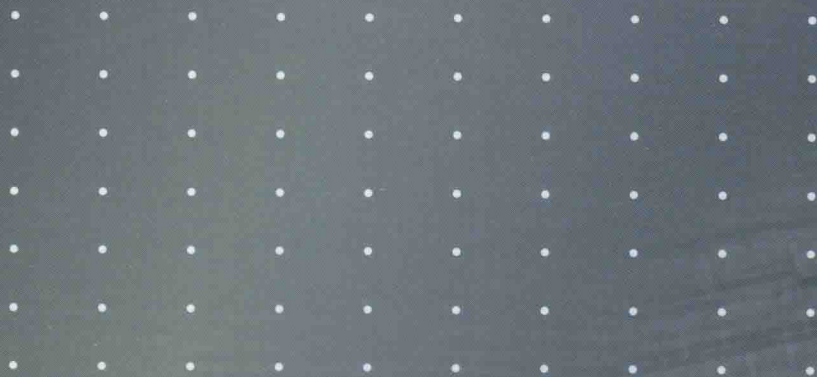


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 高频电子线路 第三版

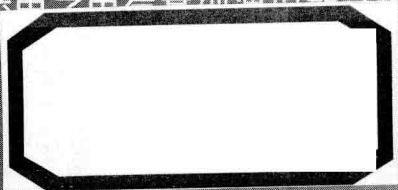
■ 曾兴雯 主 编

■ 曾兴雯 刘乃安 陈 健 付卫红 编



高等教育出版社

教育部高等学校电子与信息基础课程教学指导分委员会推荐教材



# 高频电子线路

第三版

GAOPIN DIANZI XIANLU

■ 曾兴雯 主 编

■ 曾兴雯 刘乃安 陈 健 付卫红 编



高等教育出版社·北京

## 内容简介

“高频电子线路”是通信工程、电子信息工程及其相关专业重要的专业基础课程。本书从系统原理入手,以分立元件讲述单元电路原理与设计,最后以集成电路为例讨论系统设计。本书内容包括绪论,高频电路基础,高频放大器,正弦波振荡器,频谱的线性搬移电路,振幅调制、解调与混频,角度调制与解调,反馈控制电路和高频电路系统设计等9章。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/曾兴雯主编;曾兴雯等编.--3版

--北京:高等教育出版社,2016.3

ISBN 978-7-04-044770-5


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(2016)第020543号

策划编辑 吴陈滨      责任编辑 吴陈滨      封面设计 赵阳      版式设计 童丹  
插图绘制 杜晓丹      责任校对 陈旭颖      责任印制 刘思涵

---

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街4号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	山东鸿君杰文化发展有限公司		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16	版 次	2004年1月第1版
印 张	25.25		2016年3月第3版
字 数	620千字	印 次	2016年3月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	36.70元
咨询电话	400-810-0598		



---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 44770-00

## 第三版前言

本书第一版为普通高等教育“十五”国家级规划教材,第二版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书是教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材,是在第二版的基础上,结合近年来的技术发展和教学实践修订而成。

作为通信工程、电子信息工程等相关电子信息类专业的核心专业基础课程,如何面对科学技术的飞速发展,如何将最新的科学技术成果引入课程,又不失课程的基础性,即在保证课程基础性的前提下,体现科学技术的发展和最新的技术成果,是我们在教学过程中不断探索和思考的问题,是业内同行十分关心的问题,也是“高频电子线路”这门课程发展方向的问题。我们试图将思考和实际的课程讲授反映在本教材之中,与业内同行共同研究和探讨。

通过多年的教学实践和工程应用,在国家精品课程和国家精品资源共享课程的建设中,我们认为:配套本教材的课程体系已经形成,相关课程的知识与能力结构衔接比较好,针对“高频电子线路”课程的基本内容变化不多,但随着技术的发展和需求的变化,高频电子线路方面出现了一些变化,主要体现在新的元器件与芯片、各种物理层新技术的出现,射频带宽的宽带化,功能强大的设计与仿真工具,封装与装配工艺和新的测试技术等。同时,也存在着一些问题,如关键实际电路和工程设计,特别是系统设计强调和训练不够,针对工程教育专业认证要求的解决复杂工程问题的能力涉及不足。

针对以上现状,本次修订在坚持“控制篇幅,精选内容,突出重点,便于教学”指导思想和“基础性、实践性、先进性”编写原则的基础上,进一步强化工程性和实用性,着重强调系统性,以及本课程在专业培养方案中的作用和地位,针对课程特点,从系统原理入手,以分立元件讲述单元电路原理与设计以及在系统中的地位与作用,最后回到系统,以集成电路为例讨论系统设计,即贯彻“系统—电路—系统”的课程建设指导思想。本次修订主要在以下几方面做了较大改动。

1. 以无线通信系统为主线,进一步强化无线收发信机的结构、电路组成和系统指标,并在绪论中介绍高频电路的发展趋势。
2. 明确高频电路的特点,清楚解析高频电路中的两个重要基础问题——阻抗匹配与阻抗变换和非线性。
3. 增加实际电路和新型元器件特别是集成电路的内容以及高频电路工程实现的内容。
4. 精简内容,强化系统设计,删去“高频电路新技术”一章(部分内容分散到其他各章节)和“整机线路分析的内容”,专设“高频电路系统设计”一章,并以示例加以介绍。
5. 精选习题,增加具有扩展性和深度的思考题。

本教材可作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的教材,或者作为有关工程技术人员的参考书。在使用本教材时可根据各学校、各专业的具体要求选择本教材的内容实施教学。

本书由曾兴雯主编,并编写了第五、六、七章,刘乃安编写了第一、二、八、九章,陈健编写了第三、四章,付卫红选编了思考题和练习题。

本教材修订过程中,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。王永生教授在百忙中审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,在此深表感谢!感谢高等教育出版社编辑对本教材修订再版的支持和帮助。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,本书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者邮箱为 [xwzeng@mail.xidian.edu.cn](mailto:xwzeng@mail.xidian.edu.cn)。

编 者

2015年6月 于西安电子科技大学

## 第二版前言

本书是在2004年1月出版的普通高等教育“十五”国家级规划教材《高频电子线路》的基础上编写的,为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

第二版仍然坚持“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”的编写原则,根据专业发展和教学改革的成果,进一步加强实践性和实用性,深化先进性,强调系统性。第二版主要在以下几方面做了较大改动。

1. 在第一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,介绍了无线信道的特性,为后面单元电路的分析与设计、整机线路分析与系统设计打下基础。

2. 第二章中修改了“噪声系数与接收机灵敏度”部分的内容,讨论了最小可检测信号的概念及其与接收机灵敏度和动态范围的关系,为后面的系统设计奠定基础。

3. 第三章中增加了“低噪声小信号放大器的设计”和“功率放大器线性化技术”两节,在第四章中增加了“负阻振荡器”一节,将原来第二节中的“压控振荡器”充实,成为单独一节。

4. 根据调频电路的分类,第七章中将原来的“调频电路”扩编成“变容二极管直接调频电路”、“其他直接调频电路”和“间接调频电路”三节,将“相位鉴频器电路”单独成节,强化了电路及其实用性。

5. 在第八章中充实了AGC和AFC的原理,增加了锁相环非线性分析和小数分频频率合成的内容。第九章充实了软件无线电技术及其应用方面的内容。

6. 为了加强系统性,并考虑到高频电子线路主要应包括电路分析和设计两方面的内容,第十章重点讨论整机线路分析和系统设计,增加了“系统设计”一节。这部分内容既可有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,也可作为大专、电大、职大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本书的内容实施教学。

本书由曾兴雯主编,并编写了第五、六、七章,刘乃安编写了第一、二、八、十章,陈健编写了第三、四章,付卫红编写了第九章并选编了思考题与练习题。

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。感谢高等教育出版社对本书修订再版的支持和帮助。在这里还要感谢我们的家人对本书编写的支持。

由于编者水平有限,本书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年3月 于西安电子科技大学

# 第一版前言

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的新的强大推动力。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重要的专业基础课程,有很强的理论性、工程性和实践性。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,是我们编写本教材的基本原则。根据我们多年的教学和科研实践,对高频电子线路的内容和重点有了较深刻的认识,在参考了国内外有关教材的基础上,确定了本教材“控制篇幅,精选内容,突出重点,便于教学”的编写指导思想。

随着科学技术的发展,专业的教学计划需要调整,课程的内容和形式也必须随之而调整,要不断地引进新的思想、新的技术和新的器件,更新内容。作为一门专业基础课教材,本书在强调课程的基本概念、基本原理、基本电路和基本分析方法的基础上,与科学技术的发展紧密结合,将本课程所涉及的新技术、新器件(部件)充实其中,既强调了基础性、实践性,又不失其先进性。

全书共分十章。

第一章为绪论,主要介绍通信系统的组成、通信系统的一些基本概念、本课程的特点和难点等。

第二章为高频电子线路基础,主要介绍高频电路中的元器件和基本电路,重点在谐振回路。本章另一个内容是电子噪声,介绍了电子噪声的来源与特性、噪声系数和噪声温度的概念、计算方法和用途。

第三章为高频谐振放大器,主要内容有高频小信号放大器的工作原理、性能指标、稳定性,高频集成放大器等;高频功率谐振放大器的工作原理、分析方法、外部特性、实际线路等。

第四章介绍正弦波振荡器的原理、LC 振荡器的原理和实际线路、晶体振荡器、振荡器的频率稳定性分析等。

第五章主要介绍频谱的线性搬移电路的原理和线路组成,包括二极管电路、差分对电路、晶体管和场效应管电路。

第六章介绍振幅调制、解调和混频的原理和实现方法。振幅调制、解调和混频均属于频谱的线性搬移,在实现方法上是相同的。第五章和第六章属于同一单元,第五章为第六章具体频谱搬移电路的实现打基础。

第七章介绍角度调制,重点是频率调制和解调的原理、实现方法。频率调制与解调是频谱的非线性搬移,其实现方法有别于频谱的线性搬移。相位调制的原理与电路与频率调制相似。

第八章介绍反馈控制电路,包括自动增益控制电路、自动频率控制电路、锁相环和频率合成器电路的原理和实现电路。

第九章介绍高频电路的新技术,主要有高频集成电路、高频电路 EDA 及软件无线电技术等。

第十章介绍典型整机电路。

本书由曾兴雯主编,参加编写的还有刘乃安、陈健。刘乃安编写了第一、二、七、九章,陈健编写了第三、四、十章,曾兴雯编写了第五、六、八章。

本书是在我校其他老师的工作基础上和支持下完成的。首先要感谢我们的恩师杜武林教授,可以这样说,没有杜教授的支持和为我们打下的基础,就不可能有本书的出版,我们以此书的出版献给我们敬爱的杜武林教授。同时要感谢张厥盛教授、魏矜教授和李纪澄教授,对他们为本书的贡献表示敬意。

西北工业大学的王永生教授在百忙中审阅了本书,提出了很好的意见和建议,对此我们表示深深的谢意。

由于作者水平有限,本书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月 于西安电子科技大学



## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

第一章 绪论	1	二、噪声系数的计算	54
第一节 无线通信系统概述	1	三、噪声系数的测量	59
一、无线通信系统的组成原理	1	四、噪声温度	60
二、无线通信中的信号与调制	2	思考题与练习题	61
三、无线通信系统的类型	6	第三章 高频放大器	63
四、无线通信系统的要求与指标	7	第一节 高频小信号谐振放大器	63
第二节 射频前端结构	8	一、高频小信号谐振放大器的工作 原理	63
一、发信(射)机结构	9	二、放大器性能分析	64
二、接收机结构	9	三、高频谐振放大器的稳定性	66
三、天线	12	四、多级谐振放大器	69
第三节 高频电子线路发展趋势	12	五、高频集成放大器	70
一、高频集成电路发展趋势	13	第二节 低噪声小信号放大器的设计	72
二、高频电路 EDA	15	一、半导体器件及其工作点选择	73
第四节 本课程的特点与学习方法	16	二、放大器噪声匹配网络的设计	74
思考题与练习题	18	三、电容、电感选择	75
第二章 高频电路基础	19	四、其他	76
第一节 高频电路中的基本元器件	19	第三节 高频功率放大器的原理 与特性	76
一、高频电路中的元件	19	一、高频功率放大器的工作原理	77
二、高频电路中的有源器件	21	二、高频谐振功率放大器的工作 状态	80
第二节 高频电路中的基本电路	23	三、高频功率放大器的外部特性	82
一、高频振荡回路	23	第四节 高频功率放大器的高频效应	88
二、高频变压器和传输线变压器	33	一、少数载流子的渡越时间效应	88
三、石英晶体谐振器	37	二、非线性电抗效应	89
四、集中滤波器	41	三、发射极引线电感的影响	89
五、衰减器与匹配器	43	四、饱和压降的影响	89
第三节 电子噪声及其特性	46	第五节 高频功率放大器的实际线路	90
一、概述	46	一、直流馈电线路	90
二、电子噪声的来源与特性	46	二、输出匹配网络	92
第四节 噪声系数和噪声温度	53		
一、噪声系数	53		

三、推挽连接线路 .....	96	二、晶体管选择 .....	138
四、高频功率放大器的实际线路		三、直流馈电线路选择 .....	138
举例 .....	97	四、振荡回路元件选择 .....	139
第六节 功率放大器线性化技术 .....	98	五、反馈回路元件选择 .....	139
一、功率回退法 .....	100	第五节 石英晶体振荡器 .....	139
二、预失真线性化法 .....	100	一、石英晶体振荡器频率稳定度 .....	139
三、前馈法 .....	101	二、晶体振荡器电路 .....	140
四、负反馈法 .....	102	三、高稳定度晶体振荡器 .....	143
五、包络消除与恢复法 .....	102	四、MEMS 硅晶振简介 .....	144
第七节 高效功率放大器、功率合成		第六节 负阻振荡器 .....	145
与射频模块放大器 .....	103	一、负阻振荡器原理 .....	145
一、D 类高频功率放大器 .....	103	二、负阻器件 .....	146
二、E 类高频功率放大器 .....	107	三、负阻振荡器电路 .....	147
三、功率合成器 .....	108	第七节 压控振荡器 .....	148
四、射频模块放大器 .....	110	第八节 振荡器中的几种现象 .....	152
思考题与练习题 .....	118	一、间歇振荡 .....	152
第四章 正弦波振荡器 .....	121	二、频率拖曳现象 .....	153
第一节 反馈振荡器的原理 .....	121	三、频率占据现象 .....	155
一、反馈振荡器的原理分析 .....	121	四、寄生振荡 .....	157
二、平衡条件 .....	122	思考题与练习题 .....	158
三、起振条件 .....	123	第五章 频谱的线性搬移电路 .....	164
四、稳定条件 .....	124	第一节 非线性电路的分析方法 .....	164
五、振荡电路举例——互感耦合		一、非线性函数的级数展开分析法 .....	165
振荡器 .....	125	二、线性时变电路分析法 .....	167
第二节 LC 振荡器 .....	125	第二节 二极管电路 .....	169
一、LC 振荡器的组成原则 .....	125	一、单二极管电路 .....	169
二、电容反馈振荡器 .....	127	二、二极管平衡电路 .....	172
三、电感反馈振荡器 .....	129	三、二极管环形电路 .....	174
四、两种改进型电容反馈振荡器 .....	130	第三节 差分对电路 .....	179
五、场效应管振荡器 .....	132	一、单差分对电路 .....	179
六、单片集成振荡器举例 .....	133	二、双差分对电路 .....	182
第三节 振荡器的频率稳定度 .....	135	第四节 其他频谱线性搬移电路 .....	186
一、频率稳定度的意义和表征 .....	135	一、晶体管频谱线性搬移电路 .....	186
二、振荡器的稳频原理 .....	136	二、场效应管频谱线性搬移电路 .....	188
三、提高频率稳定度的措施 .....	137	思考题与练习题 .....	189
第四节 LC 振荡器的设计方法 .....	138	第六章 振幅调制、解调及混频 .....	192
一、振荡器电路选择 .....	138	第一节 振幅调制 .....	192

一、振幅调制信号分析 .....	192	一、鉴频器的性能指标 .....	282
二、振幅调制电路 .....	199	二、直接鉴频 .....	284
第二节 调幅信号的解调 .....	212	三、间接鉴频 .....	285
一、调幅信号解调的方法 .....	212	第七节 相位鉴频器电路 .....	295
二、二极管峰值包络检波器 .....	214	一、互感耦合相位鉴频器 .....	295
三、同步检波 .....	224	二、电容耦合相位鉴频器 .....	299
第三节 混频 .....	228	三、比例鉴频器 .....	300
一、混频概述 .....	228	第八节 调频收发信机及附属电路 .....	303
二、混频电路 .....	232	一、调频发信机 .....	303
三、软件无线电中的数字混频器 .....	241	二、调频接收机 .....	304
第四节 混频器的干扰 .....	241	三、附属电路与特殊电路 .....	306
一、信号与本振的自身组合干扰 .....	242	第九节 调频多重广播 .....	309
二、外来干扰与本振的组合干扰 .....	243	一、调频立体声广播 .....	309
三、交叉调制干扰(交调干扰) .....	245	二、电视伴音的多重广播 .....	311
四、互调干扰 .....	246	思考题与练习题 .....	311
五、包络失真和阻塞干扰 .....	247	第八章 反馈控制电路 .....	317
六、倒易混频 .....	248	第一节 自动增益控制电路 .....	318
思考题与练习题 .....	249	一、AGC 电路原理 .....	319
第七章 角度调制与解调 .....	257	二、AGC 电路 .....	321
第一节 角度调制信号分析 .....	258	三、增益控制电路 .....	323
一、调频信号分析 .....	258	第二节 自动频率控制电路 .....	325
二、调相信号分析 .....	264	一、AFC 电路的组成原理 .....	325
三、调频信号与调相信号的比较 .....	265	二、AFC 在通信电子电路中的	
第二节 调频方法 .....	266	应用 .....	327
一、调频方法 .....	266	第三节 锁相环路 .....	328
二、调频电路的调频特性 .....	268	一、锁相环的基本原理 .....	329
第三节 变容二极管直接调频电路 .....	269	二、锁相环工作过程的定性分析 .....	333
一、变容二极管 .....	269	三、锁相环的线性分析 .....	336
二、变容二极管直接调频电路 .....	270	四、锁相环的非线性分析 .....	342
第四节 其他直接调频电路 .....	276	五、锁相环在通信电子线路中的	
一、晶体振荡器直接调频电路 .....	276	应用 .....	344
二、张弛振荡器直接调频电路 .....	277	第四节 频率合成器 .....	346
第五节 间接调频电路 .....	278	一、频率合成器及其技术指标 .....	346
一、回路参数调相电路 .....	278	二、频率合成方法 .....	347
二、RC 网络调相电路 .....	280	三、锁相频率合成器 .....	354
三、可变延时法调相电路 .....	281	四、集成锁相频率合成器 .....	357
第六节 调频信号的解调 .....	282	思考题与练习题 .....	361

---

第九章 高频电路系统设计 .....	364	一、WLAN 系统链路预算与指标 分配 .....	376
第一节 高频电路系统设计方法 .....	364	二、WLAN 射频电路系统实现 .....	379
一、系统总传输损耗 .....	364	三、WLAN 射频电路中的关键技术 ...	385
二、链路预算与系统设计 .....	367	思考题与练习题 .....	387
三、接收机设计与指标分配 .....	369	参考文献 .....	388
四、发射机设计与指标分配 .....	374		
第二节 WLAN 射频电路系统设计 .....	376		

# 第一章

## 绪 论

随着技术的飞速发展,无线通信系统和基于无线通信的4G移动通信、物联网、移动互联网等技术,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。实现无线通信的关键就是利用高频(射频)信号来实现信息传输。本书将主要结合无线通信来讨论用于各种电子与通信系统及其设备中的高频电子线路,特别是高频电路的线路组成、工作原理和分析、设计以及相关工程技术问题。

### 第一节 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。

#### 一、无线通信系统的组成原理

麦克斯韦(Maxwell)在1861年从理论上预言了电磁波的存在,通过1888年赫兹(Hertz)的火花放电实验得以证明。从1896年马可尼(Marconi)的无线通信实验开始,出现了无线通信技术,并逐步涉及陆地、海洋、航空、航天等固定和移动无线通信领域。现在的无线通信技术已相当成熟,并还在继续发展。

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、用途等来分类。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是典型的点对点双向无线通信系统基本组成示意图。

图1-1所示示意图中发送链路和接收链路都由前端电路、后端电路和用户电路三部分组成。用户电路属于信源和信宿设备,用来产生或接收信息,如语音通信的话筒将声音变换为电信号,扬声器将接收到的电信号变换为声音。发送端用户电路的这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。基带信号可以是模拟的、脉冲式的或数字式的信号,但只是对原始信息的直接映射,没有附加任何信息。基带信号对于传输系统的设计者来说通常都具有不可预知的特性。为了压缩信息带宽,可以对此基带信号进行信源编码。不同的通信业务,有不同的用户电路。用户电路及其相关低频电路不是本书讨论的内容。

对于通常的电子系统,后端电路可以简化甚至省略,而对于通信系统,对信号的处理通常是调制(Modulation)和解调(Demodulation)。发送链路中的调制,是将基带信号变换成适合在信道中传输的信号形式。调制后的信号称为已调信号(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)。已调信号通常为射频或高频的带通信号,但也可在基带上实现数字调制或星座映射。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。实现调制的电路称为

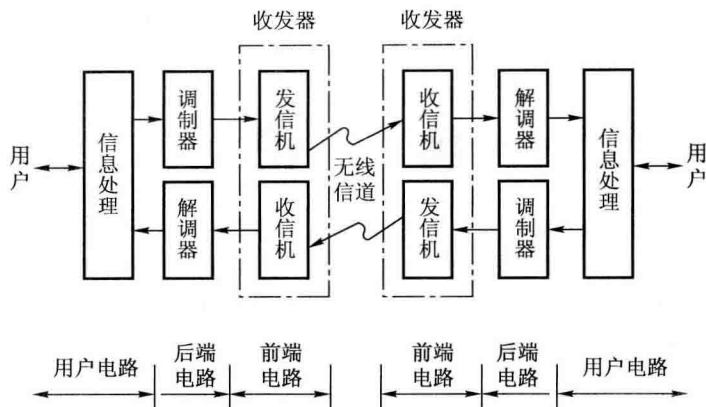


图 1-1 典型的点对点双向无线通信系统基本组成示意图

调制器 (Modulator)。在接收链路中,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,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)。

前端电路主要包括发信机(发射机)、收信机(接收机)、天线和馈线(有时将直接调制的调制器也归于前端电路)以及一些辅助或支持电路等。由于前端电路一般工作于射频(高频),因此,前端电路通常称为射频前端或射频收发器(收发信机)。发信机将调制后的信号变换到频率较高的载波上,使所传送信号的时域和频域的特性更好地满足信道的要求,与信道特性相匹配。接收机将动态范围很宽的射频信号由高频变换到适宜处理的低频。接收机接收到的是高频、小信号、大动态范围和低信噪比的信号,因此,接收机通常采用高精度的滤波器、低噪声放大器和混频器等模拟电路。天线用来实现射频信号的有效辐射与接收。在前端电路中进行复杂的频率变换的目的,除了方便实现干扰抑制、电平变换之外,最主要的就是在天线尺寸合理的条件下得到足够高的辐射和接收效率。

## 二、无线通信中的信号与调制

### 1. 无线通信中的信号

无线通信是靠电磁波实现信息传输的。自然界中存在的电磁波的波谱很宽,如图 1-2 所示,无线电波和光波都属于电磁波。在自由空间中,波长与频率存在以下关系

$$c = f \lambda \tag{1-1}$$

式中, $c$  为光速, $f$  和  $\lambda$  分别为无线电波的频率和波长,因此,无线电波也可以认为是一种频率相对较低的电磁波,无线电波的频率是一种不可再生的重要资源。

对频率或波长进行分段,分别称为频段(或波段)。不同频段信号的产生、放大和接收的方法不同,传播的能力和方式也不同,因而它们的分析方法和应用范围也不同。表 1-1 列出了无线电波的频(波)段划分、主要传播方式和用途等。表中关于频段、传播方式和用途的划分是相对而言的,相邻频段间无绝对的分界线。

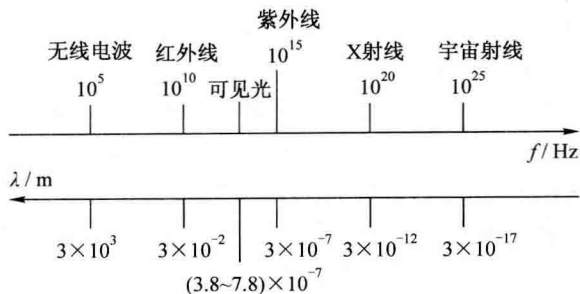


图 1-2 电磁波波谱

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	主要传播方式和用途	
长波(LW)	$10^3 \sim 10^4$ m	30~300 kHz	低频(LF)	地波;远距离通信	
中波(MW)	$10^2 \sim 10^3$ m	300 kHz~3 MHz	中频(MF)	地波、天波;广播、通信、导航	
短波(SW)	10~100 m	3~30 MHz	高频(HF)	天波、地波;广播、通信	
超短波(VSW)	1~10 m	30~300 MHz	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)	10~100 cm	300 MHz~3 GHz	特高频(UHF)	直线传播、散射传播;通信、中继与卫星通信、雷达、电视广播
	厘米波(SSW)	1~10 cm	3~30 GHz	超高频(SHF)	直线传播;中继和卫星通信、雷达
	毫米波(ESW)	1~10 mm	30~300 GHz	极高频(EHF)	直线传播;微波通信、雷达

“高频”也是一个相对的概念,表中的“高频”指的是短波频段,其频率范围为 3~30 MHz,这只是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频(Radio Frequency, RF),其频率范围非常宽。只要电路尺寸比工作波长小得多,仍可用集中参数来分析实现,都可认为属于“高频”范围。就目前的技术水平来讲,“高频”的上限频率可达微波频段(如 3~5 GHz)。更高的频段称为微波,主要由 UHF、SHF 和 EHF 三个频段组成,表 1-2 为 IEEE 给出的更为详细的工业用微波频段的定义。

表 1-2 IEEE 定义的工业用微波频段

频带名称	频率范围/GHz	频带名称	频率范围/GHz
L	1.0~2.0	S	2.0~4.0
C	4.0~8.0	X	8.0~12.0
Ku	12.0~18.0	K	18.0~26.5
Ka	26.5~40.0	Q	33.0~50.0
U	40.0~60.0	V	50.0~75.0
E	60.0~90.0	W	75.0~110.0
F	90.0~140.0	D	110.0~170.0
G	140.0~220.0		



需要强调指出,不同频段的信号具有不同的分析与实现方法。对于波长 $\lambda \geq 1$  m的信号通常用集总(中)参数的方法和“路”的概念来分析,而对于波长 $\lambda < 1$  m的信号一般应用分布参数的方法和“场”的概念来分析。对应地,上述“高频”信号可用电路来实现,称为“高频电路”,频率很高的微波信号要用“场”来研究与实现。本书主要讨论用于无线通信的电子线路。

由无线通信系统组成可知,在无线电路中,要处理的电信号主要有消息(基带)信号、高频载波信号和已调信号三种。前者通常为低频信号,后两者通常属于高频的范畴。

无线电信号有多方面的特性,主要有时间(域)特性、频谱特性、调制特性、传播特性等。无线电信号的时间特性就是信号随时间变化快慢的特性。信号的时间特性要求传输该信号的电路的时间特性(如时间常数)与之相适应。频谱特性包含幅频特性和相频特性两部分,它们分别反映信号中各个频率分量的振幅和相位的分布情况。在通信系统中被传输的信号,一般情况下都不是单一频率的信号,而是占据一定的带宽。从频谱特性上看,带宽就是信号能量主要部分(一般为90%以上)所占据的频率范围或频带宽度。不同的信号,其带宽不同。电磁波频率越高,可利用的频带宽度就越宽,不仅可以容纳许多互不干扰的信道,从而实现频分复用(FDM)或频分多址(FDMA),而且也可以传播某些宽频带的消息信号(如图像信号),这是无线通信采用高频的原因之一。

电磁波的传播特性指的是无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。无线电信号的传播特性主要根据其所处的频段或波段来区分。

空间波是电磁波的自由态,电磁波从发射天线辐射到空间后,不仅其能量会扩散衰减,接收机只能收到其中极小的一部分,而且在传播过程中,电磁波的能量会被地面、建筑物或高空的电离层吸收或反射,或者在大气层中产生折射或散射等现象,形成直射(视距)传播、绕射(地波)传播、折射和反射(天波)传播及散射传播等,如图1-3所示,从而使到达接收机时的强度大大衰减。在移动无线环境中,还会由于多径或运动的原因而产生快衰落。决定传播方式和传播特点的关键因素是电磁波的频率。

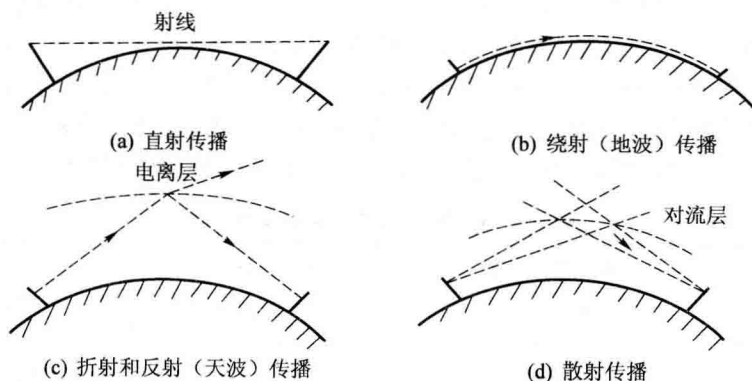


图 1-3 无线电波的主要传播方式

一般来讲,电磁波信号的辐射是多方向的。由于地球是一个巨大的导体,电磁波沿地面传播(绕射)时能量会被吸收(趋肤效应引起),通常是波长越长(或频率越低),被吸收的能量越少,损耗就越小,因此,中、低频(或中、长波)信号可以以地波的方式绕射传播很远,并且比较稳定,多用于远距离通信与导航。实际上,绕射依赖于电波的波长、物体的体积与形状、绕射点入射波的