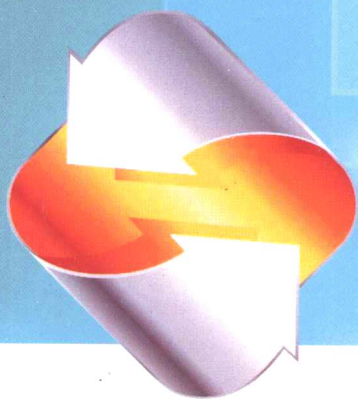


高等学校电子信息类规划教材

01001011011100110110011

100100011010001101010010101

100100011010001101010010101



高频电路原理与分析

(第五版)

曾兴雯 刘乃安 陈健 付卫红 编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

高频电路原理与分析

(第五版)

曾兴雯 刘乃安 陈 健 付卫红 编

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是《高频电路原理与分析(第四版)》的修订版,主要是在《高频电路原理与分析(第四版)》的基础上强化了高频电路的系统概念和系统设计。本书内容包括绪论,高频电路基础与系统问题,高频谐振放大器,正弦波振荡器,频谱的线性搬移电路,振幅调制、解调及混频、频率调制与解调,反馈控制电路,高频电路的集成化与系统设计等。

本书可作为通信工程、电子信息工程等专业的本科生教材,也可作为大专、电大、职大相关专业的教材和有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高频电路原理与分析/曾兴雯等编. —5版. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.1

高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978-7-5606-2952-0

I. ①高… II. ①曾… 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 262170 号

策 划 马乐惠

责任编辑 曹缓缓 马乐惠

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 2013年1月第5版 2013年1月第26次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 22.5

字 数 529千字

印 数 156 501~162 500册

定 价 39.00元

ISBN 978-7-5606-2952-0/TN

XDUP 3244005 - 26

*** 如有印装问题可调换 ***

第五版前言

“高频电路”课程是通信工程、电子信息工程等电子信息类专业的一门非常重要的专业基础课，具有很强的专业性、工程性和系统性。

本书是在2006年8月曾兴雯、刘乃安、陈健编写的21世纪高等学校通信类规划教材《高频电路原理与分析(第四版)》基础上修订而成的。经过几版修订，本书的主要内容和结构基本稳定。本次修订仍然坚持前几版“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”的指导思想和“基础性、实践性、先进性”编写原则，根据近年来专业发展和教学改革的需要，结合选用此书的高校教师的意见和建议，进一步强化了系统性和工程性。第五版主要在以下几方面做了改动：

(1) 在第1章绪论中强化了无线通信系统的组成，以及与高频电子线路的关系，细化了收发信机结构，介绍了无线通信系统的要求和指标，为后面章节单元电路的分析与设计 and 系统设计打下基础。

(2) 在第2章中按照高频电路系统的思路重新梳理了有关内容，强化了系统指标，为后面的系统设计奠定基础。

(3) 在第2章中增加了“高频电路的电磁兼容”一节，与原有的“阻抗变换与阻抗匹配”、“电子噪声与接收灵敏度”和“非线性失真与动态范围”等节的内容共同分析了高频电路的几个主要系统问题。

(4) 为了加强系统性，在第9章中增加了“高频电路系统设计”一节。这部分内容可选择地在课堂上讲授，也可作为参考资料，由学生结合实际自学。

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、高专院校相关专业的教材和有关工程技术人员的参考书。在使用本书时可根据各学校、各专业的具体要求选择相关的内容实施教学。

本书修订过程中，得到了西安电子科技大学通信工程学院有关同事的支持和帮助，在此表示深深的谢意。感谢西安电子科技大学出版社的马乐惠等编辑和其他工作人员对本书修订再版的支持和帮助，感谢所有关心和使用本教材的读者对本书的厚爱和支持。在这里还要感谢我们的家人对本书编写的支持。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2012年8月

于西安电子科技大学

第四版前言

在信息时代飞速发展的今天，对信息的获取、传输与处理的方法越来越受到人们的重视，信息科学技术已成为 21 世纪国际社会和世界经济发展和新的强大推动力。信息作为一种资源，只有通过广泛地传播与交换，促进人们的交流与合作，才能创造和产生出巨大的经济效益。信息的传播与交换是依靠各通信系统实现的。

“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一门非常重要的专业基础课程，有很强的理论性、工程性和实践性，起到了承上启下的作用。它综合利用了“电路基础”、“信号与系统”、“模拟电子线路基础”、以及许多数学基础、物理基础等先期课程的知识，介绍了通信系统的组成、通信系统各个组件的物理概念和在系统中的作用，以及如何实现这些部件，为后续通信专业课程的学习奠定坚实的基础。

本书是在 2001 年曾兴雯、刘乃安、陈健编写的《高频电路原理与分析(第三版)》基础上修订而成的。《高频电路原理与分析(第三版)》是西安电子科技大学多年来在“高频电子线路”的教学和实践中取得的成果和经验的基础上完成的，是多年教学成果的结晶。该书出版后得到了许多专家教授的好评，被几十所国内高校选为教材，在不到五年的时间内发行了 6 万册。

随着科学技术的迅速发展，“高频电子线路”从内容和形式上都发生了很大变化，各相关专业对该门课程的要求也发生了较大变化，编写出符合专业需要、适应科学技术发展的新教材，是我们编写本书的基本原则。“控制篇幅，精选内容，突出重点，便于教学”仍然是我们编写此书的指导思想。在第三版的基础上，根据专业发展和教学实践，以及选用此教材的其他高校教师的意见和建议，对第三版教材进行了一定的修订，在第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 9 章增加了相关的内容，使本书更加完善，可以满足不同读者的不同需求。本书还增加了部分习题参考答案，以便读者在学习过程中使用。

本书由曾兴雯主编，参加编写的还有刘乃安、陈健。刘乃安编写了第 1、2、7、9 章，陈健编写了第 3、4、10 章，曾兴雯编写了第 5、6、8 章。

在本书编写过程中，得到了西安电子科技大学通信工程学院有关专家教授的支持和帮助，在此表示深深的谢意。感谢西安电子科技大学出版社马乐惠、杨宗周编辑及其他工作人员对本书编写和出版的支持和帮助。感谢所有关心和采用本教材的读者对本教材的厚爱和支持。在这里还要感谢我们的家人对本书编写的支持。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2006 年 7 月

于西安电子科技大学

第三版前言

本教材是在1994年杜武林、李纪澄、曾兴雯编写的《高频电路原理与分析(第二版)》基础上修订再版的。

从1999年开始,教育部调整了专业目录,各专业根据教育部调整专业目录的指导思想和各专业的培养目标,制订了教学计划和课程的教学大纲。本教材就是在这样的背景下形成的。修订时的指导思想仍然遵循第一、第二版教材“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”等编写原则。根据专业发展和需求,以及多年来的教学实践,继承和保留了原教材的优点和特点,充实了新的内容,力求反映本门课程的当前状况和发展趋势,以利于教学质量和教学水平的提高。新教材主要作了以下几点调整:

(1) 高频小信号谐振放大器和高频功率谐振放大器安排在同一章,便于比照,以利于教学。同时将高频功率放大器中繁杂的计算删去,重点分析其工作原理、特性和电路组成。

(2) 对第7章频率调制与解调内容进行了调整充实。

(3) 针对反馈控制在系统中的重要作用,对原书的第8章作了较大范围的调整,用“反馈控制电路”代替原来的“锁相环原理及其应用”,内容包括自动增益控制电路、自动频率控制电路、锁相环原理及其应用和频率合成器四部分。

(4) 随着科学技术的发展,高频集成电路成为系统中不可缺少的器件或部件。本书增加了高频集成电路的内容,旨在介绍高频电路的集成化、高频集成电路和高频电路的电子设计自动化(EDA),使学生在此方面有一个较好的基础。

(5) 由于篇幅所限,将第二版的“典型整机线路介绍”删去,学生可在后续课程中了解到有关的知识。

本教材是西安电子科技大学通信工程学院各专业的“高频电子线路”课程教材。

《高频电路原理与分析(第三版)》由曾兴雯主编,参加编写的还有刘乃安和陈健。刘乃安编写了第1、2、7、9章,陈健编写了第3、4章,曾兴雯编写了第5、6、8章。

衷心感谢我们的导师杜武林教授,本教材是在杜教授的指导下,也是在杜教授主编的原教材基础之上完成的。可以说没有原教材,就不可能有本教材的出版。

同时还要感谢本教材前两版的作者张厥盛教授、魏铃教授和李纪澄教授,对他们为本书所做的贡献表示敬意。

由于作者水平有限,教材中难免会有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2001年3月

第二版前言

本书是在1986年杜武林、魏铃、张厥盛编写的《高频电路原理与分析》基础上修订再版的。在初版后的这几年时间里，电子技术有了很大进步，教学改革也有发展，这些都要求本书修订后再版。

修订时的指导思想是在遵循原版教材“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”等编写原则的基础上，根据新的情况和教学经验，进一步精选分立元件电路的内容，充实集成电路的内容，力求反映电子技术的进步，有利于提高教学水平和加强理论联系实际。修订再版时，对以下几方面作了较大的改动。

(1) 全书的结构作了调整。根据长期的教学经验，将高频电路中的共同性基础内容，主要是高频线性电路集中在第二章讲述。其内容有高频电路中的有源器件和无源网络(振荡电路、高频变压器和传输线变压器、石英晶体谐振器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器)，电子噪声等。修订后使这些共同的基础性内容有所加强。

(2) 考虑到振幅调制和解调、混频等，从频率变换原理上讲是共同的，而只是具体电路的实现和性能指标要求上有所不同。为此，将原书第五、六章内容作了调整。第五章讨论共同的频谱线性搬移的变换原理，第六章讨论有关电路。这样做，避免了原书的部分内容重复，同时也加强了非线性变换的概念。

(3) 考虑到集成电路的迅速发展，在高频功放、振荡、混频、各种调制和解调等高频非线性电路各章中，保留了研究集成电路和分立元件电路都必需的各种高频电路原理和分析的基础内容，较多地删去和精选了分立元件的实际电路，较多地增加了各部分集成电路的内容。

(4) 为了加强理论联系实际，本书增加了典型整机线路介绍(第九章)，列举了两种典型通信机的整机框图和部分单元组成电路。这部分内容不在课堂上讲授，可作为参考材料，在学习第三~七章时，指导学生联系整机的实际电中进行分析，以提高实际识图和分析电路的能力。

修订后的本书仍是西安电子科技大学信息工程系各专业的“高频电子线路”课程教材。

本书作为本科班教材时，建议各章教学时数(第九章不安排专门的教学时数)：

章次	1	2	3	4	5	6	7	8
学时数	2	12	10	12	6	10	14	8

共计74学时，并应配有约20学时的实验课。

《高频电路原理与分析》(第二版)仍由杜武林主编。杜武林、李纪澄、曾兴雯负责以下各章的修订和编写，各章的分工如下：杜武林(第一、二、九章)、李纪澄(第三、四、七章)、曾兴雯(第五、六章)；第八章仍是张厥盛同志编写的。

限于作者水平，本书中不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者
1994年1月

第一版前言

本书是西北电讯工程学院信息工程系通信专业的“高频电子线路”课程的教材。在确定教材的内容和深度时，也考虑了无线电技术专业类的需要，因此本书也可作为有关专业的“高频电子线路”、“通信电子线路”、“非线性电路”等课程的教材。在舍去某些章节后，本书也可作为无线电技术专业的大专班、夜大学的教材。

本书主要研究各种无线设备和系统中高频电路的原理、线路和分析方法。随着教学改革的发展和科学技术的迅速发展，“高频电子线路”课程的地位和作用也在不断变化，要求内容不断更新。为此，在编写本教材时，力求达到控制教材篇幅、精选内容、突出重点、便于教学的目的。

在精选内容方面，根据1976年我们编写《无线电通信设备》教材的经验和长期教学实践的体会，本书以典型高频电路为主，着重阐述它们的基本工作原理和基本分析方法，达到掌握和巩固基本概念和提高自行研究分析类似电路的能力。对于一些常用的电路、纯理论性的推导过程，以及一些具体设计步骤之类的内容作了较多的删减。为了在一个学期内以80学时实施完本课程，本书根据高频电路的内在联系，合并了有关章节，控制了教材的篇幅。根据振幅调制和频率调制两种基本调制方式，将调制和解调合并为两章；考虑到电子噪声和高频小信号放大器的有机联系，也合并为一章。作为本书主要内容的非线性电路分析方法，在振幅调制与解调一章中加以讨论。考虑到现代无线电设备中，锁相环作为一个多功能部件用得越来越多，已经成为一个基本的高频单元电路，将锁相环原理及其应用单独成一章。由于振荡回路和传输线变压器在高频电路中用是很多，作为补充知识在第二章附录中介绍。在编写过程中，力求反映集成电路在高频电路中的应用，特别是在低电平电路中的应用。而研究各单元电路时，既考虑了以分立元件为主，也适当结合它们在集成电路中的应用。而对于集成模拟相乘器、集成调频解调器和集成锁相环等内容都作了较充分的介绍。对于一些技术较新、有发展前途的非基本电路，如传输线变压器、高效功放、功率合成、集中选频放大器等作了必要的介绍。在着重讲述单元电路的同时，也尽可能地介绍一些有关整机知识。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程，教材仅为学好课程提供必要的基础，有许多理论知识和实际技能，如实际线路的组成、测量方法和仪器、实际动手能力等，还必须在实践中学习和提高。为此，在实施本课程时，应配有二十学时左右的实验课。

采用本书作本科班教材时，建议各章的学时数为：绪论2学时（复习有关振荡回路和介绍传输线变压器知识，可在绪论课结束后进行，约需4学时），高频功率10学时，振荡器12学时，噪声和小信号放大8学时，调幅和解调12学时，调频与解调14学时，锁相环10学时。

本书由杜武林、魏杍、张厥盛三人共同编写。第一至四章由杜武林执笔；第五至七章由魏杍执笔；第八章由张厥盛执笔。由杜武林负责全书的组织和定稿工作。李纪澄主审了本书。高频教研组的全体同志参加了教材编写计划的讨论和传阅了初稿，并提出了许多宝贵意见。早洪勤、黄书川同志对部分修改稿提出了许多有益意见，在此一并表示谢意。

限于作者水平，本书定会有许多不妥甚至错误之处，恳请本书读者给我们以这方面的反馈信息。

编者
1986年1月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.6.1 合理接地	62
1.1 无线通信系统概述	1	2.6.2 屏蔽与吸收	62
1.1.1 无线通信系统的组成	1	2.6.3 去耦与滤波	63
1.1.2 无线通信系统的类型	4	2.6.4 电路设计	63
1.1.3 无线通信系统的要求与指标	5	思考题与习题	64
1.2 信号、频谱与调制	5	第 3 章 高频谐振放大器	66
1.3 本课程的特点	9	3.1 高频小信号放大器	66
思考题与习题	10	3.1.1 高频小信号谐振放大器的 工作原理	67
第 2 章 高频电路基础与系统问题	11	3.1.2 放大器性能分析	67
2.1 高频电路中的元器件	11	3.1.3 高频谐振放大器的稳定性	69
2.1.1 高频电路中的元件	12	3.1.4 多级谐振放大器	71
2.1.2 高频电路中的有源器件	13	3.1.5 高频集成放大器	72
2.2 高频电路中的组件	15	3.2 高频功率放大器的原理和特性	74
2.2.1 高频振荡回路	15	3.2.1 工作原理	75
2.2.2 高频变压器和传输线变压器	25	3.2.2 高频谐振功率放大器的 工作状态	78
2.2.3 石英晶体谐振器	30	3.2.3 高频功放的外部特性	82
2.2.4 集中滤波器	34	3.3 高频功率放大器的高频效应	85
2.2.5 高频衰减器	37	3.4 高频功率放大器的实际线路	87
2.3 阻抗变换与阻抗匹配	38	3.4.1 直流馈电线路	87
2.3.1 振荡回路的阻抗变换	39	3.4.2 输出匹配网络	88
2.3.2 LC 网络阻抗变换	39	3.4.3 高频功放的实际线路举例	89
2.3.3 变压器阻抗变换	42	3.5 高效功放与功率合成	90
2.3.4 电阻网络阻抗变换	42	3.5.1 D 类高频功率放大器	90
2.4 电子噪声与接收灵敏度	43	3.5.2 功率合成器	94
2.4.1 概述	43	3.6 高频集成功率放大器简介	96
2.4.2 电子噪声的来源与特性	44	附表 余弦脉冲分解系数表	99
2.4.3 噪声系数和噪声温度	49	思考题与习题	101
2.4.4 噪声系数的计算	52	第 4 章 正弦波振荡器	105
2.4.5 噪声系数与接收灵敏度的关系	55	4.1 反馈振荡器的原理	105
2.5 非线性失真与动态范围	56	4.1.1 反馈振荡器的原理分析	105
2.5.1 非线性失真产生的机理	56	4.1.2 平衡条件	106
2.5.2 非线性失真与动态范围	59		
2.5.3 改善非线性失真的措施	60		
2.6 高频电路的电磁兼容	61		

4.1.3	起振条件	107	5.2.2	二极管平衡电路	152
4.1.4	稳定条件	108	5.2.3	二极管环形电路	155
4.1.5	振荡线路举例——互感耦合 振荡器	109	5.3	差分对电路	159
4.2	LC 振荡器	110	5.3.1	单差分对电路	159
4.2.1	振荡器的组成原则	110	5.3.2	双差分对电路	162
4.2.2	电容反馈振荡器	111	5.4	其它频谱线性搬移电路	164
4.2.3	电感反馈振荡器	113	5.4.1	晶体三极管频谱线性搬移 电路	164
4.2.4	两种改进型电容反馈振荡器	114	5.4.2	场效应管频谱线性搬移电路	166
4.2.5	场效应管振荡器	116	思考题与习题	168	
4.2.6	压控振荡器	117	第 6 章 振幅调制、解调及混频	170	
4.2.7	E1648 单片集成振荡器	117	6.1	振幅调制	170
4.3	频率稳定度	118	6.1.1	振幅调制信号分析	170
4.3.1	频率稳定度的意义和表征	118	6.1.2	振幅调制电路	178
4.3.2	振荡器的稳频原理	119	6.2	调幅信号的解调	190
4.3.3	提高频率稳定度的措施	120	6.2.1	调幅解调的方法	190
4.4	LC 振荡器的设计考虑	121	6.2.2	二极管峰值包络检波器	191
4.5	石英晶体振荡器	122	6.2.3	同步检波	201
4.5.1	石英晶体振荡器频率稳定度	122	6.3	混频	204
4.5.2	晶体振荡器电路	123	6.3.1	混频的概述	204
4.5.3	高稳定晶体振荡器	126	6.3.2	混频电路	208
4.6	振荡器中的几种现象	127	6.4	混频器的干扰	216
4.6.1	间歇振荡	127	6.4.1	信号与本振的自身组合干扰	216
4.6.2	频率拖曳现象	128	6.4.2	外来干扰与本振的组合干扰	218
4.6.3	振荡器的频率占据现象	130	6.4.3	交叉调制干扰(交调干扰)	220
4.6.4	寄生振荡	132	6.4.4	互调干扰	221
4.7	RC 振荡器	133	6.4.5	包络失真和阻塞干扰	222
4.7.1	RC 网络	134	6.4.6	倒易混频	222
4.7.2	RC 振荡器	135	思考题与习题	223	
4.7.3	文氏桥振荡器	136	第 7 章 频率调制与解调	231	
4.8	负阻振荡器	137	7.1	调频信号分析	231
4.8.1	负阻型振荡器	137	7.1.1	调频信号的参数与波形	231
4.8.2	负阻性器件	137	7.1.2	调频波的频谱	233
4.8.3	负阻振荡器	139	7.1.3	调频波的信号带宽	235
思考题与习题	140	7.1.4	调频波的功率	236	
第 5 章 频谱的线性搬移电路	144	7.1.5	调频波与调相波的比较	237	
5.1	非线性电路的分析方法	144	7.2	调频器与调频方法	239
5.1.1	非线性函数的级数展开 分析法	145	7.2.1	调频器	239
5.1.2	线性时变电路分析法	147	7.2.2	调频方法	239
5.2	二极管电路	149	7.3	调频电路	241
5.2.1	单二极管电路	150	7.3.1	直接调频电路	241

7.3.2 间接调频电路	249	8.3.4 锁相环路的线性分析	294
7.4 鉴频器与鉴频方法	250	8.3.5 锁相环路的应用	300
7.4.1 鉴频器	250	8.4 频率合成器	302
7.4.2 鉴频方法	251	8.4.1 频率合成器及其技术指标	302
7.5 鉴频电路	257	8.4.2 频率合成器的类型	304
7.5.1 叠加型相位鉴频电路	257	8.4.3 锁相频率合成器	309
7.5.2 比例鉴频器	262	8.4.4 集成锁相环频率合成器	312
7.5.3 正交鉴频器	264	思考题与习题	317
7.5.4 其它鉴频电路	266		
7.5.5 限幅电路	268		
7.6 调频收发信机及特殊电路	269	第9章 高频电路的集成化与	
7.6.1 调频发射机	269	系统设计	320
7.6.2 调频接收机	270	9.1 高频电路的集成化	320
7.6.3 特殊电路	270	9.1.1 高频集成电路的类型	320
7.7 调频多重广播	273	9.1.2 高频电路的集成化技术	321
7.7.1 调频立体声广播	273	9.1.3 高频集成电路的发展趋势	323
7.7.2 电视伴音的多重广播	274	9.2 高频集成电路	325
附表 贝塞尔函数的数值表	275	9.2.1 高频单元集成电路	325
思考题与习题	276	9.2.2 高频组合集成电路	326
		9.2.3 高频系统集成电路	328
第8章 反馈控制电路	280	9.3 高频电路 EDA	331
8.1 自动增益控制电路	281	9.3.1 EDA 技术及其发展	331
8.1.1 工作原理	281	9.3.2 EDA 技术的特征与 EDA	
8.1.2 自动增益控制电路	282	方法	332
8.1.3 AGC 的性能指标	283	9.3.3 EDA 工具	333
8.2 自动频率控制电路	284	9.3.4 高频电路 EDA	335
8.2.1 工作原理	284	9.4 高频电路系统设计	338
8.2.2 主要性能指标	285	9.4.1 系统设计要求和性能指标	338
8.2.3 应用	285	9.4.2 高频系统设计步骤	339
8.3 锁相环的基本原理	286	各章部分习题参考答案	346
8.3.1 工作原理	286	参考文献	348
8.3.2 基本环路方程	287		
8.3.3 锁相环工作过程的定性分析	292		

第1章 绪 论

本书主要讨论用于各种电子系统和电子设备中的高频电子线路。通信系统，特别是无线通信系统，已广泛应用于国民经济、国防建设和人们日常生活的各个领域。通信的目的与任务是传递消息。无线通信系统的一个重要特点就是利用高频(无线电)信号来传递消息。

通信中传递的消息的类型很多，传输消息的方法也很多。现代通信大多以电(或光)信号的形式出现，因此，通常被称作电信。传输电信号的媒质(或介质)可以是有线的，也可以是无线的，而无线的形式最能体现高频电路的应用。尽管各种无线通信系统在所传递消息的形式、工作方式以及设备体制组成等方面有很大差异，但设备中产生、接收和检测高频信号的基本电路大都是相同的。本书将主要结合无线通信来讨论高频电路的线路组成、工作原理和分析、设计、仿真方法。这不仅有利于明确学习基本电路的目的和加强对有关设备及系统的概念，而且对于其它通信系统也有典型意义。

1.1 无线通信系统概述

高频电路是通信系统，特别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 无线通信系统的组成

无线通信(或称无线电通信)的类型很多，可以根据传输方法、频率范围、用途等分类。不同的无线通信系统，其设备组成和复杂度虽然有较大差异，但它们的基本组成不变，图1-1是典型的无线通信系统基本组成方框图。

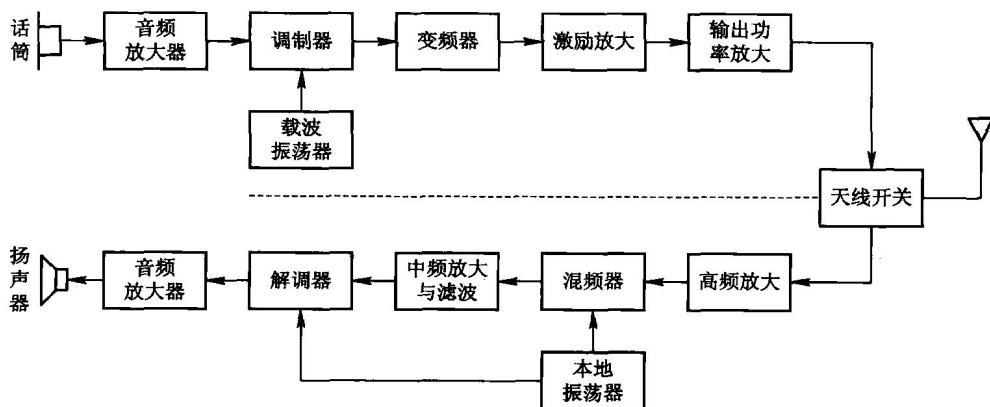


图 1-1 无线通信系统的基本组成

图中虚线以上部分为发送设备(发射机),虚线以下部分为接收设备(接收机),天线及天线开关为收发共用设备。信道为自由空间。话筒和扬声器属于通信的终端设备,分别为信源和信宿。上下两个音频放大器分别是为放大话筒输出信号和推动扬声器工作而设置的,属低频部件,本书不讨论。上面的音频放大器输出的信号控制高频载波振荡器的某个(些)参数,从而实现调制;下面的解调器就是针对上面发射端的调制而进行的检波(调制的逆过程)。已调制信号的频率若不够高,可根据需要进行倍频或上混(变)频;若幅度不够,可根据需要进行若干级(通常有预放、激励和输出三级)放大,经天线辐射出去。接收机一般都采用超外差的形式,在通过高频选频放大(初步的选择放大并抑制其它无用信号)后进行下混(变)频,取出中频后再进行中频放大(主选择放大,具有较大的放大增益和较强的滤波能力)和其它处理,然后进行解调。超外差接收机的主要特点就是由频率固定的中频放大器来完成对接收信号的选择和放大。当信号频率改变时,只要相应地改变本地振荡信号频率即可。

发送设备主要完成调制、上变频、功率放大和滤波等功能,其结构大同小异。根据调制和上变频是否合二为一,发送设备结构分为直接变换结构和两次变换结构两种方式,在每种方式中也都可以采用单通道调制和双通道正交调制方式,图 1-1 中的发射机为典型的一次变频结构。在发送设备中,一般存在两种变换:第一种变换是将信源产生的原始信息变换成电信号,而这一信号的频谱通常靠近零频附近,属于低频信号,称为基带(Baseband)信号;第二种变换称为调制(Modulating),是将基带信号变换成适合在信道中传输的信号形式(一般为射频或高频的带通信号)。调制后的信号称为已调制信号(Modulated Signal),相应的没有进行调制之前的基带信号也可称为调制信号(Modulating Signal)。调制时还需要一个高频振荡信号,称为载波(Carrier),它可由高频振荡器(Oscillator)或频率合成器(Frequency Synthesizer)产生。载波通常为单一频率的正弦信号或脉冲信号。

接收设备的任务主要是有选择地放大空中微弱电磁信号(同时要尽可能保证信息的质量),并恢复有用信息。接收设备的结构通常采用超外差(Super Heterodyne)形式,图 1-1 中的接收机即为一次变频超外差结构。随着设备小型化和系统化,接收设备的结构出现了许多新的形式,如图 1-2 和图 1-3 分别为镜频抑制式和直接变换式(Direct Conversion)或零中频(Zero IF)式接收机结构。不同的接收设备结构有不同的特点。

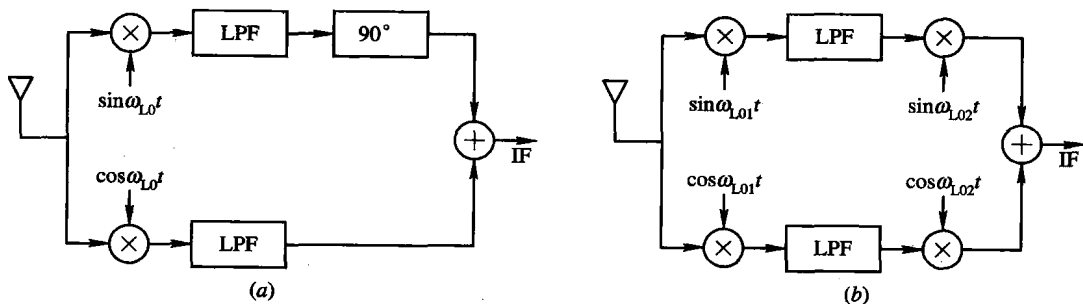


图 1-2 镜像抑制接收机结构
(a) Hartley 结构; (b) Weaver 结构

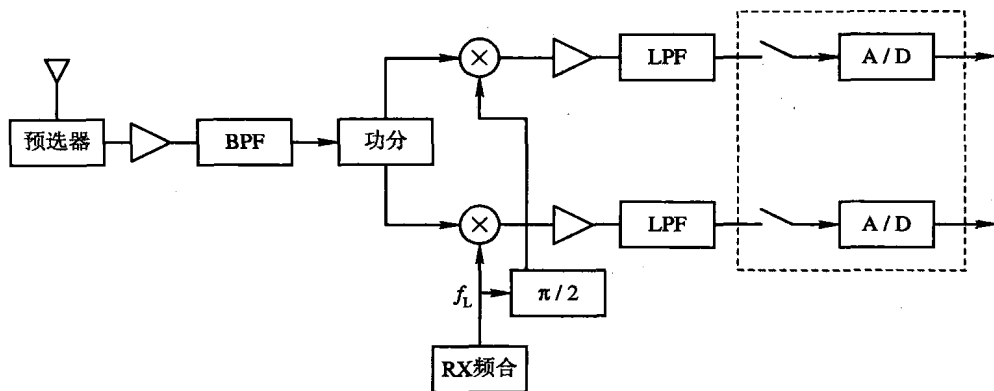


图 1-3 零中频接收机结构

超外差结构的接收设备在接收过程中，将射频输入信号与本地振荡器产生的信号混频或差拍 (Heterodyne)，由混频器后的中频滤波器选出射频信号与本振信号频率两者的和频或差频。超外差接收机可以采用一次变频、两次变频，甚至多次变频，以降低滤波器实现的难度，提高镜像频率抑制能力。传统的超外差接收机采用向下变频 (Down Conversion) 方式，接收信号首先通过混频前的选频网络 (镜像抑制滤波器) 选出所需频率并削弱干扰特别是镜像干扰后，经低噪声放大器放大并送到混频器进行混频，得到中频信号。随着无线通信工作频率的不断提高，高品质因数 Q 的镜像抑制滤波器越来越难以实现，因此，高性能的超外差接收机通常采用多级频率变换结构，使每级变频前后的工作频率之比在 10 左右。中频信号经中频滤波器滤波后再进入自动增益控制 (AGC) 放大器或限幅放大器放大到合适电平，经解调器恢复出基带信号。由于无线信道存在衰落，输入接收机信号电平变化范围很大，需要接收机具有大的动态范围，同时，要求输出信号幅度在尽可能小的范围内波动，这可以通过 AGC 电路实现。这种方式的优点是结构简单、成本低，但对于宽带应用，其前端选频网络不易设计，且当用于较高频段时，前端选频网络的可调谐性也会成为较难克服的问题。

在现代高性能宽带超外差接收机中，通常采用向上变频 (Up Conversion) 方式，并至少需要两次频率变换。其中的多个本振信号的频率稳定度要求较高 (如 $0.5 \sim 1 \text{ ppm}$)，这就需要采用复杂的锁相环或高性能的频率合成电路，也可以采用本振频率漂移抵消设计，但这增加了系统的成本和复杂性。

在超外差接收机中，中频频率是固定的，当信号频率改变时，只要相应地改变本地振荡信号频率即可。通常中频频率相对较低，中频放大器可以获得很高的稳定增益，降低了射频级实现高增益的难度，相应地，AGC 范围也就较大。由于使用高性能的中频滤波器 (通常是晶体滤波器或声表面波滤波器)，接收机的选择性好，抗干扰能力强。超外差结构的最大缺点就是组合干扰频率点多，特别是对于镜像频率干扰的抑制颇为麻烦，因此出现了多种镜频抑制接收方案。其中，Hartley 与 Weaver 变换结构理论上完全消除了镜像响应和镜像噪声，结构也比较简单，然而，这两种方法在实践中都有明显的缺点。Hartley 结构两路信道功率增益失配与相位失配虽然相对较低，但是无法实现宽带中频 (IF) 下变换，要实现宽带固定移相器是相当困难的，且频率越高，难度越大。Weaver 结构是宽带 IF 下变换的基础。第一下变频后的第一中频是固定的，第二中频可以调谐到要求的 IF 频率，但结

构相对复杂，两路信道的失配度相对较大。值得注意的是，这两种结构方案的效用取决于最终实现所得到的镜像抑制度。在实际中，由于两路信道的增益与相位失配，完全抑制镜像信号响应是不可能的。而且随着失配增大，镜像抑制度会降低。实际上，在给定镜像抑制要求情况下，可以在前端预选器和接收机结构之间进行折中设计。

直接变换结构也是按照超外差原理设计的，只是让本地振荡频率等于载频，使中频为零(因此也称为零中频结构)，也就不存在镜像频率，从而也就避免了镜频干扰的抑制问题。接收的信号通过直接变换处理成为零中频的低频基带信号，但不一定经过解调，可能需要在基带上进行同步与解调。另外，直接变换结构中射频部分只有高放和混频器，具有增益低，易满足线性动态范围的要求；由于下变频后为低频基带信号，只需用低通滤波器来选择信道即可，省去了价格昂贵的中频滤波器，体积小、功耗低、便于集成，多用于便携式的低功耗设备中。但是，直接变换结构也存在着本振泄漏与辐射、直流偏移(DC Offset)、闪烁噪声、两支路平衡与匹配问题等缺点。

直接变换结构是软件无线电(Software Radio)的基础前端电路结构，而且往往采用正交方式。

在接收设备中有相应的两种反变换。将接收到的已调信号变换(恢复)为基带信号的过程称为解调(Demodulating)，把实现解调的部件称为解调器(Demodulator)。解调时一般也需要一个本地的高频振荡信号，称为恢复载波(或插入载波)。有时将收发设备中的调制器和解调器合称为调制解调器(Modem)。

由上面的例子可以总结出无线通信系统的基本组成，从中也可看出高频电路的基本内容(高频前端)应该包括：

- (1) 高频振荡器(信号源、载波信号或本地振荡信号)；
- (2) 放大器(高频小信号放大器及高频功率放大器)；
- (3) 混频或变频(高频信号变换或处理)；
- (4) 调制与解调(高频信号变换或处理)。

在无线通信系统中通常需要某些反馈控制电路，这些反馈控制电路主要是自动增益控制(AGC)或自动电平控制(ALC)电路，自动频率控制(AFC)电路和自动相位控制(APC)电路(也称锁相环PLL)。此外，还要考虑高频电路中所用的元件、器件和组件，以及信道或接收机中的干扰与噪声问题。需要说明的是，虽然许多通信设备可以用集成电路(IC)来实现，但是上述的单元电路通常都是由有源的和无源的元器件构成的，既有线性电路，也有非线性电路。这些基本单元电路的组成、原理及有关技术问题，就是本书的研究对象。

应当指出，实际的通信设备比上面所举例子要复杂得多。比如发射机的振荡器和接收机的本地振荡器就可以用更复杂的组件——频率合成器(FS)来代替，它可以产生大量所需频率的信号。

1.1.2 无线通信系统的类型

无线通信系统的类型，可以根据不同的方法来划分。按照无线通信系统中关键部分的不同特性，有以下一些类型：

(1) 按照工作频段或传输手段分类，有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信和卫星通信等。所谓工作频率，主要指发射与接收的射频(RF)频率。射频实际上就是“高频”

的广义语，它是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向就是开辟更高的频段。

(2) 按照通信方式来分类，主要有(全)双工、半双工和单工方式。所谓单工通信，指的是只能发或只能收的方式；半双工通信是一种既可以发也可以收但不能同时收发的通信方式；而双工通信是一种可以同时收发的通信方式。图 1-1 的例子是半双工方式，将天线开关换成双工器就成了双工方式。

(3) 按照调制方式的不同来划分，有调幅、调频、调相以及混合调制等。

(4) 按照传送的消息的类型分类，有模拟通信和数字通信，也可以分为话音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

各种不同类型的通信系统，其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同。但是组成设备的基本电路及其原理都是相同的，遵从同样的规律。本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路，认识其规律。这些电路和规律完全可以推广应用到其它类型的通信系统。

1.1.3 无线通信系统的要求与指标

无线通信系统的基本特性主要体现在有效性和可靠性两方面。有效性就是指空间、时间、频率的利用率，主要用传输距离和通信容量(信道容量)指标来衡量；而可靠性主要用信号失真度、误码率、抗干扰能力等指标衡量。

传输距离是指信号从发送端到达接收端并能被可靠接收的最大距离，它与采用的通信体制和是否中继有关。在无中继的情况下，传输距离决定于发送端的信号功率、信号通过信道的损耗、信号通过信道混入的各种形式的干扰和噪声以及接收机的接收灵敏度。通信容量是指一个信道能够同时传送独立信号的路数或信道速率。影响信道容量的因素包括已调信号所占有的频带宽度、系统采用的调制方式、信道条件(信噪比和信干比)和信道的复用(多址)方式以及网络结构等。

信号失真度指的是接收设备输出信号不同(失真)于发送端基带信号的程度。产生信号失真的原因主要包括信道特性不理想和对信号进行处理的电路(发送与接收设备)特性不理想。信号通过信道时，总要混入各种形式的干扰和噪声，使接收机输出信号的质量下降，通信系统抵抗这种干扰的能力称为通信系统的抗干扰能力。提高通信系统抗干扰能力的技术主要包括技术体制中采用的抗干扰措施、系统设计中提高的抗干扰能力和选用高质量的调制和解调电路等几方面。

1.2 信号、频谱与调制

在高频电路中，我们要处理的无线电信号主要有三种：基带(消息)信号、高频载波信号和已调信号。这些无线电信号有多方面的特性，主要有时间(域)特性、频率特性、频谱特性、调制特性、传播特性等。

1. 时间特性

一个无线电信号，可以将它表示为电压或电流的时间函数，通常用时域波形或数学表达式来描述。对于较简单的信号(如正弦波、周期性方波等)，用这种方法表示很方便。