使用倍频器,把载波频率提高到所需要的数值上。

中间放大器对倍频器输出的信号进行放大,提供给输出放大器足够的激励。输出信号的频率与输入信号的频率相同。

调制器实际是音频放大器,对音频信号进行放大,以便在进行调制时有合适的调制信号幅度,使调制后的已调信号有合适的调制深度。

输出放大器有两个作用:一是对载波进行幅度调制,得到经过调幅后的已调信号,调幅是在输出级进行的;二是对经过调幅后的已调信号进行功率放大,保证输出信号有足够大的功率。输出信号馈送到天线,由天线进行辐射。输出信号的功率大小决定了信号传输距离的远近。

由图 1-2 中所示的调幅发射机各点的波形可见,已调信号的幅度按照调制信号的变化规律变化,即经过调制后把调制信号(音频信号)加载在载波的幅度上。这种调制方式就称为调幅。

以上描述的是调幅发射设备的组成框图。调制的方式很多,不同的调制方式,发射设备的组成框图也有所区别,比如调频发射设备的组成,这方面的内容我们将在后面的章节中介绍。

1.4.2 接收设备的工作过程及基本原理

接收设备的工作过程是发射设备工作过程的逆过程,它的基本任务是将接收天线上感应的已调信号接收下来,并将其还原为原来的信号,例如还原为原来的音频信号。

接收空间中的电磁波的任务由接收天线来完成。空间中有很多发射台发送的信号,接收设备需要从众多的信号中选择所要接收的信号,因此在接收天线之后,应该有滤波电路。滤波电路的作用是把所需的电信号从众多的信号中选择出来,同时把不需要的信号滤除掉,以免产生干扰。滤波电路的输出信号还不能直接加到耳机这样的终端设备上,因为滤波电路的输出信号是一个已调信号,载波频率较高,还必须先把它恢复成原来的音频信号。这种从调幅波中还原出原来的音频信号的部件叫做解调器。对调幅信号的解调,叫做检波;对调频信号的解调,叫做鉴频;对调相信号的解调,叫做鉴相。在以后的章节中,我们将较为详细地对检波器、鉴频器、鉴相器进行讨论和分析。

现代接收设备广泛采用超外差方案。超外差式调幅接收机的组成框图如图 1-3 所示。

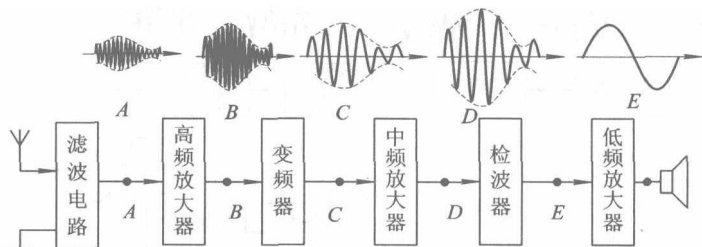


图 1-3 超外差式调幅接收机的组成框图

超外差式调幅接收机的主要特点是：把高频已调信号的载波频率变为较低的固定不变的中频已调信号，利用中频放大器进行放大，然后进行检波。高频放大器的放大倍数并不大，由一级高频放大器即可完成，接收机整机的增益主要由中频放大器决定。当接收机改变接收频率时，只需改变滤波电路、高频放大器、变频器的谐振频率，保持固定的中频频率，这样使中频放大器的选择性与增益和接收的载波频率无关，从而提高整机的灵敏度。

得到固定的中频频率的任务由变频器来完成。后面的章节中我们将会讲到，变频器由混频器和本地振荡器构成。本地振荡器产生的振荡信号，通常叫做外差信号。当接收机欲接收的高频信号的载波频率发生变化时，本地振荡器的振荡频率同样发生变化，使两者的差频(中频)频率固定不变。由于变频后的载波频率是固定的，因此中频放大器的谐振回路不需要随时调整，无论信号频率怎么变化，中频总是不变的，选择性也容易做得更好，这是超外差式调幅接收机的主要优点。

以上我们简要地介绍了无线电发射设备和接收设备的组成框图，分析了发射和接收的基本过程及原理。虽然是基于模拟信号中的语音信号进行分析的，但它具有代表意义。考虑到数字通信系统的组成框图与模拟通信系统的大体相同，这里不再赘述。

1.5 无线电波的传播与波段的划分

无线电波从发送端经过无线信道传输到达接收端。无线电波的传播方式主要有三种，即地面波传播、天波传播和空间波传播，下面分别进行简单介绍。

1. 地面波传播

地面波传播是指电波沿地球表面的传播，也称为绕射或表面波传播。虽然地球的表面是弯曲的，但电磁波具有绕射的特点，其传播距离与大地损耗有密切的关系，工作频率愈高，衰减就愈大，传播的距离就愈短。所以利用绕射方式传播时，采用长、中波比较合适，由于地面的电性能在较短时间内的变化不大，因此电磁波沿地面的传播比较稳定。

2. 天波传播

天波传播是利用电离层的反射而进行的传播。在太阳的照射下，大气层上部的气体将发生电离，产生自由电子和离子，被电离了的这部分大气层称为电离层。由于太阳辐射强度、大气层密度及大气成分在空间的分布不均匀，因此整个电离层形成层状结构。

在距离地面高度约 100 km 的高空，有厚约 20 km 的电离层，称为 E 层；在距离地面高约 200~400 km 处，有电离层 F 层。一般中波在夜间可经 E 层反射而传播，短波则经 F 层反射而传播，而由于超短波频率过高，电离层的离子、电子密度又不够大，故超短波都穿透电离层传播到宇宙空间而不能被反射回地面。

例如，对于频率为 2~30 MHz 的电磁波，由于频率较高，用地面波传播时衰减很快，因此它主要靠天空中的电离层的反射传播。电磁波到达电离层后，一部分能量被吸收，一部分能量被反射回地面，故它同样存在衰减的问题。另外，经过电离层反射后到达接收端的信号，可能是由不同的路径到达的，所以还存在多径传播的问题。

3. 空间波传播

空间波传播是指电磁波由发射天线直接辐射至接收天线，也称为直射。由于经地面及