



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子信息类规划教材

高频电子线路

杨霓清 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本教材为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本教材以教育部教学指导委员会制定的新的教学基本要求为依据, 主要内容包括: 选频网络与阻抗变换、高频小信号放大器、正弦波振荡器、频谱搬移电路、角度调制与解调电路、反馈控制电路与频率合成技术、高频功率放大器、干扰与噪声等。在内容的编排上, 尽量做到思路清晰、由简到繁, 便于自学。同时注重理论与实践相结合, 电路紧密围绕通信系统中的接收、发送设备, 以接收、发送设备为背景, 从信号传输与电路实现的角度, 将各功能电路的分析以及它们之间的关系有机地结合起来, 使学生在学习理论的同时建立起整机的概念。

本书配有电子课件, 欢迎选用本书作教材的老师索取, 索取邮箱: wbj@mail.machineinfo.gov.cn。

本教材可以作为通信工程、电子信息工程等专业的本科生教材, 也可作为高职高专、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/杨霓清主编. —北京: 机械工业出版社, 2007. 2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-20744-3

I. 高… II. 杨… 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 (2007) 第 005197 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王保家 版式设计: 张世琴 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm • 20.5 印张 • 504 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-20744-3

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379727

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，可以作为高等学校通信工程、电子信息工程及其他电子信息类相近专业的教学用书和参考书，也可供有关工程技术人员参考。本书参照教育部教学指导委员会制定的《电子信息科学与电气信息类“电子线路（I）、（II）”课程教学基本要求》，总结多年教学实践经验，吸取国内外同类教材之特长，并考虑到教学改革的需要编写而成。

“高频电子线路”是本科电子信息类专业重要的技术基础课，是一门理论性、工程性与实践性很强的课程，它内容丰富，应用广泛，新技术、新器件发展迅速。考虑到应用型人才培养的特点，本书中内容以模拟通信系统为主要研究对象，介绍了发送、接收设备所涉及的高频电子线路的各功能单元电路、典型线路的功能、工作原理、性能特点及其分析方法，以理解概念、实现功能为主。在讲述器件和电路特点的同时，重点介绍了各种电路的机理，强调了概念的应用、功能的实现；同时理论与实践相结合，电路紧密围绕通信系统，使学生在理论学习的同时建立起整机的概念。

近几年来，我国的移动通信、广播电视、无线电遥控遥测、雷达等电子技术和电子工业飞速发展，新技术、新工艺、新器件日新月异。为此本教材在先行者所编著的《高频电子线路》所涵盖的内容的基础上，增加了频率合成技术、功率合成技术、电流模集成模拟乘法器、数字锁相环等内容。

编写过程中，考虑到《高频电子线路》是专业基础课教材，在内容的安排、取舍方面特别注意了以下几个方面：

（1）以理解概念、实现功能为主，尽量避免过多的数学推导，加强了基本理论和基本分析方法的讨论。

（2）理论与实践结合，电路尽量围绕通信系统，力求使学生在学完“高频电子线路”课程后，能够建立起整机的概念。

（3）书中着重于通信电路中常用的一些基本功能部件的原理、电路、计算与分析，以便为后续课程的学习打下基础，所以书中仍以分立元件电路为基础，在分析了各种基本功能电路之后，给出集成电路的实际应用电路，力求反映当前高频电子线路的新发展。

（4）结构上，一是将小信号放大器一章的内容压缩，增加了集成高频放大器的内容；二是将相乘器电路、集成模拟相乘器单独设立一节，同时增加了电流模乘法器电路；三是在锁相环路中增加了数字锁相环，以便将模拟电路与数字电路结合起来；四是将难度较大且比较抽象的高频功率放大器放在了教材的第7章介绍，这样学生在学习了前面的内容以后，再学习这章内容也就觉得简单了。

全书共分8章，参考学时为50~70学时。第1章介绍了各种选频网络与阻抗变换电路，主要介绍了谐振回路的基本特性，各种形式的滤波器，窄带无源阻抗变换网络和传输线变压器。第2章为高频小信号放大器，重点介绍了的小信号谐振放大器的工作原理，对集成放大器做了简单的介绍。第3章是正弦波振荡器，主要介绍了反馈振荡器，重点分析LC振荡

器、晶体振荡器和 RC 振荡器，并对振荡器的频率稳定性进行了讨论，对负阻振荡器制作了简单的介绍。第4章为频谱搬移电路，首先重点介绍了振幅调制、解调和混频的原理，而后介绍了各种能够实现频谱搬移的相乘器电路，最后对各种实用的调幅、检波、混频电路的工作原理、性能特点、质量指标做了详尽的分析。第5章为角度调制与解调电路，重点介绍的是频率调制与解调的原理及其典型电路的工作原理、性能指标与特点的分析，调频系统中的特殊电路。第6章为反馈控制电路与频率合成技术，重点介绍的是锁相环及其应用，频率合成技术，对自动电平控制电路、自动频率控制电路只做简单的介绍。第7章为高频功率放大器，对丙类谐振功率放大器做了详细的介绍，并简单介绍了丁类、戊类放大器和功率合成与分配电路。第8章为噪声与干扰，重点介绍的是噪声的来源和表示方法、电子器件中的噪声计算以及噪声系数的概念。书中打“※”号内容为选学内容。

本书由杨寛清主编并统稿，参加编写的老师还有山东大学马丕明、孙建德、秦承涛，山东建筑大学王涛，山东理工大学王金丽。杨寛清编写第2、5、6章，第7章由马丕明编写，第1、8章由孙建德编写，第3章及课后习题由杨寛清、王涛组织并编写，第4章及附录、常用符号由杨寛清、王金丽组织并编写，书中所有的插图由秦承涛绘制。山东大学李道真教授、青岛大学颜世科教授审阅了全书，并提出了许多宝贵的意见，在此谨向李道真、颜世科教授表示衷心的感谢。在编写过程中作者从所列参考文献中吸取了宝贵的成果和资料，本书作者谨向各参考文献的著、编、译者表示衷心的感谢。同时感谢机械工业出版社对本书出版所给予的支持。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：wbj@mail.machininfo.gov.cn。

作者深知，“高频电子线路”所涉及的范围广、新知识多，我们对这一领域的学习和研究还很浅，水平有限，书中难免有疏漏、错误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

编 者

本书常用符号表

一、电压、电流符号

1. 基本符号

I, i 电流, 基本单位 A

V, v 电压, 基本单位 V

2. 时域的常用符号

v, i , 加小写下标表示交流电压、交流电流,

例如:

v_i, v_s, v_o 交流输入电压、信号源电压、交流输出电压

v_m, v_c 调制信号电压、正弦载波电压

v_d 误差电压

i_o 交流输出电流

V, I , 加大写下标表示直流电压、直流电流,

例如:

V_Q 静态工作点电压

V_{CC}, V_{BB} 集电极和基极直流电源电压

V_{DD}, V_{GG} 漏极和栅极直流电源电压

v, i , 加大写下标表示瞬时电压、瞬时电流,

例如:

v_{BE} 三极管的发射结瞬时电压

v_{AV} 含有直流和低频的高频平均电压

V, I , 加小写下标表示正弦电压、正弦电流的有效值, 例如:

V_f 反馈电压有效值

3. 频域的常用符号

$\dot{V} = V(j\omega) = V(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ 正弦电压的相量

$V(s)$ 电压的拉普拉斯变换表示

4. 习惯符号 (注意下标的不同含义)

V_{REF} 直流基准电压

V_m 正弦电压的振幅

I_{clm} 集电极基波电流的振幅

v_{AV} 高频信号的平均电压

I_0 直流电流

I_{CO} 集电极的直流电流分量

v_L, v_i 本振信号电压、中频信号电压

v_n 干扰信号电压

二、电功率与效率符号

P 平均功率

P_o 输出信号功率

P_C 集电极耗散功率

P_{SB} 边频功率

P_D 直流电源输出的功率

P_i 交流信号输入功率

P_{av} 高频信号的平均功率, 如已调波的时变功率

p 瞬时功率

$p_i(t)$ 瞬时输入功率

η 效率

三、信号频率符号

1. 基本频率符号

F, f 频率, 基本单位 Hz

ω, Ω 角频率, 基本单位 rad/s

$s = \sigma + j\omega$ 复频率, 基本单位 rad/s

2. 常用频率符号

f_0 电路谐振频率

ω_0 电路谐振角频率

F 调制信号频率

Ω 调制信号角频率

f_L 本振频率

f_i 中频频率, 中频载波频率

f_c 载波频率 (载频)

f_g 导频

f_H 上限截止频率

f_s 信号频率

f_n 干扰信号频率

f_{osc} 振荡器的振荡频率

3. 常用频率范围符号

BW 带宽, 频谱宽度

$BW_{0.7}$ 3dB 带宽

B_L 等效噪声带宽

四、其他基本符号

1. 时间符号 (基本单位 s)

 T 信号的周期 t 时间

2. 其他

 t 摄氏温度, 基本单位 $^{\circ}\text{C}$ T 热力学温度, 基本单位 K

五、元件符号

 R 电阻器 L 电感器 ZL 高频扼流圈 C 电容器 VD 二极管 VT 晶体管 VF 场效应晶体管 T 变压器 S 开关

六、元件参数符号

1. 阻抗 (基本单位 Ω)、导纳 (基本单位 S)

(1) 基本符号

 R 电阻 G, g 电导 X 电抗 B, b 电纳 Z, z 阻抗 $Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)}$ 阻抗复数值 $Z(\omega) = |Z(j\omega)|, \varphi_z(\omega)$ 阻抗的
模值和
相角 Y, y 导纳 $Y(j\omega) = Y(\omega)e^{j\varphi_y(\omega)}$ 导纳复数值 $Y(\omega) = |Y(j\omega)|, \varphi_y(\omega)$ 导纳的
模值和
相角

(2) 常见符号

 R_s, R_s 信号源内阻 R_L 负载电阻 R_i 输入电阻 R_o 输出电阻 r 损耗电导 $R_{\infty}(g_{e0})$ 回路有载谐振电阻 (电导) 或回
路等效谐振电阻 (电导) g_{cm} 混频跨导 R_t 热敏电阻

2. 变压器参数

 k 耦合系数 M 互感 N 线圈匝数 n 线圈匝数比, 接入系数

3. 二极管参数

 V_B 内建电位差, 势垒电压 $V_{D(on)}$ 导通电压 $V_{(BR)}$ 击穿电压 I_{ss} 反向饱和电流 n 变容管的变容指数 C_j 结电容 C_{jQ} 工作点时的结电容 $C_j(0)$ 外加电压为零时的结电容 V_z 稳压管的稳定电压

4. 晶体管参数

 I_{CBO} 发射极开路时集电极反向饱和电流 I_{CEO} 基极开路时的穿透电流 I_{CM} 集电极最大允许电流 $V_{(BR)CBO}$ 发射极开路时 CB 间的反向击穿电
压 $V_{(BR)CEO}$ 基极开路时 CE 间的击穿电压 $V_{(CE)(sat)}$ 集电极饱和压降 $V_{BE(on)}$ 发射极导通电压 P_{CM} 集电极最大允许耗散功率 g_{cr} 饱和临界线斜率 α 共基极短路电流传输系数 β 共发射极短路电流传输系数 f_a 共基极交流电流传输系数的截止频率 f_β 共发射极交流电流传输系数的截止频率 f_T 特征频率 r_e 发射结的交流结电阻 $r_{bb'}$ 基区扩展电阻 (基区体电阻) $y_{ie}, y_{re}, y_{fe}, y_{oe}$ 晶体管共发射极组态的
输入导纳、反向传输导
纳、正向传输导纳、输
出导纳

5. 场效应晶体管参数

 I_{DSS} $v_{GS}=0$ 时的饱和漏电流 $V_{GS(off)}$ 夹断电压 $V_{GS(th)}$ 开启电压, 简记为 V_{th}

V_{GSM} 最大激励电压

七、信号传输符号

$H(j\omega)$ 传递函数

A 增益

A_v 电压增益

A_i 电流增益

$A(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi_A}$ 复数增益

k_f 反馈系数

T 反馈放大器的环路增益 (回归比)

G_p 功率增益

$K_{r0.1}$ 矩形系数

η_d 检波效率 (检波电压传输系数)

N_f 噪声系数

八、谐振回路参数

Q 品质因数

Q_0 回路空载品质因数或回路固有品质因数

Q_e 回路有载品质因数或回路等效品质因数

ρ 回路特征阻抗

ξ 一般失谐系数, 简称失谐系数

九、常见信号符号

1. 常见已调波符号

AM 普通调幅 (简称调幅)

DSB 抑制载波的双边带调幅

SSB 抑制载波的单边带调幅

VSB 残留边带调幅

FM 频率调制 (简称调频)

PM 相位调制 (简称调相)

2. 信号参数符号

φ_0, θ_0 载波的初相

φ, θ 正弦信号的相位

3. 信号质量参数符号

M 调制度或调制指数

M_a 调幅指数

M_f 调频指数

M_p 调相指数

4. 噪声表示符号

$S(\omega)$ 噪声功率谱

$S_V(\omega)$ 噪声电压功率谱

$S_I(\omega)$ 噪声电流功率谱

十、其他符号

Q 静态工作点

$K(\omega t)$ 开关函数

$K_1(\omega t)$ 单向开关函数

$K_2(\omega t)$ 双向开关函数

目 录

前言

本书常用符号表

绪论 1

0.1 通信系统的组成 1

0.2 无线通信系统 2

0.3 本书主要内容和组织结构 6

思考题与习题 7

第1章 选频网络与阻抗变换 8

1.1 LC谐振回路 8

1.1.1 并联谐振回路 8

1.1.2 串联谐振回路 12

1.1.3 负载和信号源内阻对并联谐振回路的影响 14

1.2 窄带无源阻抗变换网络 15

1.2.1 变压器阻抗变换 15

1.2.2 部分接入进行阻抗变换 15

1.2.3 其他形式的阻抗变换网络 18

1.3 常用滤波器 21

1.3.1 石英晶体滤波器 22

1.3.2 陶瓷滤波器 24

1.3.3 表面声波滤波器 25

1.4 宽带阻抗变换网络 26

1.4.1 引言 26

1.4.2 传输线变压器 27

思考题与习题 30

第2章 高频小信号放大器 33

2.1 概述 33

2.1.1 高频小信号调谐放大器的主要质量指标 33

2.1.2 高频小信号放大器的分类 34

2.2 高频小信号调谐放大器 35

2.2.1 晶体管高频等效电路 35

2.2.2 单管单调谐放大器 37

2.2.3 多级单调谐回路谐振放大器 41

2.2.4 参差调谐放大器 43

2.3 高频调谐放大器的稳定性 44

2.3.1 晶体管内部反馈 y_{re} 的影响 44

2.3.2 解决的方法 45

2.4 高频集成放大器 47

思考题与习题 49

第3章 正弦波振荡器 52

3.1 反馈型振荡器的基本原理 52

3.1.1 振荡的产生 52

3.1.2 反馈型振荡器的原理分析 53

3.1.3 反馈振荡的条件 54

3.1.4 电路基本组成及其分析方法 60

3.2 LC正弦波振荡器 60

3.2.1 互感耦合LC振荡器 60

3.2.2 三点式振荡电路 61

3.2.3 单片集成振荡器 67

3.3 振荡器的频率稳定度 69

3.3.1 频率稳定的表示方法 69

3.3.2 振荡器的稳频原理 70

3.3.3 提高频率稳定度的措施 71

3.3.4 改进型电容反馈振荡器 72

3.4 LC振荡器的设计考虑 74

3.5 晶体振荡器 75

3.5.1 石英晶体振荡器的频率稳定度 75

3.5.2 晶体振荡器电路 76

3.6 RC正弦波振荡器 80

3.6.1 RC选频网络 80

3.6.2 文氏电桥振荡器和相移振荡器 82

*3.7 负阻振荡器 83

3.7.1 负阻器件的基本特性 83

3.7.2 负阻振荡器 85

*3.8 几种特殊的振荡现象 87

3.8.1 寄生振荡 88

3.8.2 间歇振荡 89

3.8.3 频率占据现象 90

3.8.4 频率拖曳 92

思考题与习题 92

第4章 频谱搬移电路 98

4.1 频谱搬移的基本原理及电路组成模型 98

4.1.1 振幅调制的原理及电路 组成模型	98	5.5 扩展最大频偏的方法	197
4.1.2 振幅解调的原理及电路 组成模型	106	5.6 调频波解调电路	199
4.1.3 混频的原理及电路组成模型	108	5.6.1 概述	199
4.1.4 小结	110	5.6.2 斜率鉴频器	203
4.2 相乘器电路	111	5.6.3 相位鉴频器	206
4.2.1 非线性器件的特性及相乘作用	111	5.7 调频系统中的特殊电路	216
4.2.2 二极管电路	113	思考题与习题	219
4.2.3 三极管电路及差分对电路	118	第6章 反馈控制电路与频率合成	
4.2.4 电压模集成模拟乘法器	121	技术	224
*4.2.5 电流模集成模拟乘法器	126	6.1 反馈控制电路概述	224
4.3 振幅调制电路	134	6.1.1 自动电平控制电路	224
4.3.1 低电平调制器	134	6.1.2 自动频率控制电路	227
4.3.2 高电平调制器	138	6.1.3 自动相位控制电路	228
4.3.3 采用滤波法的单边带发射机	140	6.2 锁相环的基本组成与原理	229
4.4 调幅信号的解调电路	141	6.2.1 锁相环的基本组成及数学模型	230
4.4.1 包络检波器	141	6.2.2 锁相环的基本方程	233
4.4.2 同步检波器	150	6.3 锁相环的静态特性和跟踪特性	234
4.5 混频电路	153	6.3.1 锁相环的静态特性	234
4.5.1 混频器的主要性能指标	154	6.3.2 锁相环的跟踪特性	235
4.5.2 二极管混频器	155	6.4 锁相环捕捉过程的定性分析	240
4.5.3 集成混频器	157	6.5 集成锁相环简介	245
4.5.4 三极管混频器	159	6.6 集成锁相环的应用	247
4.5.5 混频器的干扰和非线性失真	163	6.6.1 锁相环在调制与解调中的应用	247
思考题与习题	167	6.6.2 锁相接收机	250
第5章 角度调制与解调电路	174	6.6.3 锁相倍频、分频和混频	251
5.1 角度调制信号的基本特性	174	*6.7 数字锁相环	252
5.1.1 角度调制信号的数学表达式	174	6.7.1 数字锁相环的基本部件	253
5.1.2 调角信号的频谱	178	6.7.2 数字锁相环的工作过程	257
5.1.3 调角信号的频谱宽度	180	6.7.3 数字锁相环的基本方程及模型	258
5.2 调频信号的产生	182	6.8 频率合成技术	259
5.2.1 直接调频方法	182	6.8.1 锁相频率合成器	260
5.2.2 间接调频方法	183	6.8.2 直接数字频率合成器	264
5.2.3 调频电路的主要性能指标	183	思考题与习题	267
5.3 直接调频电路	184	第7章 高频功率放大器	271
5.3.1 变容二极管直接调频电路	184	7.1 概述	271
5.3.2 晶体振荡器直接调频	191	7.2 谐振功率放大器的原理与应用	271
*5.3.3 张弛振荡器电路实现直接调频	191	7.2.1 谐振功率放大器的工作原理	271
5.4 间接调频电路——调相电路	194	7.2.2 谐振功率放大器的近似 分析方法	274
5.4.1 矢量合成法调相电路	194	7.2.3 谐振功率放大器的外部特性	276
5.4.2 可变相移法调相电路	195	7.3 谐振功率放大器的实际线路	280
5.4.3 可变时延法调相电路	197	7.3.1 直流馈电线路	280

7.3.2 高频功率放大器的滤波匹配网络	281	8.2.3 场效应晶体管的噪声	301
7.3.3 谐振功率放大器的实际线路举例	282	8.3 信噪比和噪声系数	301
7.4 功率合成器	283	8.3.1 信噪比	301
7.4.1 魔 T 网络	285	8.3.2 噪声系数 N_F	302
7.4.2 功率合成电路介绍	287	8.3.3 减小噪声系数的措施	305
*7.5 丁类和戊类高频功率放大器	288	8.4 外部干扰与抗干扰措施	307
7.5.1 丁类功率放大器	289	8.4.1 外部干扰	307
7.5.2 戊类功率放大器	290	8.4.2 抑制干扰的主要措施	309
7.6 晶体管倍频器	291	8.5 灵敏度与动态范围	309
思考题与习题	292	8.5.1 灵敏度	309
*第 8 章 噪声与干扰	295	8.5.2 动态范围	310
8.1 起伏噪声特性	295	思考题与习题	310
8.2 噪声的来源与特点	297	附录	312
8.2.1 电阻热噪声	297	附录 A 常用滤波匹配网络的结构及元件表达式	312
8.2.2 晶体管的噪声	300	附录 B 余弦脉冲分解系数表	313
		参考文献	315

绪 论

通信的任务是传递信息，信息可以是语言、音乐、文字、符号、图像或数据。古代依靠烽火、信鸽或信使等工具传递信息，这种传递方式的信息传输速度很低，而且难于进行远距离的传递。1837 年莫尔斯（Morse）发明了电报，开创了通信的新纪元。1876 年贝尔（Bell）发明了电话，能够直接将语音信号变为电信号沿导线传送。电报、电话的发明为迅速准确地传递信息提供了新的手段，是通信技术的重大突破。

1861 年英国物理学家麦克斯韦（Maxwell）从理论上预言了电磁波的存在，通过 1887 年德国物理学家赫兹（Hertz）的火花放电实验得以证明。从此以后，许多国家的科学家都在努力研究如何利用电磁波传输信息的问题，即无线电通信。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。

本书主要讨论用于通信系统和电子设备中的高频电子线路。例如，我们所熟悉的广播、电视、无线电通信等，它们的一个共同特点就是利用高频信号来传递信息。尽管它们在所传递信息的形式、工作方式以及设备体制组成等方面有很大不同，但设备中产生、接收、检测高频信号的基本电路大都是相同的。

0.1 通信系统的组成

1. 通信系统的一般组成

从广义上说，一切将信息从发送者传送到接收者的过程都可看作通信（Communication），实现这种信息传送过程的系统称为通信系统。

现代通信系统的典型框图如图 0.1.1 所示，它由输入变换器、发射机、信道、接收机、输出变换器等组成，各部分的主要功能简述如下：

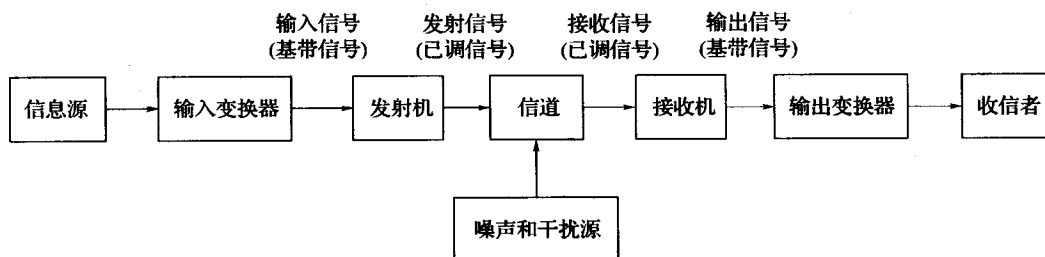


图 0.1.1 通信系统典型框图

信息源：即信息的来源，具有各种不同的形式，如音乐、语言、文字、图像等。

输入变换器（传声器（俗称话筒）、拾音器、电键、摄像机等）：将信息源输入的信息（待传送的信息）转换成相应的电信号，该信号一般由零频附近的直流分量和低频信号组成，称为

基带信号 (Baseband Signal) 或携有信息的电信号, 它可以是模拟信号, 也可以是数字信号。

发射机: 将基带信号变换为适合信道传输的高频电信号, 变换后的高频电信号经过放大处理后以足够的功率送入信道, 以实现信号有效的传输。变换后的信号称为已调信号或带通信号 (Passband Signal)。

接收机: 与发射机相反, 接收机完成的功能是从信道接收到的信号中还原出与发射机输入信号一致的基带信号 (这一过程称之为解调)。在信号传输过程中, 不可避免地会有噪声和干扰的加入, 因此接收机除了包含与发送端相反作用的解调电路外, 还有滤除干扰和噪声的电路, 当然必要的放大也是需要的。

输出变换器: 将接收设备输出的电信号还原成原始信息, 如声音、图像等, 供受信者利用。

噪声和干扰源: 是信道中的噪声及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

信道: 信道是传输带有信息的电信号的媒质, 它可以是电线、电缆、波导、光导纤维或自由空间。

由通信系统的框图可知, 通信系统中一般要进行两种变换和反变换。在发送端, 第一种变换是输入变换, 把要传递的非电信号变换成电信号, 即基带信号, 该信号一般是低频, 且包括零频附近的分量。第二种变换是发射机将基带信号变换成适合在信道中有效传播的信号形式, 并送入信道, 这种变换称之为调制 (Modulation)。在接收端, 接收机与发射机的功能相反, 它从信道中选取欲接收的已调波并将其变换为基带信号, 此变换称为解调 (Demodulation)。输出变换器将解调后的基带信号变换为相应的信息。

2. 通信系统的分类

通信系统的种类很多, 按照所用信道 (传递信息的媒质) 的不同, 通信方式的分类如下: 信道是导线 (如架空明线、电缆、波导管等) 的通信称为有线通信; 信道是光缆的通信称为光纤通信; 信道是自由空间的通信称为无线通信。适合无线电波传播的频段范围极为宽广, 从几十 kHz 超长波到几十 GHz 的毫米波, 不同频段的无线电电磁波在空间传播的方式和特性也不相同。

应当指出, 通信系统要传输的信息是多种多样的。然而, 当把它们转换为电信号后, 可以归纳为两大类: 一类是模拟信号, 一类是数字信号。模拟信号是指电信号的某一参量的取值范围是连续的, 如传声器产生的话音电压信号。模拟信号通常是时间的连续函数, 也有时间离散函数的情况, 但取值一定是连续的。数字信号是指电信号的某一参量携带有离散信息, 其取值是有限个数值, 如电报信号、数据信号等。于是, 按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号又可把通信系统分成两大类: 模拟通信系统和数字通信系统。

不同类型的通信系统, 其组成和设备的复杂程度各不相同, 但组成设备的基本电路及基本原理都是相同的。本书将以无线通信系统为线索, 讨论通信系统中的高频电子线路的电路组成、工作原理及分析、设计方法。这有利于明确学习基本电路的目的性, 加强有关设备和系统的概念。同时, 对于其他通信系统也有典型意义。

0.2 无线通信系统

无线通信的类型很多, 可以按传输手段、频率范围、用途等进行分类。如按传输手段分

类,有短波通信、超短波通信、微波中继通信和卫星通信等;按传送信息的类型分类,有模拟通信和数字通信;按用途分类,有地面移动通信、航空通信和舰船通信等。各种不同的通信,其设备的组成、设备的复杂程度都有很大不同,但基本组成不变,如图 0.2.1 所示。所以,实现无线通信的关键设备是发射机和接收机。

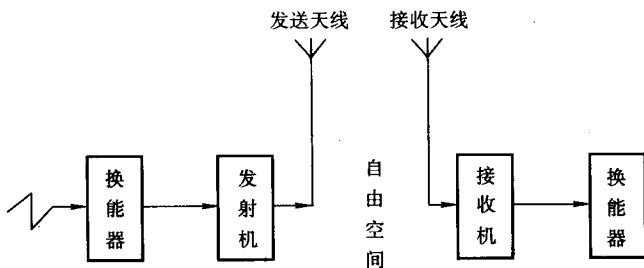


图 0.2.1 无线通信系统基本组成框图

1. 发射机框图

图 0.2.2 为采用调幅方式的中波广播发射机框图。

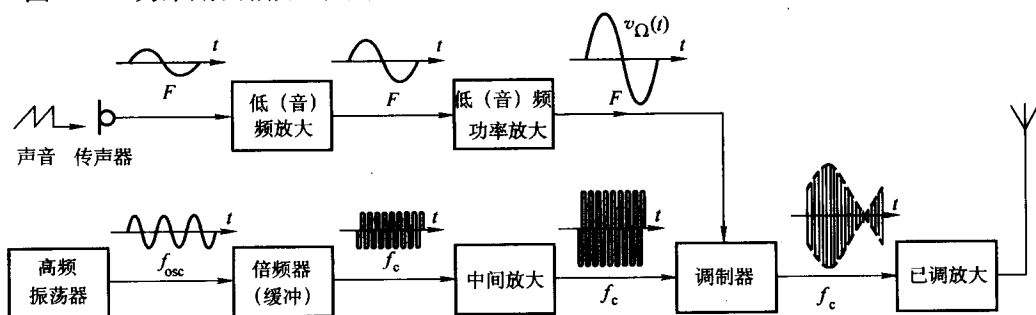


图 0.2.2 中波广播调幅发射机框图

在发射机中由高频振荡器 (Oscillator) 产生的高频信号称为载波,载波本身并不携带要发射的信息,用携有信息的基带信号去控制高频载波的某一个参数,使该参数按照基带信号的规律而变化,从而使载波携带信息,该过程称为调制。

基带信号也称为调制信号,是由原始信息变换的低频信号,通常用 $v_n(t)$ 表示。未调制的高频振荡信号称为载波信号,它可以是正弦波,也可以是非正弦波,如方波、三角波、锯齿波等,但都是周期性信号,用符号 $v_c(t)$ 或 $i_c(t)$ 表示。载波信号的频率称之为载频(或射频)。经过调制后的高频振荡信号称为已调波信号。正弦载波有三个参数:振幅、频率和相位。若受控的参数是振幅,则这种调制称为振幅调制 (Amplitude Modulation, AM),简称为调幅,相应的已调波信号称为调幅波信号;如果受控的参数是高频振荡的频率或相位,则这种调制称为频率调制 (Frequency Modulation, FM) 或相位调制 (Phase Modulation, PM),简称为调频或调相,并统称为调角,相应的已调波信号分别称为调频波信号或调相波信号,并统称为调角波信号。另外,如调制信号为模拟信号,称为模拟调制 (Analog Modulation);如为数字信号,则称为数字调制 (Digital Modulation)。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。

调制的作用有以下几个方面:

在无线通信中必须把基带信号变成高频已调信号的原因主要有两点。第一是为了有效地把信号用电磁波辐射出去。我们知道,无线电波是以光速传播的,与信号频率 f 对应的一个参数是波长 λ ,它们之间的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (0.2.1)$$

式中, c 为光速 ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$); λ 的单位为 m 。为了有效的将信号的能量辐射到空间, 要求天线的长度和信号的波长可比拟 (例如至少十分之一)。而基带信号一般来说是低频信号, 如话音的频率可以认为在 $300 \sim 3400 \text{ Hz}$ 范围内, 如果直接辐射话音信号, 这就要求天线长度达 300 km 以上, 这是不可能的。因此为了有效的辐射, 发射信号的频率必须是高频。

采用调制的第二个原因是为了有效利用频带。一般要传送的基带信号的频率范围都差不多, 比如广播电台要广播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, 就会互相干扰, 令接收机无法区分。只有将不同电台的节目调制到该电台对应的不同频率的载波上, 变成中心频率不同的频带信号, 接收机才能任意选择所需要的电台而抑制其余不需要的电台和干扰。

根据图 0.2.2 中各方框之间所示的波形, 图中各方框的功能一目了然。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 kHz 以上。为了提高频率稳定度, 振荡器往往采用石英晶体振荡器, 并在它后面加缓冲级, 以削弱后级对振荡器的影响。若载波的频率较高, 在缓冲级之后还应加倍频器, 以便将振荡频率提高到所需的载频频率。中间放大器由多级带有谐振系统的谐振放大器组成, 用来放大振荡器产生的振荡信号。调制器完成调制的作用, 利用高频载波的幅度来携带信息。调幅波信号经放大后加到发射天线上。

传声器是将话语声变为电信号的变换器, 低频放大器是小信号放大器, 用来放大传声器输出的电信号, 低频功率放大器用来提供足够功率的调制信号。

2. 接收机框图

图 0.2.3 为超外差式调幅接收机框图。

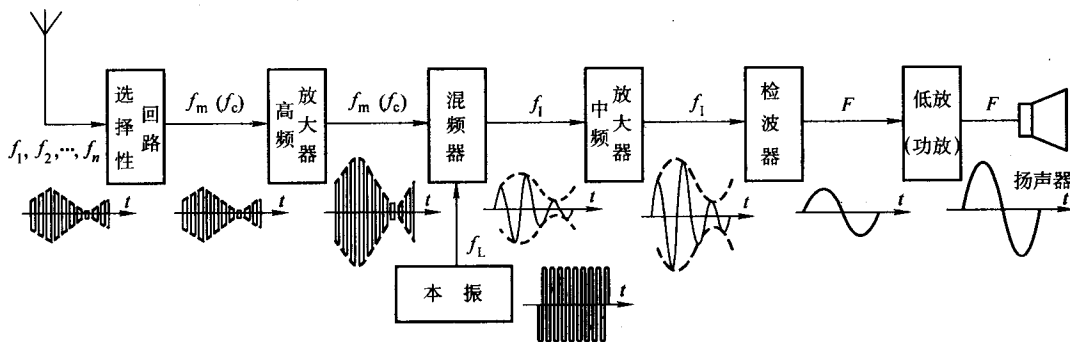


图 0.2.3 超外差式调幅接收机框图

天线上感应的信号由选择性回路选出中心频率为 f_c 的已调信号, 经高频放大器放大后, 与本地振荡产生的频率为 f_L 的本振信号进行混频。混频器产生的中频已调信号经放大后进入振幅检波器, 从中频已调信号中恢复出能反映被传送的调制信号, 实现解调功能。低频放大器放大调制信号, 并经扬声器发出声音。

混频是超外差接收机的核心, 其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固定中频 $f_1 = f_L - f_c$ (或 $f_1 = f_c - f_L$) 的中频已调波。调幅广播接收机的固定中频为 465 kHz 。其中 f_c 是随接收机信号不同而不同, 由于 f_1 是固定值, 所以本地振荡器的振荡频率 $f_L = f_c + f_1$ 也应是可调的, 而且必须使它正确跟踪 f_c 。

应该指出,实际的通信设备通常比上面所列举的典型设备复杂得多。况且还可采用调频等其他方式的无线通信,但无论采用何种的调制方式,发射机和接收机都必须包括上述的组成方框,区别在于调制和解调的方式不同。例如采用调频方式的通信系统中调制器称为频率调制器,解调器称为鉴频器(或频率检波器)。再如在宽频段工作的电台中,发射机的振荡器和接收机的本地振荡器就可能由更复杂的组件——频率合成器来代替,它能产生多个可供选择的、频率稳定的信号。

3. 无线电信号的传播方式

表 0.2.1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式和用途,其中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。通常将频率高于 1000MHz、波长短于 3cm 的无线电波统称为微波。

不同的高频波段通常有最适宜的传播方式,而传播方式又决定了传播距离和传播性能(如传播的衰耗大小、信号的稳定性等)。无线电波的传播方式主要有:视距传播、地波传播、电离层传播(天波传播)、对流层散射传播等。图 0.2.4 是这几种传播方式的示意图。

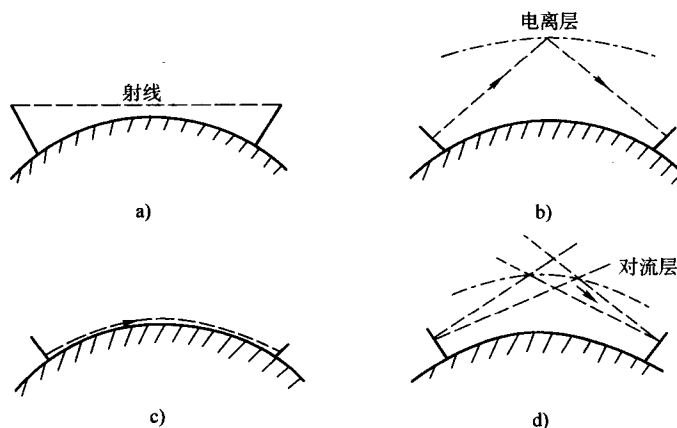


图 0.2.4 无线电波的传播方式

a) 视距传播(空间波) b) 电离层传播(天波) c) 地波传播(地波) d) 对流层散射传播

表 0.2.1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围	频率范围	波段名称	主要传播方式和用途
超长波波段	$10^4 \sim 10^8 \text{m}$	3~30kHz	VLF(甚低频)	地波; 音频、电话等
长波波段	1000~10000m	30~300kHz	LF(低频)	地波; 远距离通信
中波波段	100~1000m	300~3000kHz	MF(中频)	地波、天波; 广播、通信、导航
短波波段	10~100m	3~30MHz	HF(高频)	地波、天波; 短波广播、移动电话
超短波波段	1~10m	30~300MHz	VHF(甚高频)	视距传播、对流层散射; 通信、电视广播、调频广播、雷达
分米波波段	10~100cm	300~3000MHz	UHF(超高频)	视距传播、对流层散射; 中继通信、卫星通信、雷达、电视广播、移动通信
厘米波波段	1~10cm	3000~30000MHz	SHF(特高频)	视距传播; 中继通信、卫星通信、雷达
毫米波波段	1~10mm	30~300GHz	EHF(极高频)	视距传播; 微波通信、雷达、射电天文学

0.3 本书主要内容和组织结构

1. 本书主要内容和组织结构

由上面讨论的无线电发射机和接收机的组成可以看出,除音频放大器外,主要是处理高频信号的电路,它们是高频信号的产生(振荡器)、放大(小信号放大和功率放大)、变换(倍频、混频)、调制和解调等电路。这些单元电路都属于高频电子线路(High Frequency Electronic Circuit)的基本单元电路。另外,包括自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制(锁相环)在内的反馈控制电路也是高频电子线路所研究的重要对象,因为这是通信系统中必不可少的辅助部分。完成上述功能的电路通常都是由有源器件(晶体管、场效应晶体管、集成电路)和无源器件构成的,既有线性电路,也有非线性电路。显然,它们的性能好坏,直接影响到整个通信系统的质量。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。

将上述处理高频信号的各单元电路按其功能归纳为以下三类:

第一类是实现功率放大功能的电路。这类电路可以在输入信号作用下将直流电源所提供的功率部分地变换为按输入信号规律变化的输出信号功率,并使输出信号功率大于输入信号功率。例如第2章的高频小信号放大器、第7章的高频功率放大器。

必须指出,功率放大器与小信号放大器都具有实现功率放大的功能,但是,两者在要求上却有明显区别。对小信号放大器的要求,主要体现在增益、频率响应和稳定性等方面;而对功率放大器的要求,除了增益、频率响应、稳定性以外,最主要的是在保证功率管安全工作的条件下,高效率地输出尽可能大且失真在允许范围内的功率。

第二类是实现振荡功能的电路(第3章 正弦波振荡器)。这类电路能在不加输入信号的情况下,稳定地产生特定频率或特定频率范围的正弦波振荡信号。

第三类是实现波形变换和频率变换功能的电路。这类电路能在输入信号作用下产生与输入信号波形和频谱不同的输出信号。属于这类功能电路的有调制电路(包含振幅调制、角度调制)、解调电路(包含检波和调角信号的解调)、混频电路和倍频电路等。

2. 本课程的特点

在高频电子线路中,所有的功能电路都是由非线性器件组成的。严格来讲,所有包含非线性器件的电子线路都是非线性电路,只是在不同的使用条件下,非线性器件所表现的非线性程度不同而已。如高频小信号放大器,由于输入的信号足够小,而又要求不失真放大,所以其中的非线性器件可以用线性等效电路表示。分析方法也可以用线性电路的分析方法。除此之外,本教材的核心内容和绝大部分电路均属于非线性电子线路。

与线性器件不同,对于非线性器件的描述通常用多个参数,如直流跨导、交流跨导、时变跨导等,而且大都与控制变量有关。在分析非线性器件对输入信号的响应时,不能采用线性电路中行之有效的叠加定理,而必须求解电路状态的非线性代数方程、非线性微分方程等。但是,对非线性电路进行严格的数学分析不仅非常困难,而且没有必要。在工程中往往根据实际情况对器件的数学模型和电路工作的条件进行合理地近似,以便使用简单的分析方法获得具有实用意义的结果,所以工程近似分析方法在非线性电子线路中得到广泛的应用。

高频电子线路能够实现的功能和单元电路很多,每种功能的实现电路也是多种多样的,

但它们都是基于非线性器件实现的，也都是在为数不多的基本电路的基础上发展而来的。因此在学习本课程时应该抓住各种电路之间的共性，洞悉各种功能之间的内在联系。应避免孤立地去了解一个个具体的电路及工作原理，而应掌握分析电路的思想方法。

高频电子线路具有很强的实践性。由于高频电子线路工作频率一般都比较低，而且电路复杂，在理论分析时往往是在忽略一些实际问题的情况下进行一定的归纳和抽象，有许多实际问题需要通过实践环节进行学习和加深理解。同时高频电子线路的调试技术要比低频电子线路复杂得多，因此加强实践训练是十分重要的。同时，实践经验的积累有助于帮助开阔思路，提高创新能力，所以本课程的学习必须高度重视实践环节，坚持理论联系实际。

思考题与习题

- 0.1 无线通信为什么要用高频信号？“高频”信号指的是什么？
- 0.2 在无线通信系统中，为了实现以无线电形式传输信号，对于原始信息要进行何种形式的变换？每种变换的目的是什么？
- 0.3 何谓调制？它的作用是什么？常用的模拟调制方式有哪些？
- 0.4 常用的收、发设备中有哪些高频电路？它们的主要作用是什么？
- 0.5 画出无线电发送设备、接收设备的原理框图，说明各部分的作用。
- 0.6 无线电信号的频段（或波段）是如何划分的？它们以何种方式传播？