



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

熊俊俏 主编
熊俊俏 杜勇 戴丽萍 编

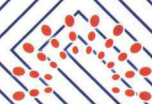
高频电子线路

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

High-Frequency
Electronic Circuits



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



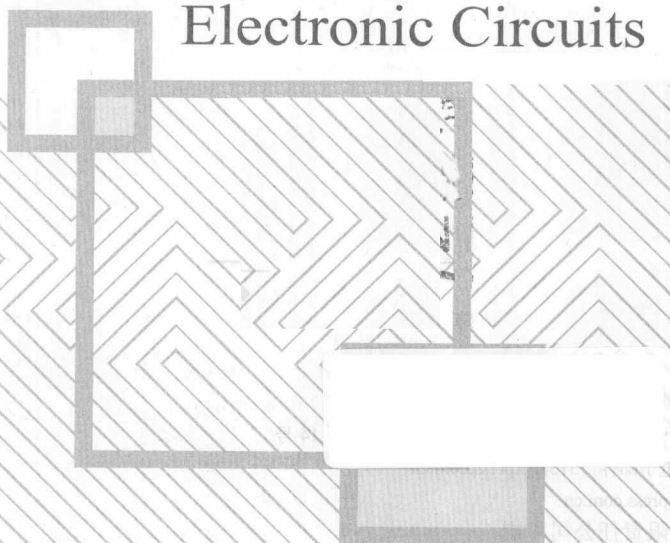
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

熊俊俏 主编
熊俊俏 杜勇 戴丽萍 编

高频电子线路

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

High-Frequency
Electronic Circuits



人民邮电出版社
北京



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 熊俊俏主编. -- 北京: 人民邮电出版社, 2013. 8
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-27668-1

I. ①高… II. ①熊… 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035689号

内 容 简 介

本书重点讲述了高频电子线路的基本原理和基本概念。内容包括绪论、高频电路基础、选频回路、高频放大电路、正弦波振荡器与频率合成技术、线性频谱搬移、角度调制与解调、高频辅助电路和无线通信系统设计与测试,共9章。

本书可作为通信工程、电子信息工程等专业的本科生教材,也可作为高职高专学生的辅助教材和有关工程技术人员参考书。

-
- ◆ 主 编 熊俊俏
编 熊俊俏 杜 勇 戴丽萍
责任编辑 刘 博
责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 22.25 2013年8月第1版
字数: 541千字 2013年8月河北第1次印刷

定价: 52.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

本书作者多年从事高频电路的教学工作，根据其本人教学的讲稿，在吸取国内外高频电路权威著作精华的基础上，力图编写一本适应我国当前高等教育电子电气基础课程教学改革需要的本科生教学用书。本教材在保持传统高频电子线路教材基本框架的前提下作了部分内容的更新，使其具有如下的特色：

1. 本教材既保持了传统高频电路教材的风格，又形成了其自身完整的结构体系；本着打好基础、注重基本概念의阐述，利于教学，便于自学；

2. 注意到高频器件在通信产品和高频电路中的应用，增加了高频电路中实际应用的新器件，以适应教学和科研的有机结合；

3. 将传统高频电路中反馈控制的内容，如 AGC、AFC、APC (PLL) 分别融合到具体应用的有关章节中，这样可以使基本理论与实践更紧密地结合；

4. 增加了高频电路中辅助电路相关的内容，使部分高频电路的单元电路向电子系统过渡，有利于引导学生对电子系统的认识，初步建立电子系统的概念；

5. 全书的各章均分别配置了适量的高频电路分析与设计的例题，以及一定数量的思考题与习题，利于学生理解和巩固基本概念，利于培养学生分析和设计高频电路的基本能力。

本书的编写可以认为是一种新的尝试，可能会引起一些新的争论。然而，学术的本身就在于争鸣，只有通过同行的争论、讨论才会使一本教学用书更臻完善。诚望广大师生和同仁不吝赐教。

武汉大学

2012年9月于武昌珞珈山

前言

高频电子线路是通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的主要技术基础课，具有很强的理论性、工程性和实践性。随着微电子技术的飞速发展，高频电子线路的内容与形式都有很大的变化，各种仿真工具与设计软件的应用，简化了的电路设计，但对理论性、工程性与实践性提出了更高的要求。适合专业需要、适应技术发展、突出理论基础、加强工程性和实践性，是编写本教材的基本出发点。根据多年的教学和科研实践，对高频电子线路的内容、重点与难点有了一定的认识，在参考了国内外有关教材的基础上，确定了本教材“内容系统完整、理论基础扎实、突出工程性、便于教与学”的编写指导原则。

随着电子信息技术的飞速发展，对电子信息类人才培养要求的提高，从而对本课程的内容与要求也需调整更新，引入新的分析方法、新的技术和新的器件，强调功能模块的指标与设计方法，以无线通信系统的系统性贯穿全书，以期突出各功能模块的作用，试图解决教学中长期困扰学生学习——高频电子线路有什么用，学完高频电子线路后能做什么的问题。

本教材依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会编写的“电子电气基础课程教学基本要求”，力求全面反映高频电子线路的理论与技术发展，以严谨的电路理论分析高频电路的核心内容，如放大器、振荡器、调制解调器与混频等；在内容安排上，将锁相与频率合成技术应用于振荡器、调幅与鉴频，将反馈控制技术（AGC、AFC、PLL）应用于实际电路，不深入介绍其理论；从完善系统性考虑，增加了模拟调制系统抗噪声性能分析以及通信链路分析，并增加了高频辅助电路，充实系统设计中必需而历来被忽视的内容；在篇幅上，不与教学学时挂钩，内容尽量丰富，便于教学取舍与学生自学；在器件的应用方面，理论分析仍以分立元件为主，适度增加新器件的实际应用，不拘泥于器件内部分析或唯器件而器件；在仿真与设计软件应用方面，教材未作专门介绍，但在练习习题中要求使用一些工具软件；精选课后习题，题量有所控制，以分析、设计为主，压缩验证性习题。

全书共分9章。

第1章绪论，主要以介绍无线通信技术的发展、系统组成和指标、通信系统的一些基本概念以及无线信道的特点为出发点，介绍了无线通信系统原理和现代化无线通信新技术，并提出了本课程的特点与学习方法；

第2章高频电路基础，主要介绍了高频电子元器件及其模型，并对噪声与噪声系数进行了分析；

第3章选频回路，主要介绍了串联谐振回路、并联谐振回路、串并联转换，部分接入谐振回路，以及集中谐振滤波器等；

第4章高频放大电路，内容包括高频小信号放大器和高频功率放大器。如谐振回路、高频小信号放大器的工作原理与性能指标、设计方法；高频功率放大器的工作原理、分析方法、外部特性与实际电路、设计方法等；

第5章正弦波振荡器与频率合成技术，内容包括振荡器的工作原理、起振条件，LC振荡器，晶体振荡器，VCO振荡器，负阻振荡器和频率合成技术应用等；

第6章线性频谱搬移，内容包括非线性电路的分析方法，幅度调制与解调的方法及电路，混频器工作原理、指标与设计方法等；

第7章角度调制与解调，内容包括角度调制与解调的原理、方法，相位鉴频电路与调频技术应用实例等；

第8章高频辅助电路，内容包括高频滤波器、射频开关与衰减器、通信天线与电磁干扰等；

第9章无线通信系统的设计与测试，内容包括模拟调制通信系统的抗噪声性能、无线通信系统的结构与指标，典型通信系统组成，通信链路的分析设计与测试方法。

本书由熊俊俏主编，杜勇编写了第2章、第3章，戴丽萍编写了第4章、第5章、第6章，熊俊俏编写了其他章节，全书由熊俊俏负责统稿。在本书编写过程中，武汉虹信通信技术有限责任公司郭见兵高级工程师提供了很好的信息与建议，武汉大学电子信息学院甘良才教授在百忙中审阅了本书，提出了详细的修改意见，并为书作序，值此深表感谢。

在本书的编写过程中，作者参考了国内外教材、文献与网络资源，在此谨向这些文献的作者一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥和谬误之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年11月于武汉黄龙山

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线通信系统概述.....	1
1.1.1 无线通信技术的发展历程.....	1
1.1.2 无线电通信系统的组成.....	2
1.1.3 无线电通信系统的类型.....	3
1.1.4 无线通信系统的指标.....	4
1.2 无线信道的特性.....	4
1.2.1 无线电频段的划分.....	5
1.2.2 高频信道的特点.....	6
1.2.3 移动信道的特点.....	6
1.3 无线电通信系统原理.....	7
1.3.1 调制与波形.....	7
1.3.2 无线电信号的发送.....	9
1.3.3 无线电信号的接收.....	10
1.4 现代无线电通信新技术.....	10
1.4.1 宽带技术.....	11
1.4.2 软件无线电技术.....	11
1.4.3 认知无线电技术.....	11
1.4.4 现代短波通信技术.....	12
1.5 本课程的特点与学习方法.....	13
思考题与习题.....	14
第 2 章 高频电路基础	15
2.1 无源器件与模型.....	15
2.1.1 导线.....	15
2.1.2 电阻器.....	16
2.1.3 电容器.....	17
2.1.4 电感器.....	17
2.1.5 铁氧体磁珠.....	19
2.1.6 高频二极管.....	20
2.2 有源器件与模型.....	23
2.2.1 高频三极管.....	24
2.2.2 高频场效应管.....	28
2.3 传输线与微带线.....	30
2.3.1 传输线模型.....	30

2.3.2 高频变压器.....	33
2.3.3 传输线变压器.....	36
2.3.4 微带传输线原理.....	37
2.4 Y 参数与 S 参数.....	38
2.4.1 晶体管混合 π 型等效电路.....	38
2.4.2 晶体管 Y 参数等效电路.....	39
2.4.3 Y 参数与混合 π 型参数的 关系.....	40
2.4.4 S 参数与三极管的 Smith 图.....	41
2.5 噪声与噪声系数.....	47
2.5.1 电阻热噪声.....	47
2.5.2 晶体管噪声.....	48
2.5.3 噪声的表示与计算.....	49
2.5.4 集成放大器的噪声分析.....	52
2.5.5 常见噪声的功率谱密度.....	54
2.5.6 减少噪声的措施.....	56
思考题与习题.....	57
第 3 章 选频回路	59
3.1 串并联电路的阻抗转换.....	60
3.1.1 串并联电路的阻抗转换.....	60
3.1.2 实际电容电路的串并转换.....	60
3.1.3 实际电感电路的串并转换.....	61
3.1.4 串并联电路的品质因数.....	61
3.2 串联谐振回路.....	61
3.2.1 回路阻抗与谐振频率.....	61
3.2.2 回路品质因数.....	62
3.2.3 串联谐振回路的能量关系.....	63
3.2.4 幅频与相频特性.....	64
3.2.5 带宽与矩形系数.....	66
3.3 并联谐振回路.....	66
3.3.1 回路阻抗与谐振频率.....	66
3.3.2 回路品质因数.....	67
3.3.3 幅频与相频特性.....	68
3.4 部分接入的选频回路.....	70

3.4.1 信号源与负载对并联回路的影响	70	4.3.5 功率分配与合成	124
3.4.2 变压器耦合部分接入	71	4.3.6 高频功率放大器的设计流程	128
3.4.3 电感耦合部分接入	72	4.4 高效高频功率放大器	129
3.4.4 电容耦合部分接入	73	4.4.1 D类高频功率放大器	130
3.5 双调谐回路	76	4.4.2 E类高频功率放大器	132
3.6 集中选择性滤波器	79	4.4.3 F类高频功率放大器	134
3.6.1 LC集中选择性滤波器	79	思考题与习题	136
3.6.2 石英晶体滤波器	80	第5章 正弦波振荡器与频率合成技术	138
3.6.3 声表面波滤波器	82	5.1 振荡器基础	138
3.6.4 陶瓷滤波器	83	5.1.1 振荡器工作原理	138
思考题与习题	85	5.1.2 正弦波振荡器的指标	143
第4章 高频放大电路	87	5.2 LC振荡器	146
4.1 高频小信号放大器	87	5.2.1 晶体管变压器耦合振荡电路	146
4.1.1 高频小信号放大器的工作原理	88	5.2.2 三点式振荡器的组成原则	148
4.1.2 高频小信号谐振放大器的性能分析	88	5.2.3 电感三点式振荡器	150
4.1.3 小信号谐振放大器的输出功率分析	91	5.2.4 电容三点式振荡器	152
4.1.4 高频小信号宽带放大电路	92	5.2.5 改进的电容三点式振荡器	154
4.1.5 多级谐振放大器	94	5.2.6 LC振荡器的设计方法	155
4.1.6 谐振放大器的稳定性	95	5.3 压控振荡器	157
4.1.7 集成高频小信号谐振放大器	99	5.3.1 压控振荡器工作原理	157
4.1.8 高频小信号放大器的设计	100	5.3.2 压控振荡器的指标	158
4.2 高频功率放大器	104	5.3.3 单片集成压控振荡器的应用	159
4.2.1 静态工作点与功耗	104	5.4 晶体振荡器	160
4.2.2 C类功率放大电路的分析	107	5.4.1 晶体振荡器的类型与电路分析	160
4.2.3 C类高频功率放大器的外特性	113	5.4.2 晶体振荡器设计	163
4.2.4 高频功率放大器的高频效应	116	5.5 负阻振荡器	164
4.3 高频功率放大器的实际电路	118	5.5.1 三点式振荡器的负阻特性	165
4.3.1 直流馈电电路	118	5.5.2 负阻振荡器原理及其电路	165
4.3.2 级间耦合网络与输出匹配网络	120	5.6 锁相频率合成技术	166
4.3.3 高频功率放大器的实际电路	122	5.6.1 锁相环的工作原理	167
4.3.4 晶体管倍频器	124	5.6.2 锁相环路的相位方程	168
		5.6.3 锁相环几个过程的分析	171
		5.6.4 集成锁相环	172
		5.6.5 锁相频率合成的应用	174

5.7 直接数字频率合成原理.....	175	7.2 频率调制电路.....	239
5.7.1 直接数字频率合成原理.....	176	7.2.1 调频电路的指标.....	239
5.7.2 直接数字频率合成器的应用.....	177	7.2.2 直接调频电路.....	240
思考题与习题.....	177	7.2.3 间接调频电路.....	248
第6章 线性频谱搬移.....	182	7.3 调频信号的解调.....	252
6.1 调幅信号分析.....	182	7.3.1 限幅电路概述.....	253
6.1.1 AM信号.....	182	7.3.2 直接鉴频电路.....	256
6.1.2 DSB信号.....	185	7.3.3 斜率鉴频电路.....	257
6.1.3 SSB信号.....	186	7.4 相位鉴频电路.....	259
6.2 线性频谱搬移的数学基础.....	187	7.4.1 相位鉴频原理.....	259
6.2.1 乘法器工作原理与应用.....	188	7.4.2 互感耦合相位鉴频器.....	262
6.2.2 非线性电路分析方法.....	191	7.4.3 电容耦合相位鉴频器.....	266
6.3 振幅调制电路.....	195	7.4.4 比例鉴频器.....	267
6.3.1 二极管调幅电路.....	196	7.5 调频技术与辅助电路.....	269
6.3.2 三极管调幅电路.....	198	7.5.1 单片调频收发机电路.....	270
6.3.3 基于集成器件的调幅电路.....	201	7.5.2 自动频率控制.....	272
6.4 调幅信号的解调.....	202	7.5.3 预加重与去加重电路.....	273
6.4.1 小信号检波电路.....	202	7.5.4 静噪电路.....	273
6.4.2 大信号检波与AGC电路.....	203	7.5.5 调频立体声技术.....	275
6.4.3 同步检波电路.....	212	7.6 集成锁相技术应用.....	276
6.5 混频电路.....	214	7.6.1 锁相调频技术.....	276
6.5.1 混频器工作原理与技术指标.....	214	7.6.2 锁相鉴频原理.....	277
6.5.2 无源混频器.....	217	7.6.3 锁相鉴频电路.....	278
6.5.3 有源混频器.....	218	思考题与习题.....	279
6.5.4 混频器的干扰.....	220	第8章 高频辅助电路.....	283
6.5.5 混频器的设计.....	224	8.1 高频滤波器.....	283
思考题与习题.....	226	8.1.1 集总滤波器类型.....	283
第7章 角度调制与解调.....	230	8.1.2 匹配网络分析.....	287
7.1 角度调制原理.....	230	8.1.3 集总滤波器的设计.....	290
7.1.1 调角信号与频谱.....	231	8.1.4 双工器滤波器.....	294
7.1.2 调频波的信号带宽.....	235	8.2 射频开关与射频信号变换.....	296
7.1.3 调频波与调相波的比较.....	235	8.2.1 射频开关电路.....	296
7.1.4 调幅与调角信号的比较.....	236	8.2.2 衰减器.....	297
7.1.5 窄带调频与宽带调频.....	237	8.2.3 信号转换器.....	298
7.1.6 调相与间接调频.....	237	8.3 通信天线.....	300
7.1.7 扩大调频器线性频偏的方法.....	239	8.3.1 天线结构与分类.....	300
		8.3.2 天线的指标.....	302
		8.4 电磁干扰与散热.....	303
		8.4.1 电磁干扰概述.....	303

8.4.2 电磁干扰抑制..... 304

8.4.3 PCB 布局与布线..... 305

8.4.4 射频屏蔽与散热..... 306

思考题与习题..... 307

第 9 章 无线通信系统设计与测试..... 308

9.1 模拟调制系统的抗噪声性能
分析..... 308

9.1.1 调频信号的信噪比分析..... 308

9.1.2 DSB 调制系统的抗噪声
性能..... 310

9.1.3 SSB 调制系统的抗噪声
性能..... 311

9.1.4 AM 调制系统的抗噪声
性能..... 312

9.2 无线通信系统的结构与指标..... 314

9.2.1 发射机的结构与指标..... 314

9.2.2 接收机指标与结构..... 315

9.3 典型通信系统..... 317

9.3.1 时分双工收发信机..... 318

9.3.2 频分双工收发信机..... 318

9.3.3 GSM 移动通信系统..... 319

9.4 通信线路设计与测试..... 320

9.4.1 链路分析..... 320

9.4.2 接收机前端增益分配..... 323

9.4.3 无线通信系统测试..... 325

思考题与习题..... 325

附录 1 图表索引..... 327

附录 2 余弦脉冲分解系数表..... 333

附录 3 第一类贝塞尔函数..... 335

附录 4 电视接收机中的高频电路..... 338

附录 5 三极管模型与参数..... 341

附录 6 锁相环 NE564 内部电路..... 344

附录 7 微波频段与卫星频段..... 345

参考文献..... 346

第 1 章 绪论

高频电子线路是通信工程、电子信息工程等专业的一门主要技术基础课。随着电子科技的发展,模拟与数字集成电路规模越来越大,其器件尺度越来越小,而工作频率越来越高,如全球定位系统的载波频率达到 $(1\ 227.60\sim 1\ 575.42)$ MHz,C波段的卫星广播频率达到 $(3.7\sim 4.2)$ GHz。然而,现代通信系统所涉及的功能模块与技术,如放大器、振荡器、调制与解调、混频与变频、锁相环等并没有被淘汰,而是以集成手段提高这些模块的性能,即使是在数字技术高速发展的今天,任何无线通信系统仍离不开这些模块,射频信号接收、混频、射频放大与发送等日益成为制约无线通信系统发展的瓶颈。

与系统工作频率相对应,广义的模拟电路分为低频电路、高频电路和射频电路,本书重点介绍工作频率在高频 $[(1.5\sim 30)$ MHz,俗称短波]、超高频段 $[(30\sim 300)$ MHz,俗称超短波]的无线电通信系统的组成、器件模型,发送、接收设备的各个单元电路的工作原理,以及高频电路的理论分析、仿真与设计方法,也部分涉及射频电路的概念与实例。

1.1 无线通信系统概述

高频电路是无线通信系统的基础,是无线通信设备的重要组成部分。

1.1.1 无线通信技术的发展历程

通信已具有悠久的历史,语言、壁画、烟火、竹简、纸书等均是传递信息的方式,如古代理人的烽火狼烟、飞鸽传信、驿马快递。在现代社会中,手语、旗语等仍在使用,但这些都是基于人类的视听觉方式。

基于电磁波是现代无线通信是19世纪中叶以后发展起来的。1837年,美国人塞缪乐·莫尔斯(Samuel Morse)发明了电报;1875年,苏格兰人亚历山大·贝尔(Alexander Graham Bell)发明了电话;1864年,英国人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)发现了电磁波,人类的通信方式就此发生了根本性的变化,以电磁波进行无线通信,开创了人类通信的新时代。1888年,德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz)实验证明了电磁波的存在,其后,俄国的波波夫、意大利的马可尼分别进行了无线电传输实验。从此,无线电通信进入了实用阶段。

1904年,英国电气工程师弗莱明发明了二极管,无线电通信进入了电子学时代。1906

年,美国物理学家费森登成功地研制了无线电广播,1907年,美国物理学家德福莱斯特发明了真空三极管,以此构建了无线电通信重要的功能电路,如放大器、振荡器、变频器、调制器、检波器、波形变换等,加快了无线电通信技术的发展。1918年,美国电气工程师E·H阿姆斯特朗利用电子器件发明了超外差式接收装置;1920年,美国无线电专家康拉德在匹兹堡建立了世界上第一家商业无线电广播电台;1924年,在瑙恩和布宜诺斯艾利斯之间建立了第一条短波通信线路,1933年英法之间实现商用微波无线电路,推动了无线电技术的进一步发展,到1935年成功实现图像信息的无线传输。

1948年,肖特基等人发明了晶体三极管,是电子技术发展史上重要的里程碑。随着电子技术的高速发展,1946年出现了世界上第一台电子计算机,微电子技术极大地推动了通信技术的发展。1948年香农提出信息论理论,建立了通信统计理论,1950年时分多路通信应用于电话系统,1962年第一颗同步通信卫星发射,国际卫星电话开通。同时,计算机网络、程控数字交换机、光纤通信系统等进入实用。特别是20世纪80年代以后,各种无线通信技术不断涌现,光纤通信应用、综合业务数字网、公用数字网、计算机网等纷纷普及,个人通信系统成为了现实。

随着电子信息技术的发展,短波通信技术也得到了快速发展。自适应分集和自适应均衡技术的广泛应用,提高了短波通信的可通率和通信质量,实时信道估值(RTCE)自动在电离层衰落信道条件下捕获最佳传输路径,自适应天线技术和跳频技术进一步克服各种人为干扰,大大提升了短波通信的抗干扰能力,是远距离无线通信的重要方式。

从发明无线电至今,通信技术飞速发展,但其基本组成、单元电路等仍是主要研究内容,高频电子线路所涉及的单元电路、分析方法仍然适用。为方便以后的学习,有必要在本书的开始概述无线电通信系统的传输原理、基本组成以及调制信号分析,以便初步了解各单元电路的功能和相互联系。

1.1.2 无线电通信系统的组成

无线电通信系统是通过发送和接收电磁波来传送信息的。根据传输方式、频率范围、用途等可分为不同的通信系统类型。不同的无线电通信系统,其组成有较大差别,但基本结构一样,图1-1所示为典型的点对点无线电通信系统的基本组成。

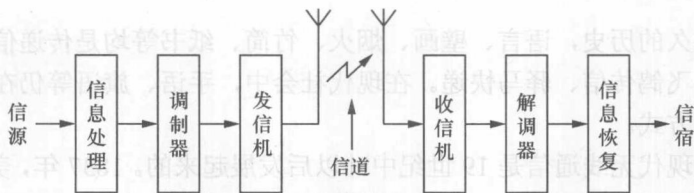


图 1-1 典型无线电通信系统的基本组成

图 1-1 所示的无线电通信系统由信源、调制器、发信机、信道、收信机、解调器和信宿七部分组成。信源将原始的语音、图像信息变化为电信号,如麦克风将声音转化为语音电信号、各种传感器获得的电信号等。这种原始的电信号,在频谱上表现为低频信号,称为基带信号。基带信号通过调制器转化为高频的已调波信号,使之适合信道中的传输,已调波信号大多为带通信号。

高频的已调波信号经过发信机进行功率放大,由发送天线产生电磁波辐射出去;电磁波经过自由空间传播,到达接收天线,在接收天线上感应电流,再通过收信机进行信号放大等处理恢复已调波信号;由接收端的解调器对已调波信号进行解调,恢复原基带信号,并经过信息处理获得信息。

调制就是利用基带信号控制高频信号(简称载波)的振幅、频率或相位,使之随基带信号的振幅大小变化而变化,从而高频信号便携带了基带信号的信息。基带信号通过调制以高频信号发送,一方面大大减小了发射天线的长度(理论上最佳天线长度为波长的 $1/4$),另一方面将基带信号调制到不同的载波发送,使得多路发送基带信号成为可能。因此,调制技术是现代无线通信的基础,也是高频电子线路的核心。

1.1.3 无线电通信系统的类型

根据无线电通信系统的特点,无线电通信系统可分为以下一些类型。

(1) 根据工作频率的不同,分为长波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信。这里工作频率,是指发送和接收的射频频率(又称为载波频率),其选择的标准是适合信道传输,如中波广播为(535~1605)kHz,调频广播为(88~108)MHz,目前载波频率最高已经达到40GHz。

(2) 根据信号传递方向,分为单工、半双工通信和全双工通信三类。单工通信(Simplex Communication)是指发送端仅能发送信息而不能接收、接收端仅能接收信息而不能发送的工作模式,如电报、广播工作模式;半双工通信(Half Duplex Communication)是指收发双方均能发送或接收信息,但不能同时接收或发送信息,如传统的固定电话语音通信,任一时刻只能一端讲话另一端接听,如果双方同时处于讲话状态,则双方均不能接听对方的语音;而全双工通信(Full Duplex Communication)则收发双方可同时接收和发送信息,这是由于单工和半双工模式只有一条传输路径,而全双工模式拥有发送和接收两条传输路径,如计算机的网络传输。

(3) 根据调制方式,分为未调制的基带传输系统和调制的频带传输系统。基带传输系统的传输距离短,频带利用率低,一般应用于简单的短距离数据传输。频带传输系统根据所采用的调制方式分为调幅、调频和调相三种制式。调幅(Amplitude Modulation, AM)是利用基带信号去控制高频载波信号的幅度,使其包络的变化与调制信号的幅度变化规律相同,如中、短波收音机的调制模式;调频(Frequency Modulation, FM)是利用基带信号去控制高频载波频率的变化,使其瞬时频率的变化与调制信号的幅度变化规律相同,如调频广播;调相(Phase Modulation, PM)就是利用基带信号去控制高频载波的相位变化,使其瞬时相位的变化与调制信号的幅度变化规律相同,这种调制方式在模拟通信系统中较少采用,而在数字通信系统中常使用。此外,有些系统将这几种调制方式混合使用,称为混合调制,如全电视信号,其语音信号采用调频方式,图像信号采用调幅方式。

(4) 根据传输的消息类型,分为模拟通信和数字通信,具体的可分为语音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。但无论是模拟还是数字通信系统,其功率放大、发射和接收端(俗称射频前端)仍采用模拟电路实现。从电路上看,现代数字通信系统实际上是数模混合的通信系统。

1.1.4 无线通信系统的指标

无线通信系统的目标是快速、准确地传递信息，信息传输的有效性和可靠性是评价一切通信系统优劣的最主要性能指标，但由于有效性和可靠性是一对矛盾，因此无线通信系统的主要性能指标是从整个系统上综合提出或规定的，一般无线通信系统的性能指标可归纳为以下几个方面。

- (1) 有效性：指无线通信系统传输信息的“速率”问题，即通信容量。
- (2) 可靠性：指无线通信系统传输信息的“质量”问题，包括失真度、误码率和抗干扰能力等。
- (3) 保密性：指系统对所传输的信号进行加密处理，对军用系统、个人通信系统尤为重要。
- (4) 标准性：指系统的接口、各种结构及协议是否合乎国家、国际标准。

对于无线模拟通信系统来说，系统的有效性和可靠性具体可用系统频带利用率（即一个信道能够同时传输独立信号的路数或信道速率）和输出信噪比（或均方误差）来衡量。对于数字通信系统而言，常用误码率和传输速率指标衡量。

传输距离也是有效性指标的一个主要方面，与通信体制、是否中继有关，决定传输距离的主要因素有系统的发送功率、接收机的灵敏度、传输信道的衰减与干扰、噪声等。信道容量与调制解调方式、已调信号的带宽、信道状况及复用方式等有关。

1.2 无线信道的特性

信道（channel）是信号传输的媒介，分为有线信道和无线信道两大类。有线信道包括双绞线（如电话线）、同轴电缆（如有线电视网络）和光纤（光纤通信）等；无线信道是指传输无线电信号的媒介，即通常所说的无线电波，是以空间作为传输介质的信号传送通道，无线电传播方式可分为地波传播、空间波传播和天波传播。无线电波的主要传播方式如图 1-2 所示。

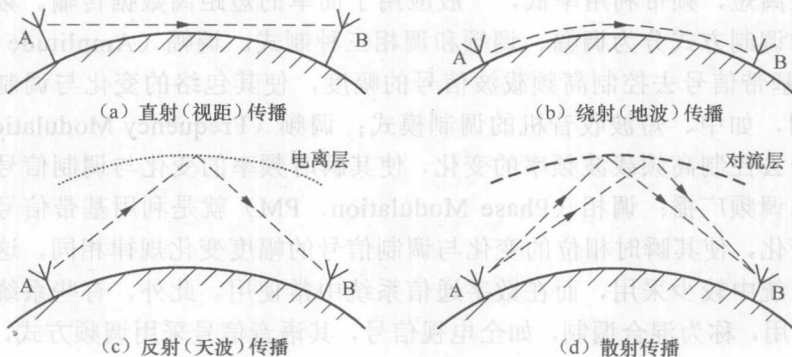


图 1-2 无线电波的主要传播方式

电磁波的频率不同，其传输方式会有所差异。对频率较高的信号，电磁波为直线传输，称为空间波。由于地球曲率的影响，此时的收发天线必须足够高，电磁波才能直达，因此空间波传输也称为视距传输，如图 1-2 (a) 所示，长距离通信时就需要进行中继传输。而对频

率较低信号,电磁波可沿地面传输,称为地波,如图 1-2 (b) 所示,由于波的绕射特性,地波可应用于远程通信。此外,在地球大气层中,从最低层往上依次为对流层、平流层和电离层。在地球表面 10~12km 处的对流层,存在大量随机运动的不均匀介质,能对电磁波产生折射、散射和反射,在地球上空 60km 以上的电离层,可吸收、反射电磁波,利用电磁波在大气层的折射、反射、散射的传输方式称为天波,如图 1-2 (c) 和图 1-2 (d) 所示。

1.2.1 无线电频段的划分

无线电通信是以电磁波为媒介传输信号的。在自由空间中,电磁波以光速传输,其频谱很宽,从低频(几 Hz)到宇宙射线(10^{25} Hz)。按频率大小来分,依次为宇宙射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线和无线电波。可以看出,无线电波可以认为是一种频率相对较低的电磁波,频率范围有限,是一种宝贵的自然资源。

按频率或波长对无线电波进行分段,称为频段或波段。不同频段或波段的无线电波,其传播方式、发送和接收方法、以及应用范围也是不同的,为此,各国和国际组织对无线电频率资源均有专门的法律规范,并进行了分段,如表 1-1 所示。

表 1-1 无线电波的频(波)段划分表

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	传播方式	应用范围
至长波	$10^8 \sim 10^{10}$ m	0.03~3Hz	至低频(TLE)	双线、地波	
极长波	$10^7 \sim 10^8$ m	3~30Hz	极低频(ELF)	双线、地波	潜艇通信
超长波	$10^6 \sim 10^7$ m	30~300Hz	超低频(SLF)	双线、地波	潜艇通信
特长波	$10^5 \sim 10^6$ m	300~3 000Hz	特低频(ULF)	双线、地波	矿山勘探、地震
甚长波	$10^4 \sim 10^5$ m	3~30kHz	甚低频(VLF)	双线、地波	潜艇通信、地球物理勘探、发送标准时间、无线心跳频率检测
长波(LW)	$10^3 \sim 10^4$ m	30~300kHz	低频(LF)	地波	远距离通信、水上移动、无线电导航
中波(MW)	$10^2 \sim 10^3$ m	0.3~3MHz	中频(MF)	地波、天波	广播、通信、导航
短波(SW)	10~100m	3~30MHz	高频(HF)	天波、地波	广播、通信
超短波(VSW)	1~10m	30~300MHz	甚高频(VHF)	直线传播、对流层散射	通信、电视广播、调频广播、雷达
微波	分米波(USW)	10~100cm	特高频(UHF)	直线传播、散射传播	军用航空无线、手机、无线网络、蓝牙、业余无线电、电视广播
	厘米波(SSW)	1~10cm	超高频(SHF)	直线传播	中继和卫星通信、雷达、微波通信
	毫米波(ESW)	1~10mm	极高频(EHF)	直线传播	气象雷达、空间通信、射电天文
	丝米波	1~0.1mm	至高频(THF)	直线传播	

1.2.2 高频信道的特点

如表 1-1 所示,中、长波的传输方式为地波,微波为直线传播,而短波与超短波大部分为天波和对流层散射。由于易受到大气环流、太阳风暴、宇宙射线等环境影响,天波传播的信道非常不稳定。下面结合大气层的构造分析高频信道的特点。

从地面到地球上空的(10~12) km 处,即大气层最底下的一层,空气密度大。地球上主要的天气现象,如云、雨、雪、雹等,均发生在这一层,称为对流层。电磁波在对流层中传播有多种方式:大气折射、波导传播、对流层散射、多径传播、大气吸收,以及水汽凝结体和其他大气微粒的吸收和散射等。按传播范围分为视距传播、超视距传播和地—空传播等,其中,视距传播为直射传播,但受对流层和地面的复杂影响,超视距对流层传播为对流层散射。

对流层散射传播是对流层散射通信的技术基础。对流层散射传输系统,可以实现超视距传输,同时具有适中的传输容量、传输性能和可靠度,以及特别强的抗核爆能力,在各种无线传输系统之中,占据不可替代的特定位置。

在对流层的上面,直到大约 50km 高的这一层,称为平流层。平流层里的空气稀薄,电磁波直线传输,较少受到衰落或干扰,可用作高空信息平台,实现天地空一体化综合信息系统。

从地面以上大约 50km 开始,到大约 1 000km 高的这一层,称为电离层。由于太阳辐射的紫外线穿过大气层时,气体的分子或原子吸收其能量而电离,分离成电子、正离子和负离子,因此,电离层实际上是电子、正离子、负离子和中性粒子等组成的混合体。电离层同时具有吸收和反射无线电波的能力,中、长波段的无线电波在白天几乎全部被电离层吸收,而微波段的无线电波,却不能被电离层反射,而直接穿透电离层射向太空,只有短波段的无线电波,以一定角度射向电离层时,将由电离层反射回地面。反射回地面的无线电波还可能再被反射回电离层,实现多次反射,即“多跳传播”,多跳传播可实现远距离短波无线通信和广播。电离层具有多变的特性,其高度、厚度和电子密度等,会随昼夜、季节、纬度的变化而变化,同时电离层还会受太阳“黑子”活动、太阳表面“耀斑”紫外线辐射等的骚扰。由于电离层的变化不定,导致接收电磁波信号的幅度发生随机性的变化,称为“衰落(Fading)”,如在收听短波广播节目时,声音时高时低,甚至断断续续。电离层的多变性及对电波的吸收作用,将会减弱短波信号,或造成较长时间的通信阻断。同时,当被调制的无线电波信号在电离层内传播时,组成信号的不同频率成分有着不同的传播路径和传播时延,因此会导致波形失真,这就是电离层的色散性。电离层的高度是变化的,甚至发生剧烈变化,会导致电磁波产生附加的频移呈现“多普勒效应”。为了提高短波无线通信的可靠性,人们研制了“自适应短波通信系统”,它具有实时监测传播情况变化、自动选择通信条件最好的工作频率等功能,保证接收信号的稳定。

1.2.3 移动信道的特点

目前,移动通信的工作频段多为分米波段,即特高频段,电磁波的传播方式为直射传播或反射。移动通信信道中,由于基站和移动台之间的反射体、散射体和折射体的数量特别多,电磁波发生散射、反射和折射,引起信号的多径传输,使到达的信号之间相互叠加,其合成

信号幅度表现为快速的起伏变化,称为幅度衰落。电磁波在传播过程中,具有不同的信道时延,这将使接收信号的波形被展宽(称为时延扩展),从而导致接收信号的频率选择性衰落。同时,移动台的运动会产生多普勒频移,并由此引起衰落过程的频率扩散,称为时间选择性衰落。根据衰落特性,信道分为瑞利信道(Rayleigh Channel)和莱斯信道(Rice Channel),前者考虑移动台与基站间不存在直射波信号,接收信号完全由多径反射信号合成;而莱斯信道除考虑多径反射信号外,还有移动台与基站间的直射波信号。

移动通信的信道特性非常复杂,选择性衰落特性严重影响信号传输的可靠性。为了获得满意的通信质量,需要采用各种抗衰落的调制解调技术、编解码接收技术及扩频技术等,其中最广泛使用的是分集接收技术。

1.3 无线电通信系统原理

无线通信系统由发射机、信道和接收机组成。由于无线信道的各种影响,无线电通信必须选择可靠的传输信道。因此,无线电通信大多采用调制技术,将基带信号调制到指定的信道上传输。不同的调制方式,其时域波形是不同的,下面首先讨论不同调制方式的信号波形。

1.3.1 调制与波形

为适合信道传输,降低天线要求,适应多路传输的要求等,无线电传输均采用调制技术。在模拟调制技术中,用基带信号去控制载波信号的振幅、频率或相位的变化,即幅度调制、频率调制和相位调制。基带信号为低频信号,也称为调制信号。

1. 调幅信号

振幅调制,即利用基带信号控制载波信号的幅度变化,调幅波的包络(即振幅)是变化的,且与基带调制信号的变化规律一致。典型调幅信号的调制信号、载波与已调波的时域波形如图 1-3 所示。可以看出,调幅波的包络与调制信号的波形一致,即调制信号控制了载波的幅度变化,而调幅波的频率与载波的相同。

2. 调频信号

频率调制,是利用基带信号控制载波信号的频率变化,因此其瞬时频率按照基带调制信号的变化规律而变化,典型调频信号的调制信号、载波与已调波的时域波形如图 1-4 所示。可以看出,调制信号控制了载波的频率变化,调频波的瞬时频率与调制信号的波形一致,即调制信号的峰值分别对应已调波的最大频率处和最小频率处,而调频波的幅度为常数,与调制信号无关。

3. 调相信号

相位调制,是利用基带信号控制载波信号的相位变化,其瞬时相位与基带调制信号的变化规律一致,典型的调制信号、载波与已调波的时域图如图 1-5 所示。可以看出,调制信号控制了载波的相位变化,调相波的瞬时相位与调制信号的波形一致,调制信号的幅值过零点分别对应已调波的频率最大处和频率最小处,而调相波的振幅保持不变,与调制信号无关。