



普通高等教育 **电气信息类** 应用型规划教材

# 高频电子线路

周选昌 主编  
唐向宏 主审



科学出版社



免费提供电子教案



013023637

TN710.2-43

21

普通高等教育电气信息类应用型规划教材

# 高频电子线路

周选昌 主编

唐向宏 主审



TN710.2-43

21

科学出版社

北京



北航

C1630559

## 内 容 简 介

本书是面向电气信息类应用型人才培养的本科教学的规划教材。以掌握基本理论、基本模块与功能实现,培养基本应用能力为目标,结合现代工程实际应用,介绍无线通信的系统结构、工作原理及各模块之间的相互联系。全书包括无线通信的基础理论知识、模拟调制与解调技术、混频技术、正弦振荡技术、高频信号放大技术、锁相频率合成技术等。全书突出基本概念与实际应用,在内容编排上尽量做到思路清晰、叙述简明、便于自学。

本书可作为高等学校电气信息类专业的教材,特别适合以培养应用型人才为目标的本科院校师生选用,也可供从事相应专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/周选昌主编. —北京:科学出版社, 2013

(普通高等教育电气信息类应用型规划教材)

ISBN 978-7-03-036178-3

I. ①高… II. ①周… 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(2012)第296759号

责任编辑:陈晓萍/责任校对:耿耘

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年2月第一次印刷 印张:19 1/4 插图1

字数:436 000

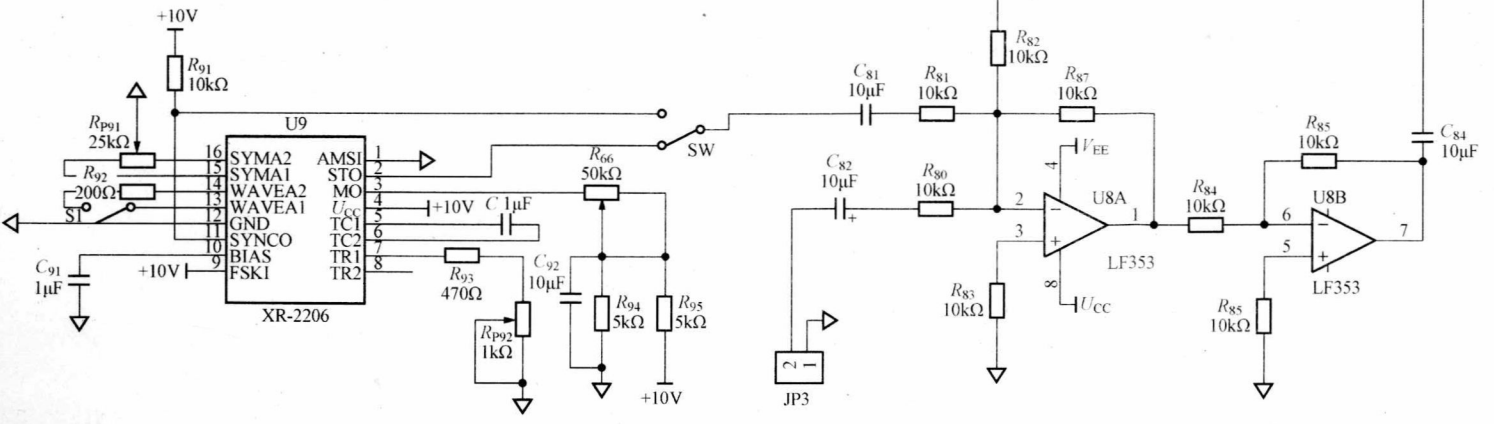
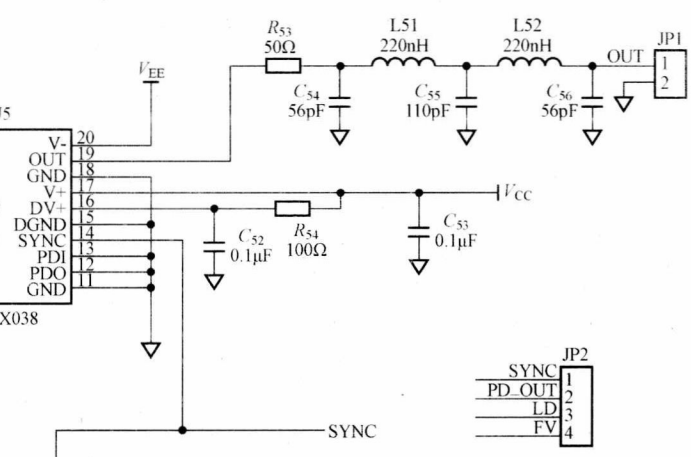
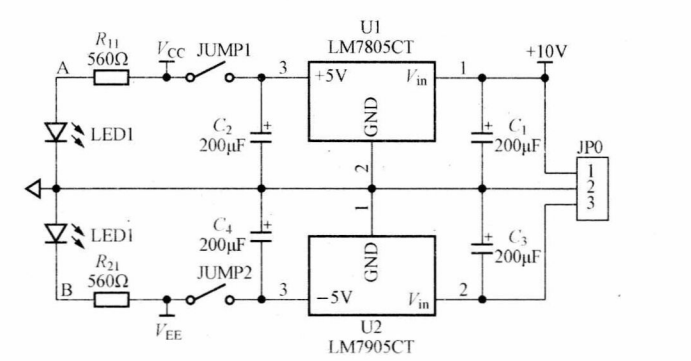
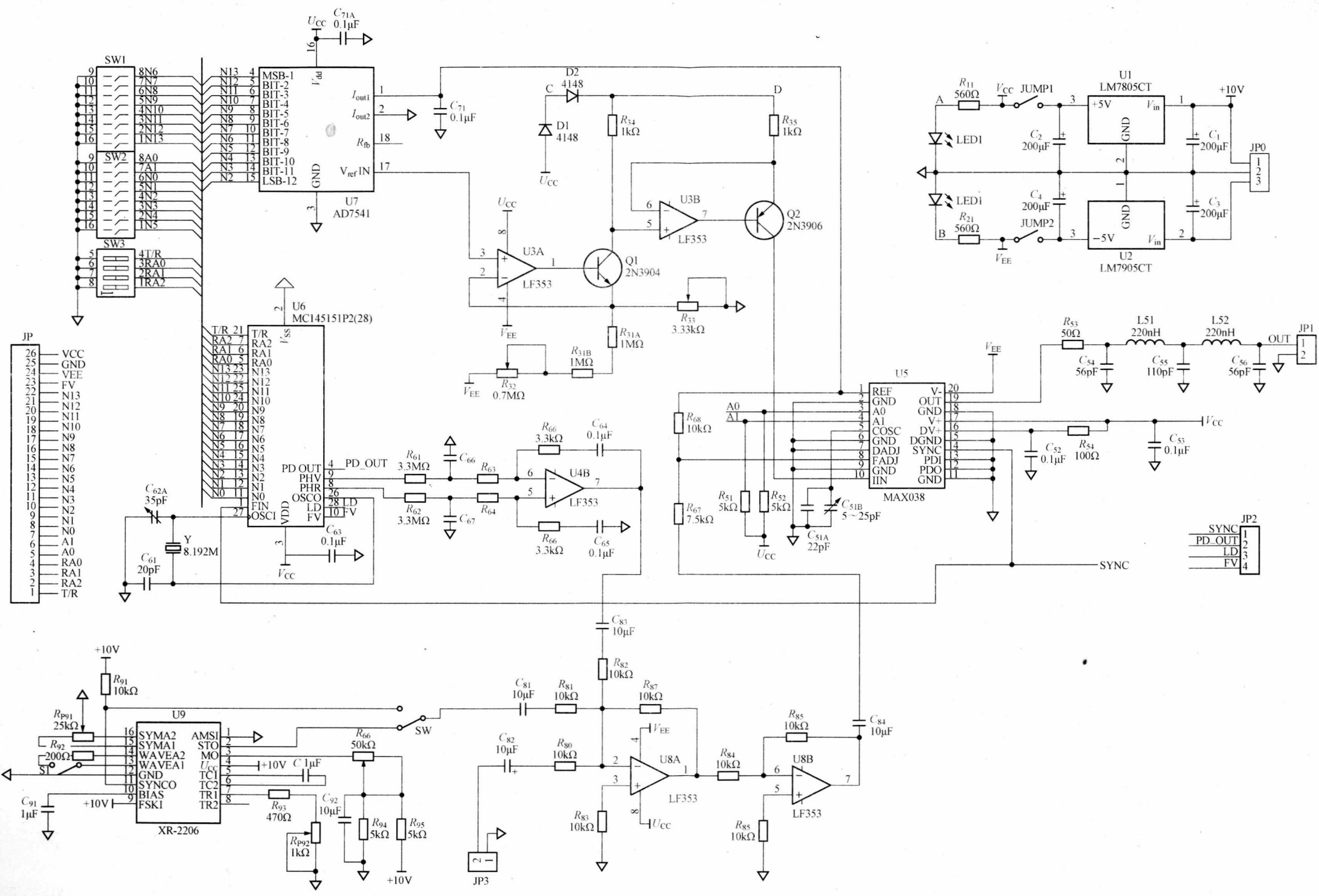
定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62142126 编辑部电话 010-62138978-8003

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



# 普通高等教育电气信息类应用型规划教材

## 编 委 会

主 任：刘向东

副主任：方志刚 张明君

成 员：万 旭 万林生 王泽兵 龙建忠 叶时平 代 燕  
伍良富 刘加海 祁亨年 杜益虹 李联宁 张永炬  
张永奎 张克军 杨起帆 周永恒 金小刚 洪 宁  
秦洪军 凌惜勤 陶德元

秘书长：刘加海（兼）

秘 书：陈晓萍 周钗美

# 前 言

随着无线通信技术的迅速发展,通信产品日益丰富,人们十分清晰地认识到高频知识在整个无线应用系统中的重要地位,因此各高等学校的电气信息类专业把高频电子线路作为一门主要的专业基础课程。

无线通信的发展需要大量的应用型技术人才,而传统的高频电子线路教材偏重于抽象理论的分析与研究,缺乏实际应用的案例,这对应用型人才培养是十分不利的。编者多年从事应用型本科教学,针对高频通信领域的应用型人才培养,在课堂教学与实验、实践教学方面的改革作了一些有益的探索与尝试,并取得了一定的效果。本书的编写体现了编者近年来在这方面的一些成果。本书可作为应用型本科院校电气信息类专业的教材,也可作为无线通信应用领域技术人才的参考用书。

本书是面向应用型本科院校教学,该教材编写的指导思想如下。

## 1. 教材内容组织模块化

本书以发射机、接收机的功能实现为模块结构组织教材内容,使得全书内容编排合理、主线清晰,便于学生从整体上掌握教材内容。

## 2. 教材内容合理精简

本书在内容编排上尽量精简抽象的理论分析,强调基本概念与基本功能的实现,力求做到浅一点、宽一些,突出基本理论的应用分析。

## 3. 结合现代工程实际应用

本书以应用型人才培养为目标,在内容编写时十分注重理论知识的应用,强调教材内容的系统性与教学的实用性,并提供了大量的应用实例。

本书适合 51 学时和 68 学时的课程教学,教材中带有“\*”的内容可以视实际情况选讲或者安排自学。每章后均配有一定数量的习题,带有“\*”的习题可以选做。本书的教学安排建议如下:

51 学时的教学安排(带“\*”的内容可以选讲或自学)。

第 0 章	绪论	1 学时
第 1 章	谐振回路与阻抗变换	6 学时
第 2 章	非线性器件描述及应用	6 学时
第 3 章	发射机与接收机的结构	3 学时
第 4 章	正弦波振荡器	5 学时
第 5 章	振幅的调制与解调	8 学时
第 6 章	角度的调制与解调	8 学时
第 7 章	混频电路	5 学时



第 8 章 高频放大器	5 学时
第 9 章 锁相环路及频率合成	4 学时
第 10 章 高频电子线路应用实例	自学
68 学时的教学安排 (带 “*” 的内容可以选讲或简略介绍)。	
第 0 章 绪论	1 学时
第 1 章 谐振回路及阻抗变换	8 学时
第 2 章 非线性器件描述及应用	8 学时
第 3 章 发射机与接收机的结构	6 学时
第 4 章 正弦波振荡器	8 学时
第 5 章 振幅的调制与解调	8 学时
第 6 章 角度的调制与解调	8 学时
第 7 章 混频电路	7 学时
第 8 章 高频放大器	6 学时
第 9 章 锁相环路及频率合成	8 学时
第 10 章 高频电子线路应用实例	自学

本书由数家兄弟院校具有丰富教学经验和实验、实践教学经历的资深教师共同参与编写,教材的编写质量得到了充分的保证。本书由浙江大学城市学院的周选昌担任主编,南昌大学科学技术学院的黄仁如、浙江理工大学的杨俊秀、浙江工业大学之江学院的郑利君担任副主编。本书编写分工如下:绪论、第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 10 章由周选昌负责编写,第 5 章由杨俊秀负责编写,第 7 章、第 9 章由郑利君负责编写,第 8 章由黄仁如负责编写。全书由周选昌负责统稿。

特别感谢杭州电子科技大学唐向宏教授对本书进行了详细、全面的审阅,并提出了许多建设性的意见,对提高本书质量起到了重要的作用。同时感谢浙江大学城市学院的赵胜颖、汪秋婷,他们在本书编写过程中提供了大力帮助。

在编写本书过程中,我们参考了众多国内外同行的著作、文献,在此一并表示感谢。限于编者的水平,本书中存在的不妥与错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

高频电子线路编写组

2012 年 3 月

# 目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 无线通信的发展简史	1
0.2 无线通信系统的组成	2
0.3 高频电子线路课程学习难点	5
0.4 本课程的组织安排	6
习题	6
<b>第 1 篇 理论基础知识</b>	
第 1 章 谐振回路与阻抗变换	7
1.1 选频回路的技术指标	8
1.2 LC 并联谐振回路	9
1.2.1 LC 并联谐振回路的基本概念与特性	9
1.2.2 LC 并联谐振回路的选频特性	11
1.3 LC 串联谐振回路	14
1.3.1 LC 串联谐振回路的基本概念与特性	14
1.3.2 LC 串联谐振回路的选频特性	16
1.4 实际谐振回路与有载品质因数	17
1.4.1 实际电感线圈与实际电容的高频等效电路	17
1.4.2 串并联支路阻抗变换	18
1.4.3 实际谐振回路与有载品质因数	20
1.5 无源阻抗变换网络	23
1.5.1 阻抗变换的目的及一般电路结构	23
1.5.2 常用的无源阻抗变换电路	24
1.5.3 阻抗变换网络的应用	30
1.6 传输线变压器	32
1.6.1 传输线变压器的结构与工作原理	32
1.6.2 传输线变压器的应用	33
1.7 集中参数滤波器	35
1.7.1 晶体滤波器和陶瓷滤波器	35
1.7.2 声表面波滤波器	36
1.7.3 集中参数滤波器的使用	37



小结	38
习题	38
<b>第2章 非线性器件描述及应用</b>	<b>43</b>
2.1 非线性器件的描述方法	44
2.1.1 非线性器件的描述方法	44
2.1.2 线性化处理	47
2.2 非线性器件的影响	47
2.2.1 输入仅有一个有用信号	48
2.2.2 输入有两个以上的信号	50
2.2.3 多级级联系统非线性特性	53
2.3 非线性器件的应用	55
2.4 模拟乘法器电路	59
小结	63
习题	63

## 第2篇 高频通信系统的组成

<b>第3章 发射机与接收机的结构</b>	<b>65</b>
3.1 概述	65
3.1.1 发射机、接收机的一般组成	65
3.1.2 发射机的一般功能	66
3.1.3 接收机的一般功能	67
3.1.4 发射机、接收机的关键技术	67
3.2 发射机方案	68
3.2.1 直接变换实现方案	68
3.2.2 两步法变换实现方案	69
3.3 接收机方案	70
3.3.1 超外差接收方案	71
3.3.2 直接下变频方案	77
3.3.3 抑制镜频接收方案	79
3.4 无线发射接收机的性能指标	80
3.5 集成发射机、接收机电路	82
3.5.1 单片集成发射电路	82
3.5.2 单片集成接收电路	85
小结	89
习题	89

## 第 3 篇 高频通信系统各模块的工作原理与电路实现

第 4 章 正弦波振荡器	91
4.1 概述	91
4.1.1 振荡电路的功能	91
4.1.2 振荡器的分类	92
4.1.3 振荡器的技术指标	92
4.2 反馈型振荡器的基本原理	93
4.2.1 反馈型振荡器原理及维持振荡的平衡条件	93
4.2.2 自激振荡形成的物理过程	94
4.2.3 振荡器的稳定条件	96
4.2.4 反馈振荡电路的判断方法	98
4.3 $LC$ 正弦振荡器	98
4.3.1 构成 $LC$ 振荡器的两个注意点	98
4.3.2 互感耦合式 $LC$ 振荡器	99
4.3.3 三点式 $LC$ 振荡器	100
4.4 石英晶体振荡器	107
4.4.1 石英晶体的特性与等效电路	107
4.4.2 石英晶体振荡电路	109
4.5 压控振荡器	112
4.5.1 概述	112
4.5.2 变容二极管压控振荡器	113
4.5.3 射极耦合多谐振荡器	114
4.6 振荡器的频率稳定度	116
4.6.1 振荡器频率的准确度与稳定度	116
4.6.2 振荡频率不稳定的因素	116
4.6.3 提高频率稳定度的措施	117
小结	117
习题	117
第 5 章 振幅的调制与解调	122
5.1 概述	122
5.2 振幅调制及指标分析	124
5.2.1 普通调幅	124
5.2.2 抑制载波的双边带调幅	128
5.2.3 抑制载波的单边带调幅	129
5.3 调幅信号的产生方法	130
5.3.1 普通调幅信号	131
5.3.2 抑制载波的双边带信号	131



5.3.3 抑制载波的单边带信号·····	131
5.4 调幅信号的解调·····	133
5.4.1 相干解调·····	133
5.4.2 包络检波器·····	135
5.5 振幅调制与解调电路·····	135
5.5.1 振幅调制电路·····	135
5.5.2 振幅解调电路·····	138
小结·····	151
习题·····	151
<b>第6章 角度的调制与解调</b> ·····	<b>156</b>
6.1 角度调制信号的基本特性·····	157
6.1.1 调频信号与调相信号·····	157
6.1.2 角度调制信号的指标分析·····	161
6.2 调频电路·····	164
6.2.1 调频电路概述·····	164
6.2.2 直接调频电路·····	165
6.2.3 间接调频电路——调相电路·····	170
6.2.4 扩展频偏的方法·····	173
6.3 鉴频电路·····	175
6.3.1 概述·····	175
6.3.2 斜率鉴频·····	176
6.3.3 正交鉴频·····	179
小结·····	182
习题·····	182
<b>第7章 混频电路</b> ·····	<b>186</b>
7.1 混频器的结构与工作原理·····	187
7.1.1 混频器的基本结构·····	187
7.1.2 混频器的工作原理·····	187
7.1.3 混频器的主要指标·····	188
7.2 有源混频器电路·····	190
7.2.1 单管跨导型混频电路·····	190
7.2.2 单平衡混频电路·····	193
7.2.3 双平衡混频电路·····	194
7.3 无源混频电路·····	197
7.3.1 二极管的混频原理·····	197
7.3.2 二极管双平衡混频器·····	199
小结·····	203
习题·····	203

<b>第 8 章 高频放大器</b> .....	206
8.1 概述.....	206
8.2 高频放大器的分类.....	207
8.3 高频小信号放大器.....	208
8.3.1 晶体管的高频等效电路.....	208
8.3.2 高频小信号放大电路.....	211
8.3.3 高频小信号放大器的稳定性.....	215
8.4 高频功率放大器.....	216
8.4.1 电路的组成与工作原理.....	216
*8.4.2 动态负载线.....	219
*8.4.3 四个电量的讨论.....	221
8.4.4 输出功率和效率.....	222
8.4.5 直流馈电电路.....	224
*8.5 功率合成电路.....	226
8.5.1 魔 T 网络.....	227
8.5.2 功率合成电路.....	230
*8.6 余弦脉冲分解.....	231
小结.....	233
习题.....	233
<b>第 9 章 锁相环路及频率合成</b> .....	236
9.1 概述.....	236
9.2 锁相环路的基本组成与工作原理.....	237
9.2.1 锁相环路的基本组成与模型.....	237
9.2.2 环路的相位模型和环路基本方程.....	242
*9.3 锁相环路的跟踪与捕捉特性.....	243
9.3.1 锁相环路的跟踪特性.....	243
9.3.2 锁相环路的捕捉特性.....	247
9.3.3 同步带与捕捉带的测量.....	250
9.4 鉴相器电路的实现.....	251
9.4.1 鉴相器的指标与分类.....	251
9.4.2 各种鉴相器的工作原理.....	252
9.4.3 通用集成锁相环路.....	256
9.5 锁相环路在频率合成中的应用.....	258
9.5.1 频率合成器的主要技术指标.....	259
9.5.2 锁相频率合成器.....	259
小结.....	264
习题.....	264



## 第4篇 高频通信综合应用

第10章 高频电子线路应用实例 .....	267
10.1 调频发射与接收系统 .....	267
10.2 调频信号源电路设计 .....	279
附录A 专业术语英文缩写与中文对照 .....	287
附录B 部分习题参考答案 .....	289
参考文献 .....	294

# 第0章 绪论

## 学习内容

1. 无线通信的发展简史
2. 无线通信系统的组成
3. 高频电子线路课程学习难点
4. 本课程的组织安排

## 学习要求

1. 了解无线通信的发展简史。
2. 熟悉通信系统的组成部分及各部分的作用。
3. 熟悉调制、解调的概念，为什么要进行调制。
4. 熟悉调幅、调频、调相的概念。
5. 了解广播发射机、接收机的结构及各部分的作用。
6. 了解高频电子线路课程学习难点。

## 0.1 无线通信的发展简史

信息传输是人类社会活动的重要内容，无论在古代还是现代，人们始终坚持寻求快速、远距离、安全、高效率的通信手段。1864年英国物理学家麦克斯韦(J.Clerk Maxwell)提出了“电磁场的动力理论”，为后来无线电的发明与发展奠定了坚实的理论基础。从此以后，许多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。意大利科学家马可尼(Guglielmo Marconi)于1901年首次实现了横跨大西洋的无线电通信，从此无线电通信进入了实用阶段。

1907年李·德·福雷斯特(Lee de Forest)发明了电子管，用它可以组成具有放大、振荡、变频、调制、检波及波形变换等重要功能的电子管电路，为电子电路设计提供了重要器件。因此，电子管的出现是电子技术发展史上的第一个重要里程碑。

1948年肖克莱(W.Shockley)等科学家发明了晶体管，它在节能、体积与重量、稳定性及寿命等方面远胜于电子管，因此晶体管的出现是电子技术发展史上的第二个重要的里程碑。从此以后，晶体管成为电子电路设计的重要器件。

在20世纪60年代以后，随着集成电路的出现，中规模、大规模乃至超大规模集成电路的不断涌现，已成为电子电路，特别是数字电路的发展主流，对信息传输起到了巨大的推动作用。因此，集成电路的出现是电子技术发展史上的第三个里程碑。



近年来,随着电子技术的迅速发展,无线通信也已取得突破性的发展。通信系统也从模拟通信过渡到数字通信,有效地增强了系统的抗干扰性能、增加了通信的安全性能,降低了系统功耗,延长了工作时间。无线移动通信已成为电子信息产业的重要组成部分,数以千万的用户利用灵巧的无线手机在一段无线频谱中进行双向移动通信。目前,移动通信已发展到 3G,正在向 4G 方向发展,无线局域网也得到了广泛的应用。

## 0.2 无线通信系统的组成

通常把信息从发送者传送到接收者的过程称为通信,而实现信息传输过程的系统称为通信系统,它的基本组成如图 0.2.1 所示。

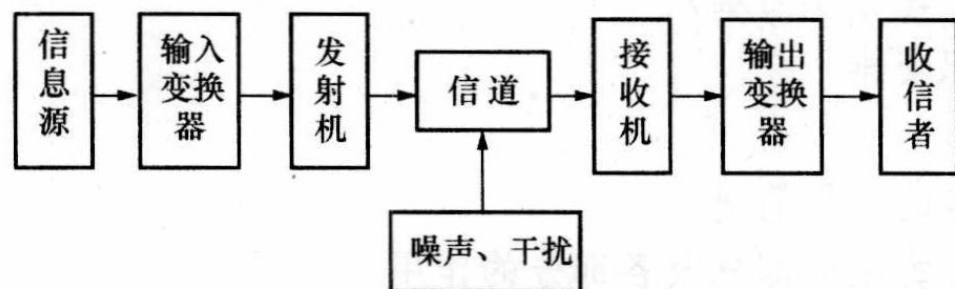


图 0.2.1 通信系统的基本组成框图

在通信系统中,信号一般要经过两种变换与反变换。在发送端,第一个变换是输入变换器,它把要传输的信息(一般是非电信号,如语音)转变为电信号。该信号一般是低频的,而且包含零频率附近的分量,通常称该电信号为基带信号。它可以是模拟信号,也可以是数字信号。第二个变换是发射机将基带信号变换成其频带适合在信道中有效传输的信号形式,并送入信道。这种变换称为调制,变换后的信号称为已调信号,也称为通带信号,去调制的基带信号也称为调制信号。

在接收端,接收机的功能与发射机的功能正好相反。第一个反变换是从信道中选取有用的已调信号,并将其转换为基带信号,该变换称为解调。第二个反变换是输出变换器将解调后得到的基带信号转变为相应的信息(如语音),传送给受信者。

信道是信息的传输媒介,分为有线信道和无线信道两类。有线信道如电线、电缆、光纤和波导。无线信道即是由电磁波传播的自由空间。由有线信道组成的通信系统称为有线通信系统,由无线信道组成的通信系统称为无线通信系统。适合电波传播的频段范围极为宽广,从几十千赫兹的超长波到几十吉赫兹的毫米波,不同频段的电磁波在空间传输的方式和特性也都不相同。表 0.2.1 概括地说明了无线电波段的划分、主要特性与用途、所适用的传输媒质等。

表 0.2.1 无线电波波段划分表

级别	频率范围	波长范围 ( $\lambda = c/f$ )	主要用途	传播媒质
甚低频 (VLF)	10~30kHz	30~10km (超长波)	高功率,长距离,点对点 通信	双线 地波

续表

级别	频率范围	波长范围 ( $\lambda = c/f$ )	主要用途	传播媒质
低频 (LF)	30~300kHz	10~1km (长波)	长距离点对点通信, 用于 船舶助航	双线 地波
中频 (MF)	300kHz~3MHz	1000~100m (中波)	广播、船舶通信、飞行通 信、警察用无线电等	电离层反射 同轴电缆
高频 (HF)	3~30MHz	100~10m (短波)	中距离及远距离的各种 通信与广播	电离层反射 同轴电缆
甚高频 (VHF)	30~300MHz	10~1m (米波段)	短距离通信、电视、调频、 雷达、导航	天波(电离层与对流层散射) 同轴线
超高频 (UHF)	300MHz~3GHz	100~10cm (分米波段)	短距离通信、电视、雷达、 散射通信、流星余迹通信	视线中继传输 对流层散射
特高频 (SHF)	3~30GHz	10~1cm (微波段)	短距离通信、波导通信、 雷达、卫星通信	视线中继传输 视线穿透电离层传输
极高频 (EHF)	30~300GHz	1~0.1cm	射电天文、雷达	视线传输
自红外线 至紫外线	$5 \times 10^{11} \sim$ $5 \times 10^{16} \text{Hz}$	$6 \times 10^{-2} \sim$ $6 \times 10^{-7} \text{cm}$	光通信	光纤

在无线通信中, 必须将基带信号转换为适合信道传输的通带信号的主要原因是: 第一是为了有效地把信号以电磁波的方式辐射出去。为了有效地将信号的能量辐射到空间, 必须要求天线的长度  $l$  与信号的波长  $\lambda$  可比拟 (例如两者之比至少为  $1/10$ )。而基带信号的频率一般是比较低的, 如语音信号的频率在  $300 \sim 3400 \text{Hz}$  范围内, 如果要直接辐射语音信号, 这就要求天线的长度很长, 这显然是不现实的。为了有效地辐射, 发射信号的频率必须提高。在发射机中, 由振荡器产生高频信号, 称为载波。但载波并不携带要发射的信息, 因此, 需要将基带信号去控制高频载波的某个参数 (如幅度、频率或相位等), 使其携带了有用信息的已调波, 该过程称为调制。将这种频率足够高的已调信号加到天线上, 发射天线的尺寸可显著缩小。

第二是为了有效地利用频带。一般要传输的基带信号的频率范围都差不多, 如广播电台的音乐节目的频率范围大约集中在  $100 \text{Hz} \sim 10 \text{kHz}$ , 如果每个电台都直接发射这些信号, 就会形成相互干扰, 令接收机无法区分。只有将不同电台的节目调制到不同的载波频率上, 变成中心频率不同的频带信号, 接收机才能任意选择所需的电台而抑制不需要的电台和干扰。提高了系统的抗干扰能力。

当今公众数字移动通信常用的两种制式 GSM 和 IS-95 采用的载波频段都在  $900 \text{MHz}$ , 目前第三代数字移动通信都采用  $2 \text{GHz}$  的载波频段, 无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 采用的是  $2.4 \text{GHz}$  载波频段, 全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 采用的是  $1.6 \text{GHz}$  的载波频段, 北斗定位系统也是采用  $1.6 \text{GHz}$  的载波频段。



正弦载波有三个参数，即幅度、频率和相位。利用基带信号控制载波信号幅度的调制方式称为调幅；利用基带信号控制载波信号频率的调制方式称为调频；利用基带信号控制载波信号相位的调制方式称为调相。用模拟信号调制正弦载波称为模拟调制，用数字信号调制正弦载波的称为数字调制。采用不同调制方式的通信系统的性能和技术难度都是不同的。

图 0.2.2 是采用调幅方式的中波广播发射机的一种组成框图。

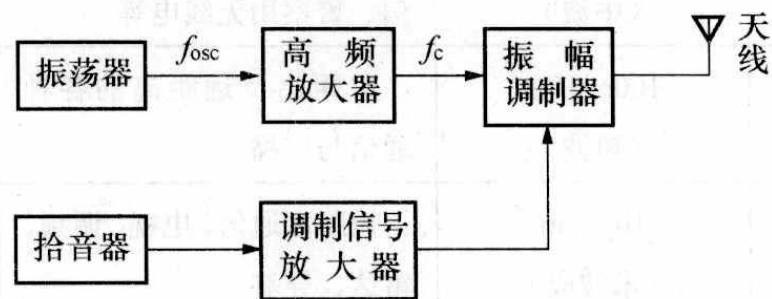


图 0.2.2 采用调幅方式的中波广播发射机组成框图

振荡器用来产生频率为  $f_{osc}$  的高频振荡信号，其频率一般在几十千赫兹以上。

高频放大器由多级带有谐振系统的谐振放大器（包括倍频器）组成，用来放大振荡器产生的振荡信号，使其频率倍增到载波频率  $f_c$  上，并提供足够大的功率。

调制信号放大器（也称低频放大器）由多级放大器组成。前几级为小信号放大器，用来放大传感器变换来的微弱电信号，后面几级为功率放大器，用来提供足够功率的调制信号。

振幅调制器用来实现调幅功能，它将输入的载波信号和调制信号变换为所需要的调幅波信号，然后送到天线上发射。

图 0.2.3 是采用调幅方式的无线广播接收机组成框图。

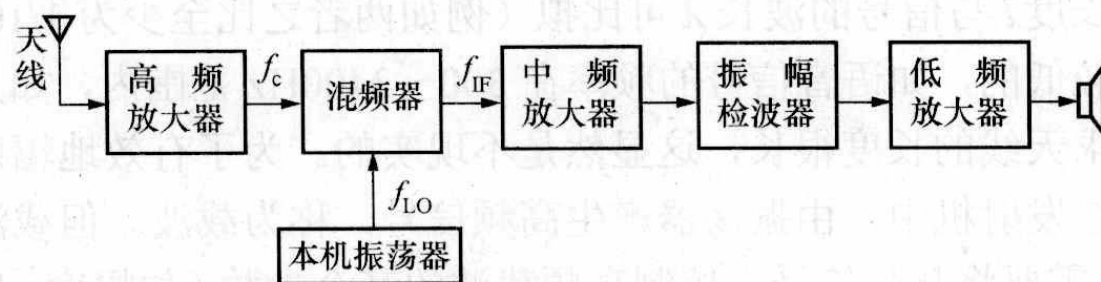


图 0.2.3 采用调幅方式的无线广播接收机组成框图

高频放大器由一级或多级小信号谐振放大器组成，用来放大天线上感生的有用信号，同时利用谐振回路的选频特性来抑制天线上感生的其他频率的干扰信号。由于谐振放大器的中心频率随所需接收信号频率  $f_c$  的不同而不同，因此，高频放大器必须是可调谐的。

混频器的作用是将载波频率为  $f_c$  的高频已调信号不失真地变换为载波频率为  $f_{IF}$  的中频信号。我国调幅广播接收机的中频规定为 465kHz，调频广播的中频为 10.7MHz。

本机振荡器用来产生振荡频率为  $f_{LO}$  的高频振荡信号，且要求  $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ 。由于  $f_{IF}$  为固定的，因此振荡频率  $f_{LO}$  也应是可调的，而且必须正确跟踪  $f_c$  的变化。

中频放大器由多级固定调谐的小信号放大器组成，用来放大中频调幅信号。

振幅检波器用来实现解调功能，将中频信号变换为反映传输信息的调制信号。

低频放大器由小信号放大器和功率放大器组成，用来放大携带有信息的调制信号，