



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高频电子线路

第二版

曾兴雯 主编
曾兴雯 刘乃安 陈 健 付卫红 编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高频电子线路

第二版

曾兴雯 主 编

曾兴雯 刘乃安 陈 健 付卫红 编

高等教育出版社

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。内容包括绪论,高频电路基础,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,角度调制与解调,反馈控制电路,高频电路新技术和整机线路分析与系统设计,共十章。

本书可作为通信工程、电子信息工程等专业的本科生教材,也可作为大专、电大、职大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

高频电子线路/曾兴雯主编.—2版.—北京:高等教育出版社,2009.11

ISBN 978-7-04-028023-4

I. 高… II. 曾… III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第120409号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青
责任绘图 尹莉 版式设计 余杨 责任校对 胡晓琪
责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 三河市春园印装有限公司

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开本 787×960 1/16
印张 31.5
字数 600 000
插页 2

版次 2004年1月第1版
2009年11月第2版
印次 2009年11月第1次印刷
定价 37.30元

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 28023-00

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 世纪国际社会经济发展和世界经济新的强大推动力。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;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、魏铃教授和李纪澄教授,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

目 录

第一章 绪论	1
第一节 无线通信系统概述	1
一、无线通信系统的组成	1
二、无线通信中的信号与调制	3
三、无线通信系统的类型	8
四、无线通信系统的要求与指标	9
第二节 射频前端结构	10
一、发信(射)机结构	11
二、接收机结构	11
三、天线	15
第三节 无线信道特性	15
第四节 本课程的特点与学习方法	16
思考题与练习题	18
第二章 高频电路基础	19
第一节 高频电路中的基本元器件	19
一、高频电路中的元件	19
二、高频电路中的有源器件	21
第二节 高频电路中的基本电路	23
一、高频振荡回路	23
二、高频变压器和传输线变压器	35
三、石英晶体谐振器	39
四、集中滤波器	44
五、衰减器与匹配器	47
第三节 电子噪声及其特性	49
一、概述	49
二、电子噪声的来源与特性	50
第四节 噪声系数和噪声温度	57

一、噪声系数	57
二、噪声系数的计算	59
三、噪声系数的测量	65
四、噪声温度	67
思考题与练习题	67
第三章 高频谐振放大器	70
第一节 高频小信号谐振放大器	70
一、高频小信号谐振放大器的工作原理	71
二、放大器性能分析	71
三、高频谐振放大器的稳定性	74
四、多级谐振放大器	77
五、高频集成放大器	78
第二节 低噪声小信号放大器的设计	81
一、半导体器件及其工作点选择	82
二、放大器噪声匹配网络的设计	83
三、电容、电感选择	85
四、其他	85
第三节 高频功率放大器的原理与特性	86
一、高频功率放大器的工作原理	87
二、高频谐振功率放大器的工作状态	91
三、高频功放的外部特性	94
第四节 高频功放的高频效应	98
一、少数载流子的渡越时间效应	98
二、非线性电抗效应	99
三、发射极引线电感的影响	99
四、饱和压降的影响	100
第五节 高频功率放大器的实际线路	100
一、直流馈电线路	100
二、输出匹配网络	103
三、推挽连接线路	108
四、高频功放的实际线路举例	109
第六节 功率放大器线性化技术	110
一、功率回退技术	112
二、预失真线性化技术	113

三、前馈技术	113
四、负反馈技术	114
五、包络消除与恢复技术	115
第七节 高效功放、功率合成与射频模块放大器	116
一、D类高频功率放大器	116
二、E类高频功率放大器	120
三、功率合成器	121
四、射频模块放大器	124
思考题与练习题	129
第四章 正弦波振荡器	134
第一节 反馈振荡器的原理	134
一、反馈振荡器的原理分析	134
二、平衡条件	135
三、振荡器的起振条件	136
四、稳定条件	137
五、振荡电路举例——互感耦合振荡器	139
第二节 LC 振荡器	139
一、LC 振荡器的组成原则	139
二、电容反馈振荡器	142
三、电感反馈振荡器	143
四、两种改进型电容反馈振荡器	145
五、场效应管振荡器	147
六、单片集成振荡器举例	148
第三节 振荡器的频率稳定度	150
一、频率稳定度的意义和表征	150
二、振荡器的稳频原理	151
三、提高频率稳定度的措施	153
第四节 LC 振荡器的设计方法	154
一、振荡器电路选择	154
二、晶体管选择	154
三、直流馈电线路	155
四、振荡回路元件选择	155
五、反馈回路元件选择	155
第五节 石英晶体振荡器	155

一、石英晶体振荡器频率稳定度	155
二、晶体振荡器电路	156
三、高稳定度晶体振荡器	160
第六节 负阻振荡器	162
一、负阻振荡器原理	162
二、负阻器件	162
三、负阻振荡器电路	164
第七节 压控振荡器	166
第八节 振荡器中的几种现象	169
一、间歇振荡	169
二、频率拖曳	170
三、频率占据	172
四、寄生振荡	175
思考题与练习题	177
第五章 频谱的线性搬移电路	184
第一节 非线性电路的分析方法	184
一、非线性函数的级数展开分析法	185
二、线性时变电路分析法	187
第二节 二极管电路	190
一、单二极管电路	190
二、二极管平衡电路	193
三、二极管环形电路	196
第三节 差分对电路	201
一、单差分对电路	201
二、双差分对电路	206
第四节 其他频谱线性搬移电路	209
一、晶体管频谱线性搬移电路	209
二、场效应管频谱线性搬移电路	212
思考题与练习题	213
第六章 振幅调制、解调及混频	216
第一节 振幅调制	216
一、振幅调制信号分析	216
二、振幅调制电路	226

第二节 调幅信号的解调	240
一、调幅解调的方法	240
二、二极管峰值包络检波器	242
三、同步检波	255
第三节 混频	258
一、混频概述	258
二、混频电路	263
第四节 混频器的干扰	273
一、信号与本振的自身组合干扰	273
二、外来干扰与本振的组合干扰	275
三、交叉调制干扰(交调干扰)	278
四、互调干扰	279
五、包络失真和阻塞干扰	280
六、倒易混频	281
思考题与练习题	282
第七章 角度调制与解调	293
第一节 角度调制信号分析	294
一、调频信号分析	294
二、调相信号分析	301
三、调频信号与调相信号的比较	303
第二节 调频方法	303
一、调频方法	303
二、调频电路的调频特性	306
第三节 变容二极管直接调频电路	307
一、变容二极管	307
二、变容二极管直接调频电路	309
第四节 其他直接调频电路	316
一、晶体振荡器直接调频电路	316
二、张弛振荡器直接调频电路	317
第五节 间接调频电路	318
一、回路参数调相电路	318
二、RC 网络调相电路	320
三、可变延时法调相电路	321
第六节 调频信号的解调	322

一、鉴频器的性能指标	323
二、直接鉴频	324
三、间接鉴频	326
第七节 相位鉴频器电路	337
一、互感耦合相位鉴频器	337
二、电容耦合相位鉴频器	342
三、比例鉴频器	344
第八节 调频收发信机及附属电路	347
一、调频发信机	348
二、调频接收机	348
三、附属电路与特殊电路	349
第九节 调频多重广播	353
一、调频立体声广播	353
二、电视伴音的多重广播	355
思考题与练习题	356
第八章 反馈控制电路	363
第一节 自动增益控制电路	364
一、AGC 电路原理	365
二、AGC 电路	368
三、增益控制电路	370
第二节 自动频率控制电路	373
一、AFC 电路的组成原理	373
二、AFC 在通信电子电路中的应用	375
第三节 锁相环路	377
一、基本原理	377
二、锁相环工作过程的定性分析	383
三、锁相环路的线性分析	386
四、锁相环路的非线性分析	394
五、锁相环路在通信电子线路中的应用	396
第四节 频率合成器	399
一、频率合成器及其技术指标	399
二、频率合成方法	401
三、锁相频率合成器	408
四、集成锁相频率合成器	411

思考题与练习题	416
第九章 高频电路新技术	420
第一节 高频电路的集成化	420
一、高频集成电路的类型	420
二、高频电路的集成化技术	421
三、高频集成电路的发展趋势	425
第二节 高频集成电路	427
一、集成无源元件	427
二、高频单元集成电路	428
三、高频组合集成电路	432
四、高频系统集成电路	433
第三节 高频电路 EDA	437
一、EDA 技术及其发展	437
二、EDA 技术的特征与 EDA 方法	439
三、EDA 工具	440
四、高频电路 EDA	442
第四节 软件无线电技术	445
一、软件无线电的基本结构	447
二、软件无线电中的有关算法	450
三、软件无线电技术的应用	459
思考题与练习题	464
第十章 整机线路分析与系统设计	465
第一节 短波 100 W 收发信机线路分析	465
一、主要性能指标	465
二、收发信机的组成原理	466
三、关键电路分析	468
第二节 KG 107 UHF 通信机线路分析	470
一、收信机电路	472
二、发信机电路	472
三、频率合成器	473
四、VCO 电路	473
第三节 系统设计	473
一、系统总传输损耗	474

二、链路预算与系统设计	478
三、收发信机设计与指标分配	480
思考题与练习题	485
参考文献	486

第一章

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,通常被称为电信。传输电信号的媒质(或介质)可以是有线的,也可以是无线的,而以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,而且对于其他通信系统也有典型意义。

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

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。

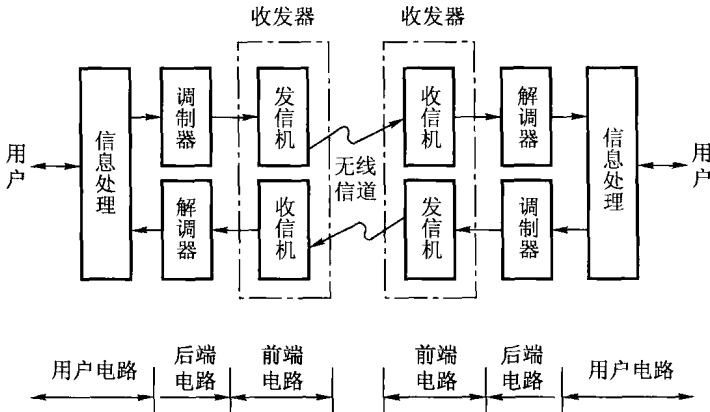


图 1-1 典型的点对点双向无线通信系统基本组成示意图

后端电路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 (Demodulation),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