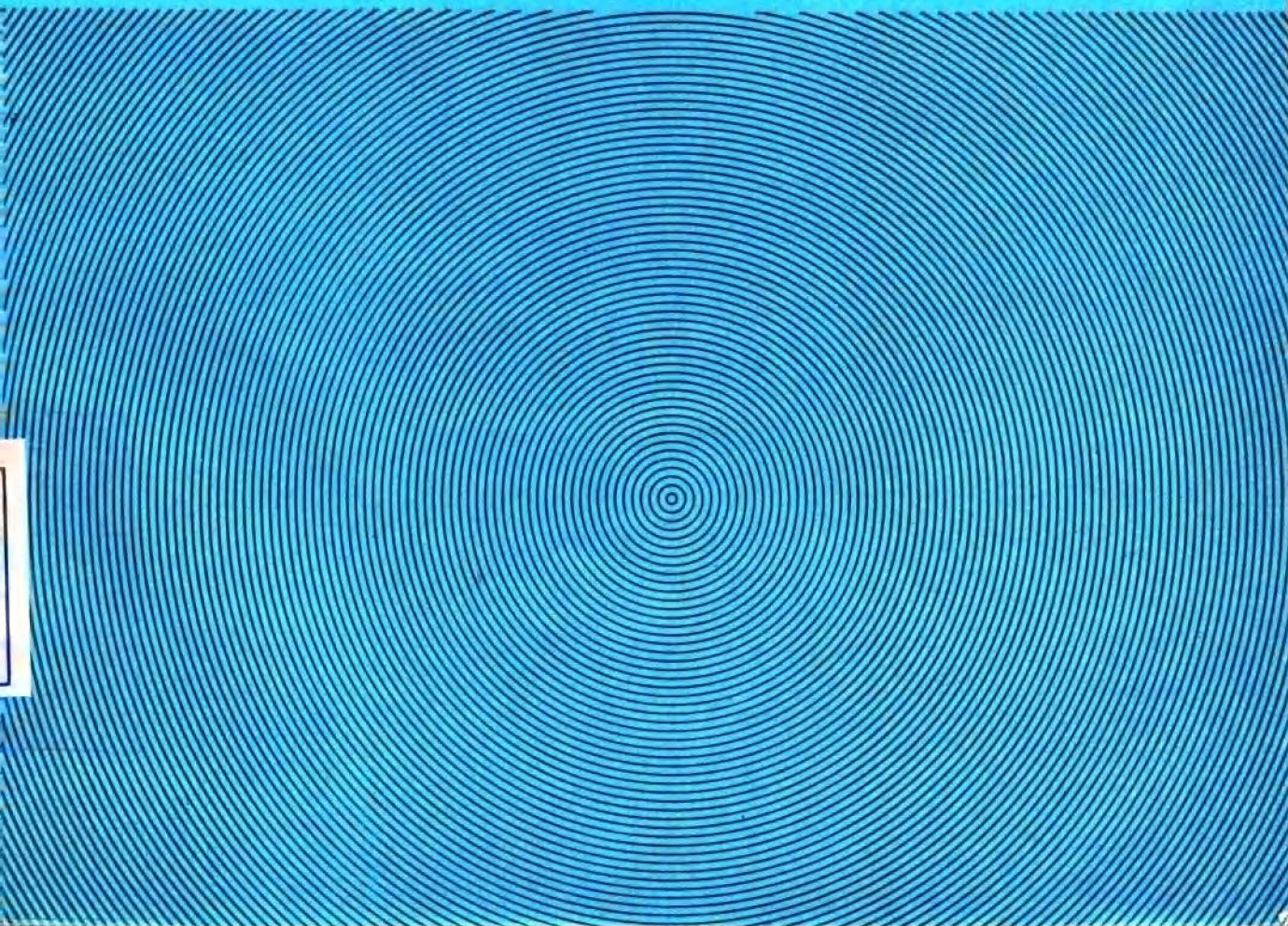


高频电子线路

张义芳 冯健华 编

哈尔滨工业大学出版社



高频电子线路

张义芳 冯健华 编

哈尔滨工业大学出版社

高频电子线路

Gaopin Dianzi Xianlu

张义芳 冯健华 编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

黑龙江大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 502 千字

1993 年 12 月第 1 版 1998 年 1 月第 3 次印刷

印数 8 001—13 000

ISBN 7-5603-0824-4/TN·35 定价:21.00 元

前 言

本书是一本介绍现代通信系统中信道机所涉及的各种高频电子线路的功能、工作原理、性能特点和分析方法的教材。它是根据国家教委定的电子、通信等类专业“电子线路(I)、(II)课程教学基本要求”，总结我校多年教学实践，并吸取了国内外同类教材之特长，考虑当前教学的需要，在原编教学讲义的基础上，加以修改而成的。

全书共分八章：第一章为基础知识，讲述高频电子线路在无线通信系统中的地位和功用，非线性电路及其分析方法、选频电路和晶体管高频等效电路及其频率参数等内容，作为学习以后各章的必备知识和基础。第二章至第八章分别介绍各种功能电路，它们是：高频小信号频带放大电路、放大器的内部噪声、高频功率放大电路、正弦波振荡电路、调制与解调电路、变频电路和反馈控制电路等。

编写本书时，考虑到它是专业基础课教材，在内容取舍方面有以下几点应作以说明：

1. 随着集成技术的迅猛发展，集成电路已被广泛地引入通信电路中，本书尽力贯彻以集成电路为主的原则。但在基本电路技术方面仍是以分立电路为基础的，因此，对典型的、目前仍在使用的分立元件电路的分析，本书也给予足够的重视。

2. 本书所涉及的电路，仅限于集总参数电路范围，至于分布参数电路、数字电路则分别划归“微波电子线路”，“脉冲与数字电路”等课程介绍。

3. 鉴于当前学生中普遍存在的实际问题，本书加强了对电路稳定性分析和克服不稳定因素方法的论述，突出高频电子线路的特点。

本书由张义芳主编。第一、二、三、六、七章由张义芳执笔，第四、五、八章由冯健华执笔。

本书编写过程中得到王金荣教授的悉心指导，他审阅了部分书稿，并对具体内容的增减提出了有益的意见；张万杰副教授和钮培澍副教授曾参加本书第一稿的编写工作，提出过许多宝贵意见；本书还得到哈尔滨工业大学无线电技术基础教研室一些同志的热情帮助；勇晓光、吴韶波同志参加了本书的绘图工作，在此，对上述同志表示衷心的感谢。

本书由哈尔滨工业大学无线电工程系吴中一教授主审，并提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。

限于编者水平，书中难免有不妥与错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

1993.5

趁第二次印刷重新排版的机会，除纠正了第一次印刷中的错误外，还对部分内容进行了少量增减，并给出了部分习题答案。

编 者

1996.8

常用符号表

一、基本符号

I, i	电流
V, v	电压
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
$Z(j\omega) = R + jX$	阻抗
$Y(j\omega) = G + jB$	导纳
L	电感
C	电容
M	互感
T	热力学温度, 脉冲重复周期
t	时间
τ	脉冲宽度, 充放电时间常数
F, f	频率
Ω, ω	角频率

二、电压、电流

$V(I)$ 电压(电流)

下标大写表示直流电压, 如 V_D

下标小写表示正弦电压有效值, 如 V_d

$v(i)$ 电压(电流)瞬时值

下标大写表示包含直流电压的瞬时值, 如 v_D

下标小写表示交流电压的瞬时值, 如 v_d

v_c 载波电压瞬时值, 集电极交变电压瞬时值

v_Ω 调制信号电压瞬时值

v_s 交流信号源电压瞬时值

v_i 输入交变电压瞬时值

v_o	输出交变电压瞬时值
v_{av}	交变电压平均值
V_{CC}	集电极直流电源电压
V_{DD}	漏极直流电源电压
$V_Q(I_Q)$	工作点直流电压(电流)
V_f	反馈电压有效值
V_C	控制电压
$V(s)$	电压的拉普拉斯变换
$\dot{V}$	正弦电压的复数值
V_m	正弦电压振幅值
A_v	电压增益
$\dot{A}$	增益的复数值

三、功率

P_i	输入信号功率
P_o	输出信号功率
P_c	载波功率
P_C	集电极耗散功率
P_{dc}	直流电源供给功率
P_a	额定功率
A_p	功率增益
A_{pa}	额定功率增益

四、阻抗、导纳、频率

R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
R_L	负载电阻
R_s	网络串联等效电阻, 信号源内阻
R_p	网络并联等效电阻, 并联谐振回路端电阻
r	回路损耗电阻
Z_o	传输线特性阻抗
$Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi, (\omega)}$	阻抗的复数值
$Y(j\omega) = Y(\omega)e^{j\varphi, (\omega)}$	导纳的复数值

ω_0	回路谐振角频率
ω_c	载波角频率
$\omega_{p,q}$	组合频率
ω_r	基准角频率, 参考角频率

五、电路参数

B 或 $2\Delta f_{0.7}$	通频带, 频谱宽度
$H(s)$	电路或网络的复频域传递函数
$H(j\omega)$	电路或网络的频域传递函数
Q_0	回路固有品质因数
Q_L	回路有载品质因数
F	反馈系数
N	绕组匝数, 声表面波换能器的周期数
ρ	回路特性阻抗
k	耦合系数
p	接入系数, 匝数比 (变比)
η	效率, 耦合因子
γ	变容管的变容指数
ζ	阻尼系数
ξ	一般失谐量, 集电极电压利用系数
α	回路选择性特性
m_a	幅度调制指数, 调幅度
m_f	频率调制指数

六、噪声

$\overline{v_n^2}(\overline{i_n^2})$	噪声电压 (电流) 均方值
$V_n = \sqrt{\overline{v_n^2}}$	噪声电压均方根值
$I_n = \sqrt{\overline{i_n^2}}$	噪声电流均方根值
$S(f)$	噪声功率谱密度
Δf_n	等效噪声带宽
P_n	噪声功率
P_s	信号功率
$P_s/P_n, S/N$	信号与噪声功率比, 信噪比
N_F	噪声系数
T_0	常温温度
T_e	等效噪声温度

七、器件参数

$V_Q(I_Q)$	工作点直流电压 (电流)
D	二极管
T	晶体管
I_s	PN 结反向饱和电流
C_j	PN 结结电容
g	跨导
V_{BZ}	导通电压, 开启电压
V_p	夹断电压
α	共基极短路电流放大系数
β	共发射极短路电流放大系数
f_α	共基极交流电流传输系数的截止频率
f_β	共发射极交流电流放大系数的截止频率
f_T	特征频率
f_{max}	晶体管最高振荡频率
r_e	发射结结电阻
$r_{b'b}$	基极体电阻
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
V_{CEO}	基极开路时 C-E 结反向击穿电压
V_{BEO}	集电极开路时 B-E 结反向击穿电压
V_{CES}	集电极饱和压降

目 录

第一章 基础知识

§1.1 高频电子线路的功用	1
1.1.1 通信系统的组成	1
1.1.2 发射机和接收机的组成	4
1.1.3 本书的研究对象和任务	5
§1.2 非线性电路的基本特点	5
1.2.1 非线性元件与非线性电路	5
1.2.2 非线性电路的分析方法	8
1.2.3 非线性电路的频率变换作用	17
§1.3 选频电路	23
1.3.1 对选频电路的要求	23
1.3.2 选频电路的分类	24
1.3.3 谐振式选频电路	24
§1.4 晶体管高频等效电路	39
1.4.1 物理参数模型	39
1.4.2 网络参数模型	43
习 题	48

第二章 高频小信号频带放大电路

§2.1 概 述	51
§2.2 晶体管谐振放大电路	52
2.2.1 单调谐回路谐振放大电路	53
2.2.2 双调谐回路谐振放大电路	57
2.2.3 参差调谐放大电路	59
2.2.4 集中选择性放大电路	61
§2.3 放大器的稳定性	67
2.3.1 晶体管内部反馈	67
2.3.2 晶体管外部干扰	68
习 题	69

第三章 放大器的内部噪声

§3.1 噪声的来源与性质	71
3.1.1 热噪声	71
3.1.2 散粒噪声	73
3.1.3 $1/f$ 噪声	74
3.1.4 噪声带宽	74
§3.2 元件的噪声及其噪声模型	75
3.2.1 二极管的噪声	75
3.2.2 晶体三极管的噪声	75
3.2.3 场效应管的噪声	78
3.2.4 放大器的噪声模型	79
§3.3 噪声系数	80
3.3.1 噪声系数的定义	80
3.3.2 噪声系数的计算公式	81
3.3.3 放大器的噪声系数	82
3.3.4 等效噪声温度	84
3.3.5 多级放大器的噪声系数	85
3.3.6 接收机灵敏度与噪声系数关系	86
习 题	87

第四章 高频谐振功率放大电路

§4.1 概 述	89
§4.2 丙类谐振功率放大器的工作原理	90
§4.3 丙类功率放大器工作状态的分析	92
4.3.1 丙类功率放大器的折线分析法	92
4.3.2 丙类功率放大器的负载特性	96
4.3.3 各级电压对工作状态的影响	98
4.3.4 工作状态的计算 (估算) 举例	99
§4.4 晶体管谐振功率放大器的高频特性	100
§4.5 丙类功率放大器电路参数计算	102
4.5.1 馈电电路	102
4.5.2 输出回路与级间耦合回路	105
4.5.3 谐振功率放大器的实用电路	112
§4.6 进一步提高效率的途径	112
§4.7 宽带高频功率放大器	114
4.7.1 普通变压器不能在较宽频带内工作的原因	114
4.7.2 宽频带传输线变压器	115

§4.8 功率合成与功率分配	120
§4.9 丙类倍频器	129
§4.10 功率管的安全工作	131
思考题与习题	132

第五章 正弦波振荡电路

§5.1 概 述	134
§5.2 反馈型自激振荡器的工作原理	134
5.2.1 产生振荡的基本原理与分析方法	134
5.2.2 反馈振荡器的振荡条件	137
§5.3 LC 正弦波振荡电路	141
5.3.1 互感耦合振荡电路	141
5.3.2 三点式振荡电路	143
5.3.3 差分对管振荡电路	149
§5.4 LC 振荡器的频率稳定度	152
5.4.1 频率稳定度的定义	152
5.4.2 对引起频率不稳定因素的分析	153
5.4.3 稳频措施	155
5.4.4 克拉泼振荡电路	156
5.4.5 西勒振荡电路	157
§5.5 石英晶体振荡电路	158
5.5.1 石英晶体的等效电路和阻抗特性	159
5.5.2 石英晶体振荡电路	162
§5.6 RC 正弦波振荡电路	167
5.6.1 RC 相移振荡器	168
5.6.2 文氏电桥振荡器	170
§5.7 负阻振荡器	172
5.7.1 负阻器件的基本特性	173
5.7.2 负阻振荡电路	174
§5.8 寄生振荡现象	175
思考题与习题	178

第六章 调制与解调电路

§6.1 概 述	180
§6.2 幅度调制	181
6.2.1 调幅信号性质	181
6.2.2 调幅方式的演变及其实现模型	185
6.2.3 常用调幅电路	192

§ 6.3 幅度解调	214
6.3.1 综 述	214
6.3.2 包络检波电路	216
6.3.3 同步检波电路	226
6.3.4 晶体二极管检波与双差分对管模拟相乘器检波性能比较	231
§ 6.4 角度调制	231
6.4.1 调角波性质	232
6.4.2 调频方法及其实现模型	236
6.4.3 常用调频电路	237
6.4.4 扩展频偏方法	246
§ 6.5 角度解调	246
6.5.1 鉴频方法及其实现模型	247
6.5.2 常用鉴频电路	248
§ 6.6 限幅电路	261
习 题	263

第七章 变频电路

§ 7.1 概 述	271
§ 7.2 常用混频电路	273
7.2.1 晶体三极管混频电路	273
7.2.2 场效应管混频电路	278
7.2.3 晶体二极管混频电路	280
7.2.4 集成模拟相乘器混频电路	284
§ 7.3 变频干扰	285
7.3.1 组合频率干扰	286
7.3.2 寄生通道干扰	286
7.3.3 交叉调制(交调)干扰	287
7.3.4 互相调制(互调)干扰	288
7.3.5 本振噪声干扰与倒易混频干扰	288
习 题	289

第八章 反馈控制电路

§ 8.1 概 述	292
§ 8.2 自动电平控制电路	292
8.2.1 基本工作原理	292
8.2.2 应用	293
§ 8.3 自动频率控制电路	296

8.3.1 工作原理	297
8.3.2 应用	300
§8.4 锁相环路的基本工作原理	301
§8.5 锁相环路数学模型	302
8.5.1 锁相环路各部件及其数学模型	302
8.5.2 锁相环路的数学模型	307
8.5.3 锁相环路锁定的概念	308
§8.6 锁相环路的分析	310
8.6.1 一阶环路分析	310
8.6.2 二阶环路的分析	319
§8.7 集成锁相环及其应用	322
8.7.1 集成锁相环	322
8.7.2 锁相环路的应用	327
思考题与习题	333
参考文献	333
习题答案	334

第一章 基础知识

§1.1 高频电子线路的功用

高频电子线路是若干无源电子元件或有源电子元件（晶体管、场效应管、集成电路等）的有序联结、并在高频频段范围内实现特定电功能的电路，它被广泛应用于通信系统和各种电子设备中。为了具体了解高频电子线路的种类和功用，现以通信系统为例，对它们作一概要的介绍。

1.1.1 通信系统的组成

通信既是人类社会的重要组成部分，又是社会发展和进步的重要因素。广义地说，凡是在发信者和收信者之间，以任何方式进行消息的传递，都可称为通信。实现消息传递所需设备的总和，称为通信系统。19 世纪末迅速发展起来的以电信号为消息载体的通信方式，称为现代通信系统。其组成框图如图 1.1-1 所示。各部分的主要作用简介如下：

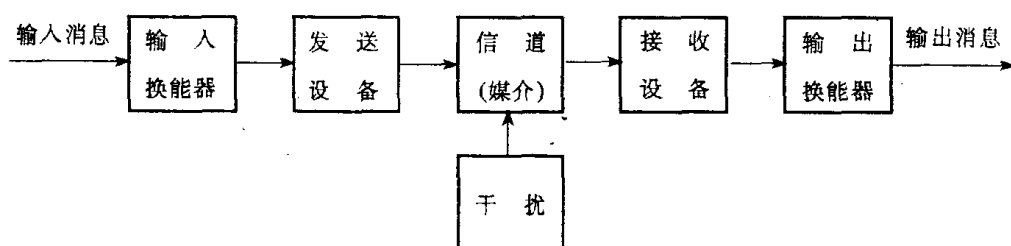


图 1.1-1 通信系统的组成

一、输入换能器

输入换能器主要任务是将发信者提供的非电量消息（如声音、景物等）变换为电信号，它应能反映待发的全部消息，通常具有“低通型”频谱结构，故称为基带信号。当输入消息本身就是电信号时（如计算机输出的二进制信号）输入换能器可省略而直接进入发送设备。

二、发送设备

发送设备主要有两大任务：一是调制，二是放大。所谓调制，就是将基带信号变换成适合信道传输特性传输的频带信号。它是使基带信号去控制消息载体信号的某一参数，让该参数随基带信号的大小而线性变化的处理过程。例如，在连续波调制中，简谐振荡有三个参数（振幅、频率和初相位）可以改变，利用基带信号去控制这三个参数中的某一个，对应三种调制方式：调幅、调频和调相。通常又将基带信号称为调制信号，将高频振荡信号称为载波信号，将经过调制后的高频振荡信号称为已调信号或已调波。

所谓放大，是指对调制信号和已调信号的电压和功率放大、滤波等处理过程，以保

证送入信道足够大的已调信号功率。

三、信道

信道是连接发、收两端的信号通道，又称传输媒介。通信系统中应用的信道可分为两大类：有线信道（如架空明线、电缆、波导、光纤等）和无线信道（如海水、地球表面、自由空间等）。不同信道有不同的传输特性，相同媒介对不同频率的信号传输特性也是不同的。例如，在自由空间媒介里，电磁能量是以电磁波的形式传播的。然而，不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。1.5MHz 以下的电磁波主要沿地表传播，称为地波，如图 1.1-2 所示。由于大地不是理想的导体，当电磁波沿其传播时，有一部分

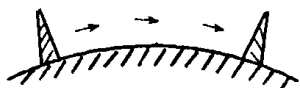


图 1.1-2 电磁波沿地表绕射

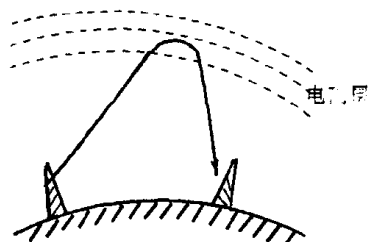


图 1.1-3 电磁波的折射与反射

能量被损耗掉，频率越高，趋表效应越严重，损耗越大，因此频率较高的电磁波不宜沿地表传播。1.5 ~ 30MHz 的电磁波，主要靠天空中电离层的折射和反射传播，称为天波，如图 1.1-3 所示。电离层是由于太阳和星际空间的辐射引起大气上层电离形成的。电磁波到达电离层后，一部分能量被吸收，一部分能量被反射和折射到地面。频率越高，被吸收的能量越小，电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后，电磁波就会

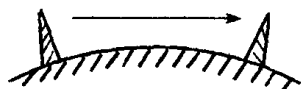


图 1.1-4 电磁波的直射

穿透电离层而不再返回地面。因此频率更高的电磁波不宜用天波传播。30MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播，称为空间波，如图 1.1-4 所示。由于地球表面的弯曲，空间波传播距离受限于视距范围。架高发射天线可以增大其传输距离。

为了讨论问题的方便，将不同频率的电磁波人为地划分若干频段或波段，其相应名称和主要应用举例，列于表 1.1-1 中。应该指出，各种波段的划分是相对的，因为各波段之间并没有显著的分界线，但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。

四、接收设备

接收设备的任务是将信道传送过来的已调信号进行处理，以恢复出与发送端相一致的基带信号，这种从已调波中恢复基带信号的处理过程，称为解调。显然解调是调制的反过程。又由于信道的衰减特性，经远距离传输到达接收端的信号电平通常是很微弱的了（微伏数量级），需要放大后才好解调。同时，在信道中还会存在许多干扰信号，因而接收设备还必须具有从众多干扰信号中选择有用信号、抑制干扰的能力。

五、输出换能器

输出换能器的作用是将接收设备输出的基带信号变换成原来形式的消息，如声音、景物等，供受信者使用。

表 1.1-1

频 率	30Hz	300Hz	3kHz	30kHz	300Hz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz	3THz	30THz	300THz
频段名称	极低频 (ELF)	声 频 (VF)	甚低频 (VLF)	低 频 (LF)	中 频 (MF)	高 频 (HF)	甚高频 (VHF)	特高频 (UHF)	超高频 (SHF)	极高频 (SHF)	超极高频			
应 用 举 例	音频电话 数据传输 长距离航海 时间标准			航海设备 无线电信标	调幅广播 民间保护 业余无线电	短波广播 移动通信 军用通信 业余无线电	VHF 电视 调频广播 空中交通 管制 业余无线电	UHF 电视 遥测 雷达 业余无线电	雷达 卫星和空间 通信 军用通信 业余无线电	无线电天 文学 雷达着陆 设备 业余无线电	卫星广播 与通信			
波段名称			超长波 (VLW)	长 波 (LW)	中 波 (MW)	短 波 (SW)	米 波	分米波	厘米波	毫米波	亚毫米波		光 波	
波 长	10Mm	1Mm	100km	10km	1km	100m	10m	1m	10cm	1cm	1mm	100μm	10μm	1μm
传 输 媒 介	有 线	架空明线	视 频 电 缆	射 频 电 缆	同 轴 电 缆	波 导	波 导	波 导	波 导	波 导	波 导	波 导	波 导	波 导
	无 线	海 水	地 球 表 面	自 由 空 间										

* 常对微波波段做更细的划分,并用不同的拉丁字母表示如下:

波 段 代 号	P	• L	S	C	X	Ku	K	Ka	Q-W
简 称		22cm 波段	10cm 波段	5cm 波段	3cm 波段	2cm 波段	1.25cm 波段	0.8cm 波段	0.4cm 波段
波长范围 (cm)	130 ~ 75	75 ~ 15	15 ~ 7.5	7.5 ~ 3.65	3.65 ~ 2.42	2.42 ~ 1.66	1.66 ~ 1.13	1.13 ~ 0.75	0.75 ~ 0.375
频率范围 (MHz)	225 ~ 400	400 ~ 2000	2000 ~ 4000	4000 ~ 8200	8200 ~ 12400	12400 ~ 18000	18000 ~ 265000	26500 ~ 40000	40000 ~ 80000

1.1.2 发射机和接收机的组成

发射机和接收机是现代通信系统的核心部件。它们是为了使基带信号在信道中有效和可靠地传输而设置的。现以无线广播调幅发射机为例,说明它的组成,如图 1.1-5 所示。

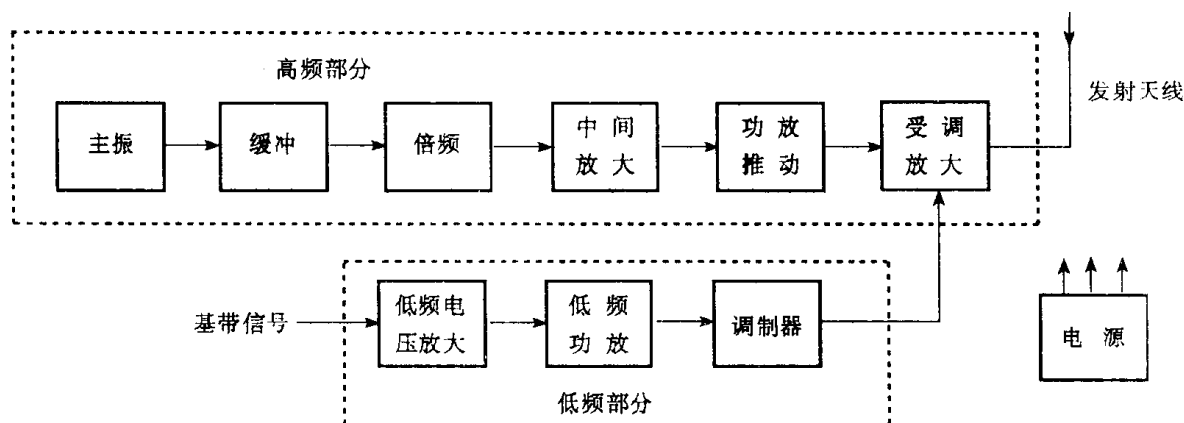


图 1.1-5 调幅发射机组组成方框图

它包括三个组成部分：高频部分、低频部分和电源部分。

高频部分通常由主振、缓冲、倍频、中间放大、功率推动与末级功放(受调放大)组成。主振级的作用间产生频率稳定的载频信号。缓冲级是为减弱后级对主振级的影响而设置的。有时为了提高主振级的频率到所需的数值,缓冲级后要加一级或若干级倍频器。倍频级后加若干级放大器,以逐步提高输出功率,最后经功放推动级,使末级功放输出功率达到所需的发射功率电平,经发射天线辐射出去。

低频部分包括低频电压放大级、低频功放和末级低频功放。基带信号通过逐级放大,在末级功放处获得对高频末级功率放大器进行调制所需的功率电平,因此,末级低频功率放大级又称为调制器,末级高频功率放大级则称为受调放大器。

无线电信号的接收过程正好和发射过程相反。在接收端,接收天线将收到的电磁波转变为已调波电流,然后从这些已调波电流中选择出所需的信号进行放大和解调。这种直接放大式接收机的方框图,如图 1.1-6 所示。

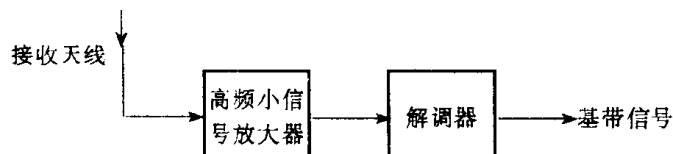


图 1.1-6 直接放大式接收机组组成框图

图中高频小信号放大器通常以 LC 谐振回路为负载完成选频作用。由于直放式接收机的灵敏度和选择性都与工作频率有关(即波段性差),并受高频小信号调谐放大器级数限制,不能过高。因此,目前已不多用。图 1.1-7 所示的超外差式接收机克服了上述缺点,得到广泛应用。

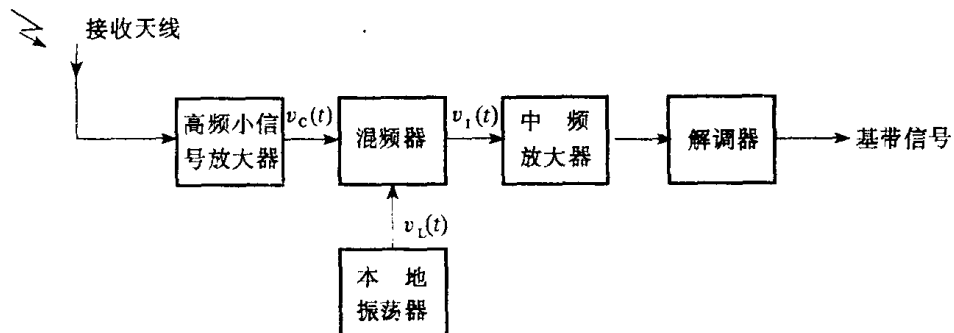


图 1.1-7 超外差式接收机组组成框图

超外差式接收机与直接放大式接收比较,增加了混频器、本地振荡器和中频放大器三种功能电路。混频器的作用是将接收到的不同频率的载波信号变换为固定频率的中频信号。其原理是:用本地振荡器产生的正弦振荡信号 $v_L(t)$ (其频率为 f_L) 与接收到的有用信号 $v_c(t)$ (其频率为 f_c) 在混频器中混频,得到中频信号 $v_1(t)$ (其频率为 f_1),通常选取 $f_1 = f_L - f_c$ 。这种作用就是所谓外差作用,也是超外差式接收机名称的由来。当输入信号频率变化时,使本地振荡器的频率也相应地改变,保持中频固定不变,因此中频放大器的增益和选择性都与接收信号的载频无关了。这就克服了直接放大式的缺点。在第七章中将证明,经混频后所得的中频信号仍是已调信号,且调制规律不变,即中频信号保留了输入信号中全部有用信息。当然,超外差式接收机电路比较复杂,还存在一些特殊的干扰现象(详见 §7.3)这是超外差式接收机的缺点。

1.1.3 本书的研究对象和任务

通过本节的学习,我们已对无线电通信有了一个极粗浅的了解。本书将要讨论的“高频电子线路”究竟包括哪些电路呢?它们都有什么功用?

这可借助图 1.1-5 和图 1.1-7 来说明。在发送机中的主振、倍频、高频功率放大、受调放大(调制)电路和接收机中的高频小信号放大、混频、本地振荡、中频放大、解调电路等,都属高频电子线路的研究对象。它们除了在现代通信系统中占据着“举足轻重”的作用外,还广泛地应用于其他电子设备中。

本书的主要任务是讨论以集总参数为限的上述各高频电子线路的基本组成、工作原理、性能特点、基本工程分析方法。同时,本着贯彻以集成电路为主的原则,删减目前已逐步由相应集成电路取代的分立元件电路,适当增加集成电路、低噪声电路方面的内容。

在上述电路中,除高频小信号放大和中频放大电路属线性电路外,其余者均属非线性电路,作为学习本书的基础知识,有必要首先对非线性电路的特点进行讨论。

§1.2 非线性电路的基本特点

1.2.1 非线性元件与非线性电路

常用的无线电元件有两类:线性元件和非线性元件,其根本区别就在于它们的特性是

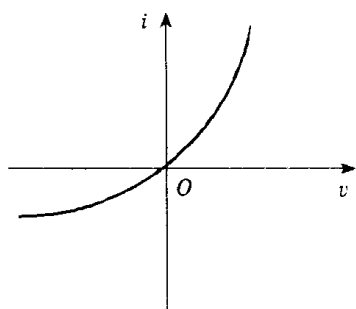


图 1.2-1 伏安特性

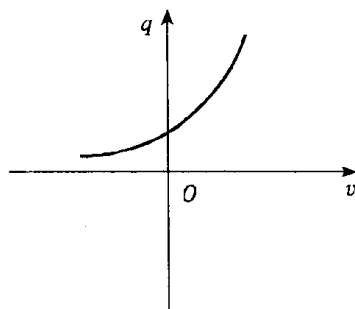


图 1.2-2 伏库特性

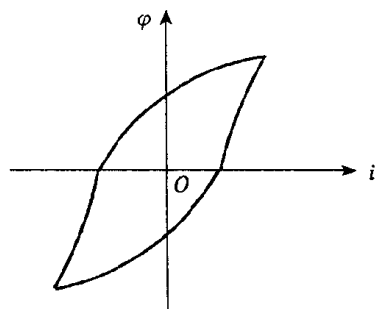
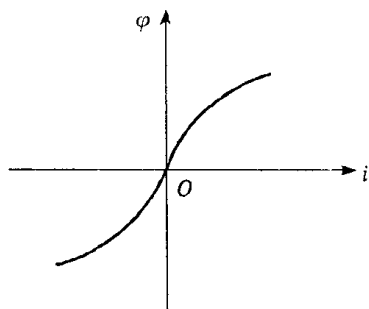


图 1.2-3 安韦特性

线性的，还是非线性的。例如，非线性电阻器是指伏安特性即电压与电流之间的变化特性呈非线性关系的器件（如图 1.2-1 所示）；非线性电容器是指伏库特性即电压与电荷之间的变化特性呈非线性关系的器件（如图 1.2-2 所示）；非线性电感器是指安韦特性即电流与磁链之间的变化特性呈非线性关系的器件（如图 1.2-3 所示）。

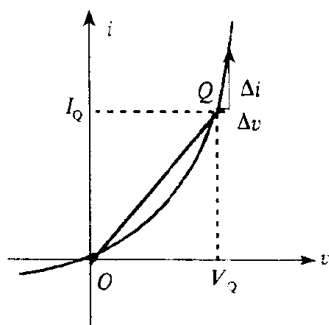


图 1.2-4 g_0 和 g_d 的定义

非线性元件与线性元件比较，有两个突出特性：第一，非线性元件有多种含义不同的参数，而且这些参数都是随激励量的大小而变化。以非线性电阻器件为例，常用的参数有直流电导、交流电导、平均电导等三种。

直流电导又称静态电导，它是指非线性电阻器件伏安特性曲线上任一点与原点之间连线的斜率（如图 1.2-4 所示），用 g_0 表示，其值为

$$g_0 = \frac{I_Q}{V_Q} \quad (1.2-1)$$

它表明直流电流与直流电压之间的依存关系。显然，其值是 V_Q (或 I_Q) 的非线性函数。

交流电导又称增量电导或微分电导，它是指伏安特性曲线上任一点的斜率或近似为该点上增量电流与增量电压的比值，用 g_d 表示，其值为

$$g_d = \left. \frac{di}{dv} \right|_Q \approx \left. \frac{\Delta i}{\Delta v} \right|_Q \quad (1.2-2)$$