



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与电气信息类基础课程

高频电子线路

(第三版)

高吉祥 主编 高广珠 副主编
唐朝京 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与电气信息类基础课程

高频电子线路

(第三版)

高吉祥 主编

高广珠 副主编

孟涛 黄智伟 陈和 王帅 王宽仁 编著

唐朝京 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是为高等学校电子类和其他相近专业而编著的教材。本书共分为十一章。主要介绍了简单谐振回路及各种滤波器,高频小信号放大器,噪声与干扰,高频功率放大器和功率合成技术,各类正弦振荡器,频谱变换电路,数字调制及解调电路,反馈控制电路,频率合成技术,无线电接收与发射设备,单片射频收发芯片的原理及应用。

根据教育部教学大纲的要求、多年来教学实践的体会及各类大学生电子设计制作的需要,本书不仅包括先行者编著的高频电子线路教科书的基本知识和理论,而且还增加了目前应用比较广泛的功率合成技术、频率合成技术、模拟和数字接收与发射设备的原理及应用。

本书可作为本科生和研究生教材,同时也可作为从事电子工程的工程师和参加各类电子制作竞赛的人员提供有益的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 高吉祥主编. —3 版. —北京:电子工业出版社,2011.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 电子信息科学与电气信息类基础课程

ISBN 978-7-121-14088-4

I. ①高… II. ①高… 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 136850 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:26.25 字数:722 千字

印 次:2011 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第三版前言

《高频电子线路》一书自出版以来,使用近十个年头,现已被许多院校采用作为主教材,深得广大读者的喜爱,并反馈了许多宝贵意见。在初版、二版的基础上,再次进行修订,使本书更加适合当前电子技术课程教学的需要。

近几年来,我国的电子技术和电子工业得到飞速发展,新技术、新工艺和新器件日新月异。特别是移动通信、广播、电视、无线电防范报警、射频识别(RFID)、无线电遥控遥测、雷达及电子对抗等技术的飞速发展,对人才的培养提出了更高的要求。本书除了继承先行者所编著的《高频电子线路》的基本内容——三器(高频放大器、振荡器及调制/解调器)外,还增加了三技(频率合成技术、功率合成技术、带宽技术)和两机(发射机与接收机)等内容。最后通过调频发射机和接收机设计实例,概括总结了全书的内容。

修订后的教材具有以下鲜明的特色:

1. 基础部分与发挥、拓宽部分相结合,以基础部分为主。本书前八章是基础部分,后三章为拓宽、发挥部分。其基础部分是经过先行者几代人的努力写出来的,非常经典,很难突破。关键在拓宽、发挥部分,它可以随时代的发展和科技的进步随时进行完善与修订,使之紧跟时代的步伐。

2. 模数结合,以模为主。高频电子线路按习惯分类,应属于模电类,但随着数字技术、计算机技术的发展,当代的高频电子技术已经离不开数字技术。在本书的第6章中,介绍了模拟信号的调制与调解技术;在第7章中,相应地介绍了数字信号的调制与调解技术;在第9章中,介绍以PLL为基础的模拟频率合成技术,同时也介绍了直接数字频率合成(DDS)技术。

3. 分立元件与大、中、小规模集成电路相结合,以分立元件、中小规模集成电路为主。基础部分采用的是分立元件、中小规模集成电路,便于讲清电路的基本原理。拓宽、发挥部分基本采用的是大规模集成电路。例如AD603程控带宽放大器,AD98XX直接数字频率合成器(DDS),MC145152大规模PLL芯片,CXA1019、CXA1238大规模单片集成接收芯片,NRF401/403、TR3001、TRF900单片收发芯片等。使拓宽、发挥部分跟上时代前进的步伐。

4. 中国大学生电子设计竞赛与全国卓越工程师项目相结合,本书部分吸收全国大学生电子设计竞赛精品内容和当代市面上流行的FM广播收发系统内容,有利于培养学生动手能力、创新思维、拓展视野,同时对工程技术人员而言也是一本值得参考的资料;

5. 通过一个实例分析,概括、总结全书的内容。通过第10章FM收发系统的介绍,概括、总结了全书的内容。

在第三版修订前(2009年3月29日),专家在长沙对高吉祥主编的“电子技术基础”系列教材成果进行鉴定,与会专家对这套教材给予了较高的评价。特别是《高频电子线路》教材,一致认为在国内同类教材中具有一流的水平。

本书由国防科技大学、空军工程大学、南华大学、怀化学院等联合编著。第三版的修订工作是由高吉祥、高广珠、孟涛、王帅、王宽仁等人完成的。由于编者水平有限,难免会有一些错误和不足,敬请读者批评指正,我们表示万分感谢。

高吉祥
2011年5月

“电子技术基础”系列教材 成果鉴定意见

2009年3月29日,国防科技大学在长沙主持召开“以人才培养为目标,以教学改革为契机,建设高水平电子技术基础系列教材”成果鉴定会,鉴定委员会听取了系列教材建设的成果汇报,审查了系列教材总结报告和相关材料,经讨论,一致认为该成果具有以下主要特色及创新点:

1. 总体结构设计思想清晰,注重系统配套

该系列教材横向包括5个子系列,即电路分析基础系列、模拟电子技术基础系列、数字电子技术基础系列、高频电子线路系列和全国大学生电子设计竞赛培训系列;每个子系列纵向又分为6个部分,即主干教材、学习辅导及习题详解、实验教材、教师参考用书及配套多媒体课件光盘。整套教材总体结构全面系统,配套性好。

2. 重基础和基本技能训练

该系列教材既保留了对经典基础知识论述精辟、配套习题丰富的特点,又特别注重对学生基本实践技能的培养,为每门课的重点内容均编写了相应的实验指导内容,强化了学生基本实验技能的训练。

3. 注重学生创新能力的培养,拓宽学生的知识面

系列教材在四门主干教材的基础上,增加了电子设计竞赛培训教程等拓宽教材,编写了大量综合设计实验及课程设计,引进了许多新技术、新方法、新器件及新设计思路的讲解。实践证明:该系列教材极大地拓宽了学生知识面,促进了学生创新能力的培养。

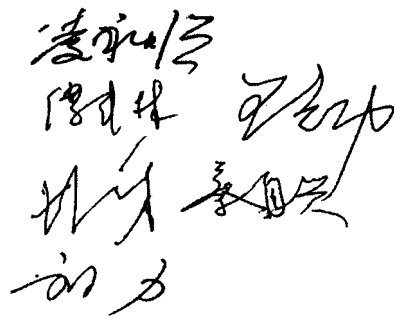
4. 教学、科研和设计相结合,构建特色鲜明的教材体系

系列教材在编写过程中立足于电子信息科技发展前沿,依托高水平科研成果,将科研成果有机融合到教材编写中,形成了教材建设、教学实践和科学研究相互促进的良性互动机制。

鉴定委员会一致认为:该系列教材系统性强、配套性好,具有很高的实用和推广价值。其中《高频电子线路》属“十一五”国家级规划教材,在国内同类教材中具有一流水平,《全国大学生电子设计竞赛培训系列教程》(共5册)填补了此类教材编写的空白。该系列教材现已正式出版16种,发行17万余册,对推进教学改革,促进人才培养起到了重要作用。

鉴定委员会主任:

委员:



目 录

绪论	1
0.1 无线电通信发展简史	1
0.2 通信系统的组成	2
0.3 本课程的特点	5
第 1 章 谐振回路	7
1.1 高频电路中的元器件	7
1.1.1 高频电路中的元件	7
1.1.2 高频电路中的有源器件	10
1.2 简单谐振回路	11
1.2.1 串联谐振回路	11
1.2.2 并联谐振回路	13
1.3 滤波器	17
1.3.1 石英晶体谐振器	17
1.3.2 集中滤波器	21
1.3.3 衰减器与匹配器	24
本章小结	25
习题一	25
第 2 章 高频小信号放大器	27
2.1 概述	27
2.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	29
2.2.1 共发射极混合 π 型等效电路	29
2.2.2 形式等效电路(网络参数等效电路)	32
2.3 谐振放大器	36
2.3.1 单级单调谐放大电路	36
2.3.2 多级单调谐回路谐振放大器	42
2.4 宽频带放大器	43
2.4.1 单级差分宽频带放大器	43
2.4.2 展宽放大器频带的方法	45
2.4.3 集成电路谐振放大器及其典型应用	49
本章小结	50
习题二	51
第 3 章 噪声与干扰	53
3.1 概述	53
3.2 噪声的来源和特点	54
3.2.1 电阻的热噪声	54
3.2.2 二极管的噪声	56

3.2.3	晶体三极管的噪声	56
3.2.4	场效应管噪声	57
3.2.5	接收天线噪声	57
3.3	噪声系数计算方法	58
3.3.1	噪声系数的定义	58
3.3.2	信噪比与负载的关系	59
3.3.3	用额定功率和额定功率增益表示的噪声系数	59
3.3.4	多级放大器噪声系数的计算	60
3.3.5	等效噪声温度	61
3.3.6	晶体管放大器的噪声系数	61
3.3.7	噪声系数与灵敏度	61
3.3.8	噪声系数的测量	62
3.4	降低噪声系数的措施	63
3.5	工业干扰与天电干扰	65
	本章小结	67
	习题三	67
第 4 章	高频功率放大器与功率合成技术	69
4.1	概述	69
4.2	谐振功率放大器分析	71
4.2.1	谐振功率放大器的工作原理	71
4.2.2	谐振功率放大器的工作状态分析	75
4.3	谐振功率放大器电路组成	80
4.3.1	直流馈电线路	80
4.3.2	输入/输出匹配网络	83
4.3.3	谐振功率放大器的实用电路实例	86
4.4	丁类(D类)功率放大器	86
4.4.1	电流开关型 D 类放大器	87
4.4.2	电压开关型 D 类放大器	88
4.5	宽带高频功率放大电路	90
4.5.1	传输线变压器	90
4.6	功率合成器	92
4.6.1	功率合成与分配网络应满足的条件	92
4.6.2	功率合成(或分配)网络原理	93
4.6.3	功率合成电路举例	96
4.7	射频模块放大器和集成功率放大器简介	98
4.7.1	射频模块放大器	98
4.7.2	集成高频功率放大电路及应用简介	99
4.8	高频宽带放大器设计举例	101
	本章小结	113
	习题四	114

第 5 章 正弦波振荡器	115
5.1 概述	115
5.2 反馈振荡器	116
5.2.1 反馈振荡器原理	116
5.2.2 振荡器平衡状态的稳定条件	117
5.3 振荡器的分析方法	118
5.4 互感耦合振荡器	120
5.4.1 单管互感耦合振荡器	120
5.4.2 差分对管互感耦合振荡器	122
5.5 LC 正弦振荡器	122
5.5.1 构成三点式振荡器的原则(相位判据)	122
5.5.2 电容三点式振荡器——考毕兹振荡器	123
5.5.3 电感三点式振荡器——哈特莱振荡器	127
5.5.4 电容三点式与电感三点式振荡器比较	128
5.5.5 改进型电容三点式振荡器	128
5.6 振荡器的频率稳定度	131
5.6.1 频率准确度和频率稳定度	131
5.6.2 频率稳定度分析	133
5.6.3 提高频率稳定度的措施	135
5.7 石英晶体振荡器	137
5.7.1 石英谐振器的性能和等效电路	138
5.7.2 石英晶体振荡器	140
本章小结	145
习题五	146
第 6 章 频谱变换电路	153
6.1 概述	153
6.2 模拟乘法器	153
6.3 普通调幅波的产生和解调电路	156
6.3.1 幅度调制	156
6.3.2 普通调幅波的产生电路	158
6.3.3 普通调幅波的解调电路	161
6.4 抑制载波调幅波的产生和解调电路	162
6.4.1 抑制载波调幅波的产生电路	162
6.4.2 DSB/SCAM 波解调电路	163
6.5 混频电路	165
6.6 倍频器	166
6.7 调角波的基本性质	167
6.7.1 瞬时相位和瞬时频率的概念	167
6.7.2 调相波和调频波	167
6.7.3 调频波的频谱和频谱宽度	169

6.8	直接调频电路	172
6.8.1	变容二极管调频电路	172
6.8.2	晶体振荡器直接调频电路	177
6.8.3	电容话筒调频电路	179
6.8.4	电抗管调频电路	180
6.9	间接调频电路	182
6.10	调频波的解调	184
6.10.1	斜率鉴频器	185
6.10.2	相位鉴频器	186
6.10.3	比例鉴频器	189
6.10.4	移相乘积鉴频器	193
6.10.5	脉冲均值鉴频器	195
* 6.10.6	锁相环鉴频器	196
* 6.10.7	跟相环鉴频器	196
6.11	限幅器	197
6.11.1	晶体二极管限幅器	198
6.11.2	晶体三极管限幅器	198
	本章小结	200
	习题六	201
第7章	数字调制解调电路	209
7.1	概述	209
7.2	二进制振幅键控(ASK)调制与解调	209
7.2.1	ASK 调制	209
7.2.2	ASK 解调	211
7.3	二进制频移键控(FSK)调制与解调	213
7.3.1	FSK 信号的产生	213
7.3.2	FSK 信号的解调	215
7.4	二进制相位键控(PSK)调制与解调	217
7.5	多进制数字调制系统	224
7.5.1	多进制数字振幅调制(MASK)系统	224
7.5.2	多进制数字频率调制(MFSK)系统	226
7.5.3	多进制数字相位调制(MPSK)系统	227
7.6	正交振幅调制(QAM)	231
7.6.1	QAM 信号的产生与解调	231
7.6.2	8QAM	233
7.6.3	16QAM	234
7.7	其他形式的数字调制	235
7.7.1	时频调制(TFSK)	235
7.7.2	时频相调制(TFPSK)	235
	本章小结	236

习题七	237
第 8 章 无线电技术中的反馈控制电路	238
8.1 反馈控制系统的概念	238
8.1.1 反馈控制系统的组成、工作过程和特点	238
8.1.2 反馈控制系统的基本分析	239
8.2 自动增益控制(AGC)电路	246
8.2.1 AGC 电路的组成、工作原理和性能分析	247
8.2.2 放大器的增益控制——可控增益电路	250
8.2.3 AGC 控制电压的产生——电平检测电路	254
8.2.4 AGC 电路举例	257
8.3 自动频率控制(AFC)电路	257
8.3.1 AFC 电路的组成和基本特性	258
8.3.2 AFC 电路的应用举例	260
8.4 自动相位控制(APC)电路(锁相环路 PLL)	263
8.4.1 锁相环路的基本工作原理	263
8.4.2 锁相环路的跟踪性能——锁相环路的线性分析	270
8.4.3 锁相环路的应用	274
本章小结	281
习题八	282
第 9 章 频率合成技术	284
9.1 频率合成器的主要技术指标	284
9.2 直接模拟频率合成法	285
9.2.1 非相干式直接合成器	286
9.2.2 相干式直接合成器	287
9.2.3 频率漂移抵消法(外差补偿法)	288
9.3 直接数字频率合成法	288
9.3.1 直接数字合成基本原理	289
9.3.2 信号的频率关系	290
9.3.3 噪声分析	291
9.3.4 直接数字合成信号源实例	291
9.3.5 任意波形的产生方法	293
9.3.6 设计举例	293
摘要	294
9.4 间接频率合成法(锁相环路法)	301
9.4.1 脉冲控制锁相法	301
9.4.2 间接合成制减法降频(模拟锁相环路法)	301
9.4.3 间接合成制除法降频(数字锁相环路法)	303
本章小结	311
习题九	312
第 10 章 无线电接收与发射设备	313

10.1	概述	313
10.2	无线电接收机	314
10.2.1	无线电接收机的主要技术指标	314
10.2.2	CXA1019 芯片构成的多波段收音机	315
10.2.3	CXA1238 芯片构成的多波段收音机	319
10.2.4	数字调谐收音机	324
10.3	调频发射机	337
10.3.1	调频发射机的性能指标	338
10.3.2	FM 调制器	338
10.3.3	前级功率放大器	343
10.3.4	末级功率放大器	345
10.3.5	直流稳压电源	349
* 10.4	系统设计举例	350
10.4.1	单工无线呼叫系统设计	350
10.4.2	正弦信号发生器设计(2005 年全国大学生电子设计竞赛 A 题)	366
	本章小结	382
	习题十	383
第 11 章	单片射频收发芯片的原理及应用	385
11.1	单片射频发射器芯片	385
11.1.1	UHFASK 发射器芯片 MICRF102	385
11.1.2	ASK/FSK 发射器芯片 TDA5100	386
11.1.3	OOK/ASK 发射芯片 TX6000	388
11.2	单片射频接收器芯片	389
11.2.1	ASK 超外差无线电接收芯片 MICRF007	389
11.2.2	ASK 超外差无线电接收芯片 TDA5200	390
11.2.3	OOK/ASK 接收器芯片 RX6000	391
11.3	单片射频收发器芯片	394
11.3.1	单片射频收发芯片 nRF401/403	394
11.3.2	OOK/ASK 射频收发器芯片 TR3001	396
11.3.3	单片射频收发器芯片 TRF6900	398
11.4	蓝牙无线电收发器	401
11.4.1	蓝牙无线电收发器 PBA31301	401
11.4.2	蓝牙无线电收发芯片 RF2968	403
	常用文字符号说明	408
	一、基本符号	408
	二、器件符号	409
	三、其他符号	410
	参考文献	411

绪 论

本书主要讨论用于各种无线电技术设备和系统中的高频电子线路。无线电技术已广泛应用于无线电通信、广播、电视、雷达、导航等几个主要方面,尽管它们在传递信息形式、工作方式和设备体制等方面有差别,但它们的共同特点都是利用高频(射频)无线电波来传递信息,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是相同的。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线路组成、工作原理及工程设计计算。

0.1 无线电通信发展简史

信息传输是人类社会生活的重要内容。从古代的烽火到近代的旗语,都是人们寻求快速远距离通信的手段。直到19世纪电磁学的理论与实践已有坚实的基础后,人们才开始寻求用电磁能量传送信息的方法。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,能够直接将语言信号变为电能沿导线传送。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。能否不用导线,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,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. nOHOB)与意大利的马可尼(Guglielmo Marconi)等。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:发送设备用火花发射机,电弧发生器或高频发电机等;接收设备则用粉末(金属屑)检波器。只有到了1904年,弗莱明(Fleming)发明电子二极管之后,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。因而电子管的出现,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

多方面已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了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年美国制成了第一块集成电路,1967年研制成大规模集成(LSI)电路,1978年研制成超大规模集成(VLSI)电路,从此电子技术进入了微电子技术时代。从无线电技术诞生到现在,它对人类的生产和生活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。

所以,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種控制系统正部分地模拟、延伸和扩展了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、应用极广,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。

0.2 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,广义地说,凡是在发信者和收信者之间,以任何方式进行消息的传递,都可称为通信。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。其组成框图如图0.1所示。各部分的主要作用简介如下。

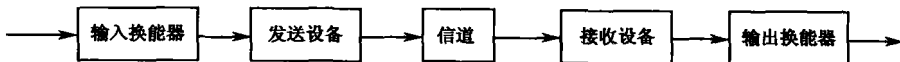


图 0.1 通信系统基本组成框图

1. 输入换能器

输入换能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),输入换能器可省略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特性传输的频带信号。它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。例如,在连续波调制中,简谐振荡有三个参数(振幅,频率和初相位)可以改变,利用基带信号去控制这三个参数中的某一个,对应三种调制方式:调幅、调频和调相。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放大、滤波等的处理过程,以保证送入信道足够大的已调信号功率。

3. 信道

信道是连接发、收两端的信号通道,又称传输媒介。通信系统中应用信道可分为两大类: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。例如,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着不同的传播方式。1.5MHz以下的电磁波主要沿地表传播,称为地波,如图0.2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。1.5~30MHz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0.3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,另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。30MHz以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波,如图0.4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。

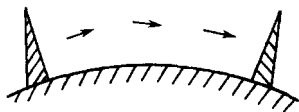


图 0.2 电磁波沿地表绕射

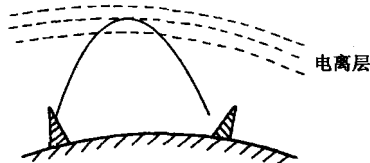


图 0.3 电磁波的折射与反射

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0.1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。无线电波在空间传播的速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$,则高频信号的频

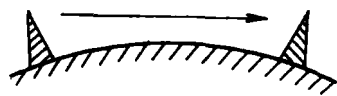


图 0.4 电磁波的直射

率与其波长的关系为:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中,频率 f 单位取 Hz,波长 λ 单位用 m。

表 0.1 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 000m	3 ~ 30kHz	甚低频(VLF)
	长波	1000 ~ 10 000m	30 ~ 300kHz	低频(LF)
	中波	100 ~ 1 000m	0.3 ~ 3MHz	中频(MF)
	短波	10 ~ 100m	3 ~ 30MHz	高频(HF)
	超短波(米波)	1 ~ 10m	30 ~ 300MHz	甚高频(VHF)
微波	分米波	10 ~ 100cm	0.3 ~ 3GHz	特高频(UHF)
	厘米波	1 ~ 10cm	3 ~ 30GHz	超高频(SHF)
	毫米波	1 ~ 10mm	30 ~ 300GHz	极高频(EHF)
	亚毫米波	0.1 ~ 1mm	300 ~ 3 000GHz	超极高频

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。又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. 输出换能器

输出换能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,供收信者使用。

根据分类方式的不同,通信系统的种类很多。按传输的消息的物理特征,其可以分为电话、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,其又可以分为模拟和数字通信系统;而按传输媒介的物理特征,则可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,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 15kHz 以内,对应波长为 20km 以上,要制造出相应的巨大天线是不现实的。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段的低频信号,在信道中会互相重叠、干扰,接收设备也无法选择所要接收的信号。因此,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,故所需天线尺寸便可大大缩小。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互相区分开了。

所谓调制是指用原始电信号去控制高频振荡信号的某一参数,使之随原始电信号的变化规律而变化;而解调就是从高频已调波中恢复原来的调制信号。若采用正弦波信号作为高频振荡信号,由于其主要参数是振幅、频率和相位,因而出现了振幅调制、频率调制和相位调制(后两种合称为角度调制)等不同的调制方式。

图 0.5 给出了无线电通信系统中发送设备与接收设备的方框图。由图可见,通信系统所涉及的基本功能电路包括:小信号放大电路、功率放大电路、正弦波振荡电路、调制和解调电路、倍频电路、混频电路等。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(习惯上称此载频为中频)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,然后送入中频放大器进行放大。中频放大器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。倍频电路的功能是把高频振荡信号或高频已调波信号的频率提高若干倍,以满足系统的需要。

在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。

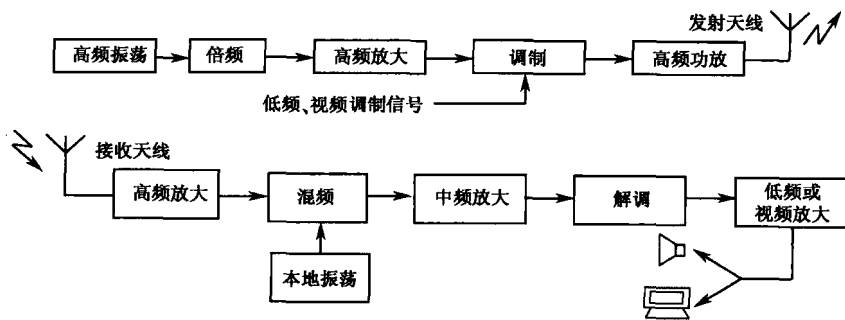


图 0.5 无线电通信系统的发送、接收系统方框图

0.3 本课程的特点

应用于电子系统和电子设备中的高频电子线路几乎都是由线性的元件和非线性的器件组成的。严格来讲,所有包含非线性器件的电子线路都是非线性电路,只是在不同的使用条件下,

非线性器件所表现的非线性程度不同而已。比如,对于高频小信号放大器,由于输入的信号足够小,而又要求不失真放大,因此,其中的非线性器件可以用线性等效电路来表示,分析方法也可以用线性电路的分析方法。但是,本书的绝大部分电路都属于非线性电路,一般都用非线性电路的分析方法来分析。

与线性器件不同,对非线性器件的描述通常用多个参数,如直流跨导、时变跨导和平均跨导,而且大都与控制变量有关。在分析非线性器件对输入信号的响应时,不能采用线性电路中行之有效的叠加原理,而必须求解非线性方程(包括代数方程和微分方程)。实际上,要想精确求解十分困难,一般都采用计算机辅助设计(CAD)的方法进行近似分析。在工程上也往往根据实际情况对器件的数学模型和电路的工作条件进行合理的近似,以便用简单的分析方法获得具有实际意义的结果,而不必过分追求其严格性。精确的求解非常困难,也不必要。因此,在学习本课程时,要抓住各种电路之间的共性,洞悉各种功能之间的内在联系,而不要局限于掌握一个个具体的电路及其工作原理。当然,熟悉典型的单元电路对识图能力的提高和电路的系统设计都是非常有意义的。近年来,集成电路和数字信号处理(DSP)技术迅速发展,各种通信电路甚至系统都可以做在一个芯片内,称为片上系统(SoC)。但要注意,所有这些电路都是以分立器件为基础的,因此,在学习时要注意“分立为基础,集成为重点,分立为集成服务”的原则。在学习具体电路时,要掌握“管为路用,以路为主”方法,做到以点带面,举一反三,触类旁通。

高频电子线路是在科学技术和生产实践中发展起来的,也只有通过实践才能得到深入的了解。因此,在学习本课程时必须高度重视实验环节,坚持理论联系实际,在实践中积累丰富的经验。随着计算机技术和电子设计自动化(EDA技术)的发展,越来越多的高频电子线路可以采用EDA软件进行设计、仿真分析和电路板制作,甚至可以做电磁兼容的分析和实际环境下的仿真。因此,掌握先进的高频电路EDA技术,也是学习高频电子线路的一个重要内容。