

高频电子线路

廖惜春 编著

华南理工大学出版社

高频电子线路

廖惜春 编著

吴运昌 主审

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书共 8 章,内容包括通信系统的整机概念和高频有源器件的特性分析,选频网络与调谐放大器,谐振功率放大器,正弦波振荡器,线性频谱搬移技术与电路,非线性频谱搬移技术与电路,反馈控制电路与锁相环路,通信集成电路及其应用。

本书可作为电子与通信专业的本科教材,亦可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/廖惜春编著. —广州:华南理工大学出版社,2001.9
ISBN 7-5623-1727-5

I. 高… II. 廖… III. 高频-电子电路 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 063613 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

发行电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn http://www2.scut.edu.cn/press

责任编辑: 傅穗文

印 刷 者: 广州市新明光印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16 字数: 389 千

版 次: 2001 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

定 价: 25.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

本书根据近代无线电通信技术的发展现状,在作者多年来课堂教学和实践教学经验的基础上,依据电子信息工程和通信工程专业本科《电子线路》(Ⅱ)教学基本要求,本着“打好基础、加强实践”的原则编著而成。其特点是:以集成电路应用为主,以经典分立元件电路分析为基础,起点于基本概念,落脚于实际应用。本书强调通信系统的整机概念以及系统的增益、带宽、噪声、稳定性、调制与解调和非线性器件的频谱变换等重要概念。注意培养学生分析高频电子线路的方法和读图能力,书中所涉及的电路不少是广播、电视和通信系统的实际电路。同时将现代通信电路中的新动向、新技术介绍给读者。

全书共八章。在第一章中,主要介绍通信系统的整机概念和高频有源器件(BJT, FET, GaAsFET)等的特性分析。第二章介绍线性选频网络和小信号调谐放大器及其分析方法、高频集成电路放大器,并详细介绍了 $\mu\text{pc}16\text{xx}$ 系列集成电路的应用。第三章介绍谐振功率放大器。第四章介绍正弦波振荡器。第五章线性频谱搬移技术与电路,主要介绍振幅调制与解调技术及其电路、混频电路、倍频电路等。第六章非线性频谱搬移技术与电路,主要介绍角度调制及解调电路。第七章介绍反馈控制与锁相环路。第八章通信系统简介,介绍了通信中的几种常见系统及相应的集成电路。为了便于读者学习、掌握重点概念,本书附有一定量的习题与思考题,供读者练习。

本书可作为普通高等院校电子信息工程、通信工程、无线电技术和相近专业的《高频电子线路》、《非线性电子线路》及《通信电子线路》或相近课程的本科教材,也可作为工程技术人员的参考书。书中内容经取舍后,也可用作上述专业的专科、高等职业学校或成人教育的教材。

全书由华南理工大学吴运昌副教授主审。本书的编写得到了五邑大学各级领导的大力支持。吴今培教授、黄皆雨副教授等同行专家也对编写工作给予了热诚指导,还先后得到了黄清容、黄培先同志的鼎力帮助,在此一并表示衷心感谢!

书中错误与不妥之处,敬请读者指正。

编 著 者

2001年3月于五邑大学

本书常用符号

A	运算放大器或放大器增益		(直流分量)
A_u	放大器电压增益	I_m	交流电流的幅值
A_p	放大器功率增益	I_{clm}	集电极脉冲电流中的基波分量幅值
$A(\omega)$	幅频特性	$J_n(m)$	贝塞尔函数
BW	已调波信号的有效频谱带宽	K	回路耦合系数
$BW_{0.7}$	选频回路通频带	$K_{0.1}$	矩形系数
C	电容器或电容量	K_a	调幅(比例常数)调制灵敏度
C_j	变容二极管等效电容	K_d	检波效率
C_M	耦合电容	K_f	调频波调制灵敏度
e	感应电动势	K_m	乘积系数
\dot{E}	感应电动势相量	K_p	调相波调制灵敏度
f	频率	L	电感器或电感量
F	调制信号角频率	M	互感系数
Δf_n	热噪声等效带宽	m_a	调幅指数
g	电导	m_f	调频指数
g_{ie}, g_{oe}	BJT 共射极应用时的输入、输出电导	m_p	调相指数
g_c	跨导、变频跨导	n_1, n_2	回路接入系数
g_m	BJT, FET 跨导	N_f	噪声系数
G	等效回路中的总电导	P_c	BJT 集电极功率损耗
G_p	功率增益	P_E	直流电源提供的功率
G_{pm}	额定功率增益	P_{ni}, P_{no}	输入、输出噪声功率
i	交流电流	P_o	交流输出功率
i_B	交流直流共存的(基极)电流	P_{si}, P_{so}	输入、输出信号功率
i_C	交直流共存的(集电极)电流	Q_L	谐振回路有载品质因数
i_c	集电极交流电流	Q_0	串联谐振回路空载品质因数
i_{cmax}	BTJ 集电极电流脉冲最大值	Q_P	并联谐振回路空载品质因数
$\overline{i_\pi^2}$	噪声电流均方值	r	交流电阻
I	直流电流	R	直流电阻
I_0	恒流源电流	R_d	二极管导通电阻
\dot{i}	正弦电流向量	R_o	输出电阻或串联回路谐振电阻
I_{CO}	集电极脉冲电流中的平均值	R_p	并联回路谐振电阻

S_d	鉴频跨导	\dot{X}_i	反馈系统反馈电量
$S(t)$	开关函数	\dot{X}_o	反馈系统输出电量
$S(f)$	功率谱密度	X_C	电容器容抗
u	交流电压	X_L	电感器感抗
u_{AM}	调幅波电压	Y	电抗或BJT Y参数
u_c	高频载波电压	Z	阻抗
u_{ce}	BJT C-E间交流电压	ω	交流电量角频率
u_{CE}	BJT C-E间交直流共存电压	$\Delta\omega_m$	调角波最大频偏
u_L	本机振荡电压	ω_0	串联谐振回路谐振频率
u_Ω	调制信号电压	ω_P	并联谐振回路谐振频率
u_{FM}	调幅波电压	ω_c	载波角频率或调角波载波中心频率
u_i	输入信号电压	ω_L	本机振荡电量角频率
u_o	交流输出电压	Ω	调制信号角频率
u_s	信号源电压	$\theta(t)$	调角波瞬时相角
$\overline{u_n^2}$	噪声电压均方值	ϕ	相位角
U	直流电压或正弦电压有效值	ξ	谐振回路广义失谐
\dot{U}	正弦电压向量	δ	谐振曲线中心凹陷量
U_{CC}	BJT集电极直流电源电压	η	回路耦合系数、耦合效率
U_m	正弦电压幅值	η_c	电源转换效率
\dot{X}_i	反馈系统输入电量	θ_c	电流通角
\dot{X}_d	反馈系统差值电量		

- 策划编辑 傅穗文 詹志青
- 责任编辑 傅穗文
- 封面设计 吴俊卿

本书依据电子信息工程和通信工程专业本科《电子线路》(II)教学基本要求,本着“打好基础,加强实践”的原则编写而成。全书以集成电路应用为主,以经典分立元件电路分析为基础,从基本概念讲起,注重实际应用。

电气信息类本科系列教材(电子、信息、通信类)

电路分析	李于凡 王定中 主编	定价:42.00元
模拟电子线路基础	吴运昌 主编	定价:39.00元
模拟电子技术实验(第二版)	陈相 吕念玲 编	定价:12.00元
信号与系统 (待出)		
数字电路 (待出)		
微型计算机原理及应用 (待出)		
电磁场与微波技术 (上册·第二版)	马冰然 编	定价:22.00元
电磁场与微波技术 (下册·第二版)	李绪益 编	定价:39.00元
高频电子线路	廖惜春 编著	定价:25.00元
数字信号处理 (待出)		
数字通信原理 (待出)		
电视原理 (待出)		
通信原理 (待出)		
模拟集成电路原理与应用	吴运昌 编著	定价:35.50元
计算机通信网	黄皆雨 编	定价:25.00元
移动通信 (待出)		
程控交换 (待出)		
电路CAD (待出)		
图像处理 (待出)		

ISBN 7-5623-1727-5



9 787562 317272 >

ISBN 7-5623-1727-5
TN·38 定价:25.00元

目 录

1 绪论	(1)	3.2 丙类谐振功率放大器	(66)
1.1 概述	(1)	3.2.1 电路的组成及特点	(66)
1.2 无线电发送、接收系统	(2)	3.2.2 工作原理及性能分析	(67)
1.3 高频有源器件及其特点	(6)	3.2.3 谐振功率放大器的三种状态及基本特性	(72)
1.3.1 BJT、FET 器件的混合 π 型等效模型及其参数	(6)	3.2.4 谐振功率放大器的直流馈电电路	(76)
1.3.2 砷化镓(GaAs MESFET)器件的特性及主要参数	(10)	3.2.5 匹配网络	(78)
思考题与习题	(12)	3.3 宽频带功率放大器	(83)
2 选频网络与调谐放大器	(13)	3.3.1 传输线变压器	(83)
2.1 LC 谐振回路	(13)	3.3.2 功率合成与分配	(88)
2.1.1 LC 串联谐振回路	(13)	思考题与习题	(91)
2.1.2 LC 并联谐振回路	(17)	4 正弦波振荡器	(93)
2.1.3 阻抗变换与接入系数	(21)	4.1 反馈型振荡器的基本原理与分析方法	(93)
2.1.4 耦合电路	(25)	4.1.1 从放大器到振荡器	(93)
2.2 滤波器	(29)	4.1.2 振荡的建立与稳定	(94)
2.2.1 单片滤波器	(29)	4.1.3 振幅平衡条件和相位平衡条件	(94)
2.2.2 声表面波滤波器(SAWF)	(34)	4.1.4 振荡器的分析方法	(95)
2.3 小信号调谐放大器	(37)	4.2 LC 正弦波振荡器	(97)
2.3.1 晶体管调谐放大器	(37)	4.2.1 LC 三点式振荡器相位平衡条件的判断准则	(97)
2.3.2 场效应管调谐放大器	(46)	4.2.2 基本 LC 三点式振荡器电路	(98)
2.3.3 调谐放大器的稳定性	(49)	4.2.3 改进型电容三点式振荡器	(100)
2.4 高频集成放大器	(50)	4.2.4 集成 LC 正弦波振荡器	(101)
2.4.1 高频集成放大器的特点	(50)	4.2.5 压控振荡器(VCO)	(104)
2.4.2 高频集成电路放大器	(51)	4.3 振荡器的稳定性	(107)
2.5 放大器的噪声	(56)	4.3.1 振荡器平衡状态的稳定条件	(107)
2.5.1 内部噪声的特点和来源	(57)	4.3.2 频率稳定度及稳定频率的措施	(109)
2.5.2 噪声系数	(59)	4.4 石英晶体振荡器	(110)
思考题与习题	(61)	4.4.1 并联型晶体振荡电路	(111)
3 谐振功率放大器	(65)	4.4.2 串联型晶体振荡电路	(112)
3.1 概述	(65)		
3.1.1 影响放大器输出功率的主要因素	(65)		
3.1.2 提高放大器输出功率的方法	(65)		
3.1.3 工作状态的选择	(66)		

思考题与习题	(113)	6.4 限幅电路	(197)
5 线性频谱搬移技术与电路	(118)	6.4.1 二极管限幅电路	(197)
5.1 频谱搬移的原理	(118)	6.4.2 三极管限幅器	(198)
5.1.1 频谱搬移的基本原理	(119)	6.4.3 差分对限幅器	(198)
5.1.2 模拟乘法器的特性及工作原理	(119)	6.5 预加重-去加重电路	(199)
5.1.3 非线性器件的频谱变换作用	(123)	思考题与习题	(200)
5.2 振幅调制	(124)	7 反馈控制电路与锁相环路	(203)
5.2.1 调幅波的波形、频谱及数学表达式	(124)	7.1 反馈控制电路	(203)
5.2.2 调幅波的功率关系	(127)	7.1.1 自动增益控制(AGC)电路	(203)
5.2.3 双边带调幅(DSB)和单边带调幅(SSB)	(128)	7.1.2 自动频率微调(AFT)电路	(206)
5.2.4 调幅电路	(129)	7.2 自动相位控制(APC)电路	(208)
5.3 振幅解调电路	(136)	7.2.1 集成锁相环的基本部件及相位模型	(209)
5.3.1 乘法器检波	(137)	7.2.2 锁相环的自动调节过程	(213)
5.3.2 二极管包络检波	(139)	7.3 集成锁相环的应用	(215)
5.3.3 检波器参数选择	(143)	7.3.1 通用集成锁相环组成锁相解调电路	(215)
5.3.4 实际二极管检波电路	(144)	7.3.2 锁相在倍频、分频、混频和接收机中的应用	(218)
5.3.5 平均值包络检波	(145)	7.3.3 集成锁相频率合成技术	(220)
5.4 变频与倍频	(146)	思考题与习题	(220)
5.4.1 混频	(146)	8 通信系统简介	(222)
5.4.2 倍频	(160)	8.1 单片收音机系统	(222)
思考题与习题	(163)	8.1.1 CXA119FM/AM 单片收音机电路	(222)
6 非线性频谱搬移技术与电路	(167)	8.1.2 TDA70××系列 FM 收音机电路	(223)
6.1 调频波的性质	(167)	8.2 小功率调频发射机系统	(227)
6.1.1 瞬时频率与瞬时相位	(167)	8.2.1 MC2831/2833 子系统	(227)
6.1.2 调频波的数学表达式及波形	(168)	8.2.2 MC13175/13176 子系统	(230)
6.1.3 调相波的数学表达式及波形	(168)	8.3 小功率调频接收系统	(232)
6.1.4 调角波的频谱及带宽	(169)	8.3.1 MC3362FM 接收机系统	(232)
6.2 实现调频的原理与方法	(172)	8.3.2 MC13135/13136FM 接收机系统	(234)
6.2.1 直接调频	(173)	8.4 小功率调频中放系统	(236)
6.2.2 间接调频	(177)	8.4.1 MC3359 基本特点	(236)
6.3 调角波的解调	(181)	8.4.2 MC3359 引脚功能	(236)
6.3.1 斜率鉴频	(182)	8.4.3 MC3359/3361 典型应用电路	(237)
6.3.2 相位鉴频器	(185)	8.5 GSM 移动电话系统	(238)
6.3.3 比例鉴频器	(187)	8.5.1 接收电路	(238)
6.3.4 乘法器相位鉴频器	(190)	8.5.2 发射电路	(241)
6.3.5 差分峰值鉴频器	(193)	参考文献	(243)
6.3.6 脉冲计数式鉴频器	(195)		

1 绪 论

1.1 概述

自 19 世纪末至今,在自然科学领域有许多重大发现和发明,无线电是这些发明中极其重要的一种。它从诞生到现在的近百年中,对人类的生活和生产起着非常重要的作用。

高频电子线路是无线电设备、通信等系统中的重要组成部分。人们在生活和生产活动中需要将语言、文字、图像及数据等从一个地方传送到另一个地方,所要传送的原始消息(语言、文字、图像、数据等)是声、光等信号,必须用换能器(如麦克风等)使之转换为电信号(电流或电压)以便于传送,这些反映原始消息的电信号称为基带信号。基带信号不适宜直接传送,其原因有两个:一是它们的频率较低、波长较长,不能通过天线有效地发送信息;二是各信号的频谱分布几乎在同一频率范围,如果直接把反映原始信息的电信号通过天线,以辐射电磁波的方式传送或通过电缆、光缆传送,则信道就无法保证同时传送两路以上的信息而又互不干扰,同时也不便于接收端正确分离两路以上的信息。因此,必须设法把要传送的电信号分开,重要的方法之一是将欲传送的基带信号加载(调制)到某一特定频率的高频电振荡(称为载波)信号上,载有基带信息的高频振荡信号可通过电缆或光缆把信息传送到接收端,也可通过天线辐射出高频电磁波,将信息传送到接收机。

众所周知,任何载有消息的无线电波都占据一定的频带。频率越高,可利用的总频带(或称波段)就越宽,因此利用高频已调波可在同一波段同时传送多个不同的信息。另外,某些频带很宽的原始信息(如雷达信号、电视图像、多路语音)只能在高频率上传输,如电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz,它适宜在几十兆赫以上的频率上传输。

不同波段的无线电波应选择不同的传播方式。传播方式的不同,决定了传播的距离和传播特性(如信号的稳定性、衰耗等)的差异。通常,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(天线传播)、对流层散射传播及卫星传播等,图 1-1-1 为其示意图。

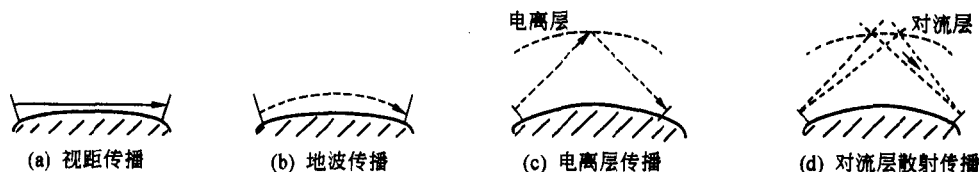


图 1-1-1 无线电波的几种主要传播方式

表 1-1-1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式和用途。表中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。通常将高于 1000 MHz 的厘米波、毫米波等波段统称为微波。本书所讨论的是狭义的高频范围,但它所涉及的一些高频电路的基本原理在微波范围内也适用。

表 1-1-1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围	频率范围	主要传播方式和用途
长波	1000~10000m	30~300 kHz	地波,较远距离通信
中波	100~1000m	300~3000 kHz	地波、天波,广播、通信、导航
短波	10~100m	3~30MHz (HF 频段)	天波、地波,广播、通信
超短波	1~10m	30~300 MHz (VHF 频段)	视距传播、对流层散射,通信、电视、雷达
分米波	10~100cm	300~3000 MHz(UHF 频段)	视距传播、对流层散射,卫星通信、雷达,电视
厘米波	1~10cm	3~30 GHz (SHF 频段)	视距传播,中继、卫星通信、雷达
毫米波	0.1~1 cm	30~300 GHz (极高频)	视距传播,射电天文,卫星通信、雷达

显然,对各种无线电通信系统,尽管它们在传递信息形式、工作方式及设备体制等方面有所不同,但设备中所包含的对高频信号的产生、接收及检测处理的基本电路大都类似,这些电路统称为高频电子线路。可见,高频电子线路是随着无线电通信手段的出现而出现,且随着通信容量的不断增大,使用的频率不断提高,高频电子线路也随之发展。高频电子线路的各种功能电路的组成及性能则随微电子技术的发展而发展。它经历了电子管电路、晶体管电路和集成电路三个重要阶段。目前高频电路和模拟电路、数字电路一样,电路的集成度越来越高,各种高频集成电路新器件不断问世,应用越来越广泛,计算机技术也在高频电子线路中得到了应用。高速 DSP(数字信号处理器)结合 MCU(微处理器),把传统的模拟高频电信号的处理变成数字信号进行处理,使得现代无线电信号的处理速度更快,通信质量更高。

本书将结合无线电通信电路,以集成电路为主线,从分立元件电路入手,分析高频电路中的基本单元电路的组成及工作原理。并根据目前高频集成电路的发展,尽可能多地介绍高频集成电路的特性及其典型应用电路。

1.2 无线电发送、接收系统

通信的主要任务就是传输消息,一般含义是从发送者到接收者之间的消息传递,这种利用电信号实现消息传送过程的系统称为通信系统。其中利用电缆传送信息的系统称为有线通信系统;利用电磁波传送信息的系统称为无线通信系统;利用光导纤维传送信息的系统称为光纤通信系统。通信系统主要由输入/输出换能器、发送/接收设备和信道等三大部分组成,图 1-2-1 是无线电通信系统的基本组成方框图。

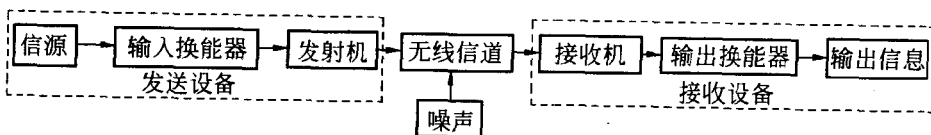


图 1-2-1 无线电通信系统的组成框图

在无线电通信系统中,信道就是电磁波传播的空间,不同频段的电磁波有不同的传播方式和传播特性;而在有线通信系统中,信道则是电缆(或光缆)。

发送设备包括换能器、发射机和发射天线三部分。其中换能器将待发送的信息变换为电信号,如果信息表现为声音,那么换能器就是将声音变换为电信号的话筒。发射机将该电信号放大并变换为足够强度的高频电振荡。发射天线则将高频电振荡变换为电磁波向外辐射。

接收是发射的逆过程,接收设备由接收天线、接收机和换能器组成。其中接收天线将空间传播的电磁波变换为高频电信号,由接收机对该信号进行相应的加工处理,换能器则将处理后的电信号还原为所传送的基带信号。如果基带信号表现为声音,那么换能器就是将电信号变换为声音的扬声器。

从原理上看,调制过程的实质是一个由基带信号(又称为调制信号)去控制高频载波信号的某一参数,使该参数按照调制信号的规律变化的过程。而高频载波信号(电压或电流)的振幅、频率、相位三个参数可被调控,与之对应的可实现三种基本调制,分别是调幅波(AM)、调频波(FM)和调相波(PM)。

当用电报信号或数字信号调制时,通常又称键控,此时载波的振幅、频率、相位在有限的几个值之间变化,故数字信号的调制又分别称振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)。除这些基本调制外,还可以实现某些组合调制。在微波通信中还用到以脉冲信号为中间信号的二重调制,即信息信号先对脉冲进行调制(或对脉冲信号编码),然后用此脉冲信号对载波进行调制。有关数字信号的调制技术请读者参阅其他文献。

图 1-2-2 是无线电通信发射机的组成框图,其中图(a)是调幅发射机的组成框图,它包括三个组成部分:高频(振荡器、缓冲器、倍频器、高频功放、调制和解调)电路、低频电路和电源部分(未画出)。图(b)是手持电话机的组成框图。

图中,振荡器的作用是产生频率稳定的高频载波信号。为了提高频率稳定度,通常采用石英晶体振荡器,并在其后加一缓冲级,以减小后级对它的影响。一般晶体振荡器的振荡频率不太高,达不到载波所要求的频率 f_c ,因而在缓冲级后需加若干级倍频器,将频率提高到所需频率 f_c 上。在图(b)所示接收机中,由于对振荡信号的频率稳定度要求高,所以振荡信号常常由频率合成电路提供;同时电路中还采用了 DSP(数字信号处理)电路、CPU(中央处理器)和 A/D、D/A 电路等,对音频信号进行处理。高频功率放大器的主要作用是把信号放大到足够的功率电平,由发射天线将高频已调信号辐射出去。

从换能器(如话筒)输出的低频调制信号经若干级放大器放大到足够的功率电平后,就可以用来对高频载波信号进行调制。

发射机高频输出功率的大小随用途的不同而异,一般通信发射机的高频输出功率从几百毫瓦以至数千瓦,广播及电视发射机的高频输出功率则可高达几千瓦至几十千瓦。

无线电信号的接收过程正好和发送过程相反,由接收天线接收到的电磁波先转变为已调高频振荡电流(或电压),然后从已调高频振荡电流(电压)中检测出原调制信号,这一过程称为解调。图 1-2-3 是无线电通信接收机的组成方框图。

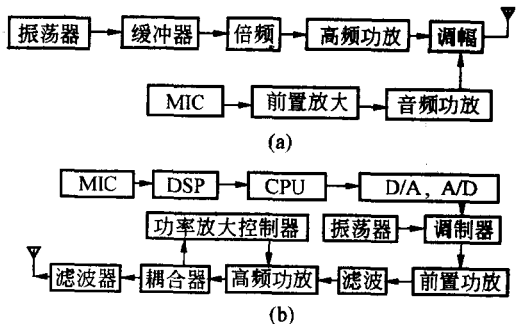


图 1-2-2 无线电通信发射机方框图
(a)调幅发射机框图; (b)手持电话发送部分框图

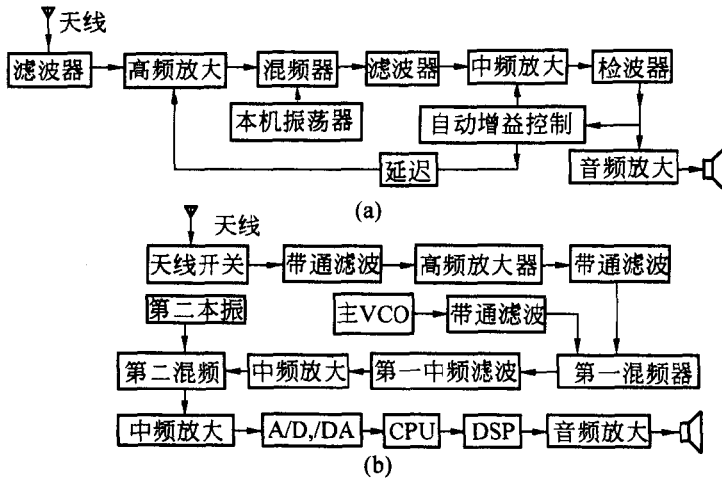


图 1-2-3 无线电通信接收机的组成方框图
(a)超外差调幅接收机框图；(b)手持电话接收部分框图

其中,图(a)是超外差调幅接收机的框图。图中高频放大器是由一级或多级小信号谐振放大器组成的,它的作用是利用电路中的谐振网络,从天线接收到众多频率的信号中选出所需信号,并予以放大。图(b)是手持电话接收部分的框图。值得注意的是,由于谐振放大器的中心频率随所需接收的信号频率 f_c 不同而异,因此高频放大器选频网络的中心频率必须是可调节的,这就需要用到自动频率调节(AFT)电路。

混频器是超外差接收机的核心,其作用是将高频放大器输出的频率为 f_c 的高频已调信号与来自本地振荡器的频率为 f_L 的高频振荡信号相差拍,产生和频或差频分量,使高频已调波不失真地变换为载波频率为 f_1 的中频已调波信号。 f_1 是固定值,称为中频。

本地振荡器是用以产生频率为 $f_L = f_c \pm f_1$ 的高频振荡信号。由于 f_1 为固定值,而 f_c 随所需接收信号不同而不同,所以,振荡器的振荡频率 f_L 是可调的,且必须使其正确跟踪 f_c 。目前多采用 $f_L = f_c \pm f_1$ 方式,即超外差接收方式。

中频放大器是由多级小信号谐振放大器组成的中心频率固定的带通放大器,用以选择并放大中频调幅信号。中频放大器通常还带有自动增益控制(AGC)电路。

检波器的功能是从中频放大器输出的中频调幅信号中检测(解调)出反映被传送的调制信号。

低频放大器由若干级小信号电压放大器和功率放大器组成,用以放大调制信号并经扬声器发出声音。

由上述可见,在发射机和接收机中,除了低频放大器外,其他都是处理高频信号的电路,它包括高频信号的产生(振荡器)、放大(小信号放大器、功率放大器)、频率变换(倍频、混频)、调制和解调电路。这些单元电路都是由有源器件(分立元件或集成电路)和无源器件构成,既有线性电路,也有非线性电路。这些单元电路及有关的技术问题,就是本书讨论的对象,显然,它们性能的好坏,直接影响整个通信系统的质量。

实际的通信设备通常比前面介绍的例子复杂得多,且除了采用上述调幅方式外,还可采

用调频等其他调制方式。但无论采用何种调制方式,发射机和接收机都必须包括上述各组成方框,其区别主要在调制和解调器的方式不同。

随着微电子技术、数字信号处理(DSP)技术和计算机技术的发展,无线电技术发生了根本性变化,从单工到双工通信,从模拟到数字通信,从固定到移动通信,而且通信体制和标准繁多,通信容量的迅速扩大与频率资源极度紧张之间的矛盾日趋激化,于是,第三代无线电通信正朝着数字化方向——软件无线电(Software Radio)发展,以解决上述矛盾。

软件无线电是在数字化技术的基础上发展起来的,是第三代移动通信技术的新亮点。它将无线电通信从以硬件为主转变到以软件为主,使无线电通信摆脱硬件系统结构的束缚。这一技术最初是在军事通信中提出来的。为了使各军兵种之间的通信具有协调、保密、机动、抗干扰和抗摧毁等功能,因而提出了采用软件实现通信的各种功能。它的主要思想是以 DSP(数字信号处理器)和 CPU(微处理器)为核心,构造一个开放性、标准化、模块化的通用硬件平台,将信号的调制解调方式、频段和信道选择、数据格式、加密模式、通信协议、滤波等功能以及不同体制标准等,采用模块化的软件加载来实现,并使宽带 A/D(模拟/数字信号转换)、D/A(数字/模拟信号转换)尽可能靠近天线,利用 DSP 完成诸如放大、变频、解调和抗干扰等功能,使系统成为由软件定义的、模块化结构的、具有高灵敏度、开放性的通信系统。

与目前的数字通信相比,软件无线电的主要特点是通信的全过程充分数字化、完全可编程、程控多频多模转换和多种业务服务等。其产品硬件更新可以像计算机升级换代一样简单;产品的软件开发和更新换代的成本低。由软件实现的系统各主要功能,更易于通过软件加载实现,也易于通过采用新的信号处理手段,提高系统抗干扰性能和适应能力。

但软件无线电也提出了新的技术问题,例如,多频段多波束智能天线阵及其算法、宽带射频前端技术、调整宽带 A/D、调整实时数字信号处理技术、数字上/下变频技术以及合适的软件无线电的系统结构和通信协议等。图 1-2-4 所示为软件无线电数字化超外差接收机的基本框图。

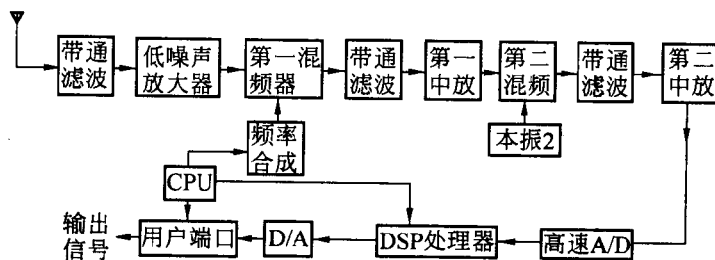


图 1-2-4 软件无线电数字化超外差接收机基本框图

从图 1-2-4 可见,射频(RF)信号从天线接收,经过预选带通滤波器、宽频带低噪声放大器(LNA)、第一混频器、滤波放大后再二次混频,产生第二中频信号,通过滤波放大作为高速 A/D 的输入信号,此后,进行数字信号处理,最后输出所需的音频信号。软件无线电的独特优点是具有整体可编程性:射频频段可编程、信道访问模式可编程、信道编码可编程和调制方式可编程等;而且系统配置灵活,系统功能的增加或改变,只需要适当调整软件及接口功能等,而不需要重新设计系统,特别是硬件系统。由于器件的限制,高速 A/D 和 DSP 等目前只在中频段使用,随着技术的发展,将向射频段发展。

1.3 高频有源器件及其特点

为了分析和设计各种高频电子线路,必须了解各种器件在高频运用时所具有的特性及其主要参数。本节主要讨论 BJT, FET 器件的高频等效模型及其参数以及有关器件的高频特性和主要参数,并介绍砷化镓器件的特性及参数等。

1.3.1 BJT, FET 器件的混合 π 型等效模型及其参数

在高频小信号放大器的分析和设计中,通常是采用等效电路法,即假定放大器工作于线性状态,把器件用一线性等效电路来代替电路中的有源器件,以使用电路理论来进行分析、计算。有源器件的小信号等效电路通常又称为小信号等效模型。根据导出的方法不同,器件的等效模型可分为两类:一类是根据器件内部的物理结构及其物理模型所得出的模拟等效电路,其等效模型为混合 π 型等效电路;第二类是把器件等效为有源四端网络,用一些网络参数组成的等效模型,主要有 H 参数等效电路、 Y 参数等效电路等。在分析高频电子电路时,常用混合 π 型等效电路及 Y 参数等效电路。

1.3.1.1 BJT 高频混合 π 型等效模型及其参数

BJT-双极型结型晶体三极管的连接方式有共发射极、共基极和共集电极三种基本电路组态,它们仅是同一个晶体管的三种不同的连接方式。因此,知道其中一种组态的等效电路,就可以将它转换成其他两种组态。下面主要介绍共发射极电路的等效模型。

图 1-3-1a 为 BJT 的共发射极电路,根据晶体三极管的物理结构及物理过程可得其小信号高频混合 π 型等效模型,如图 1-3-1b 所示。图中 b' 为有效基极,根据晶体管的放大原理及物理过程,其电流放大作用主要表现在集电极输出电流 i_c 受发射结有效输入电压 $u_{b'e}$ 的控制作用。在等效模型中,这种作用受 $u_{b'e}$ 控制的电流源表示,即

$$i_c = g_m u_{b'e} \quad (1-3-1)$$

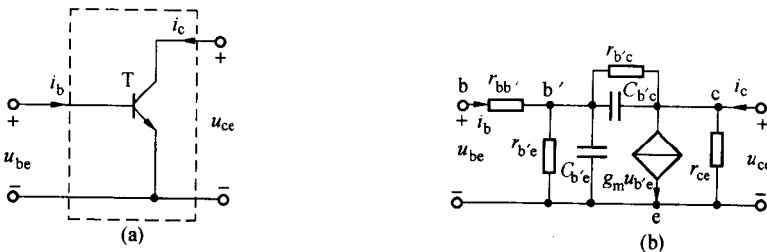


图 1-3-1 BJT 的混合 π 型模型

(a) 共发射极电路; (b) 混合 π 型等效模型

式中, g_m 表示 $u_{b'e}$ 对 i_c 的控制能力,称为正向传输电导,常称为跨导。

$$g_m = i_c / u_{b'e} = \Delta i_c / \Delta u_{b'e} = I_E (\text{mA}) / 26 (\text{mV}) \quad (1-3-2)$$

$r_{b'e}$ 是发射结的结电阻,其值较小。

$$r_{b'e} = \beta_0 r_e = 26 \beta_0 / I_E \quad (1-3-3)$$

$C_{b'c}$ 是发射结的扩散电容,对小功率管为几十~几百 pF。

$C_{b'e}$ 是集电结的势垒电容,对小功率管一般为 2~10 pF。

$r_{b'e}$ 是集电结电阻,由于集电结总是处于反向偏置,所以 $r_{b'e}$ 数值很大,一般在 100 k Ω ~10 M Ω 之间。

$r_{b'b}$ 是基极电阻,表示从基极引出端 b 到内部端点 b' 之间的等效电阻; $r_{b'b}$ 是高频等效电路的重要参数之一,不同类型的三极管, $r_{b'b}$ 的值相差较大,一般可查手册。发射区、集电区的体电阻 $r_{e'e}$, $r_{c'c}$, 因其值很小而忽略,故图中未画出。

应该指出, $C_{b'c}$ 和 $r_{b'b}$ 的存在对晶体管的高频运用是十分不利的。 $C_{b'c}$ 将输出的交流电流反馈一部分到输入端(基极),可能引起放大器自激。 $r_{b'b}$ 在共基电路中引起高频负反馈,降低了晶体管的电流放大系数,所以希望 $C_{b'c}$ 和 $r_{b'b}$ 尽量小。目前所通用的平面管,它们都较小。 $r_{e'e}$ 是集-射极电阻,它表示当 u_{ce} 变化时由于基区宽度调制效应对电流 i_c 的影响,其值在几十 k Ω ~几百 k Ω 之间; $r_{e'e}$ 一般与负载 R_L 并联,且 $r_{e'e} \gg R_L$, 因此, $r_{e'e}$ 常常被忽略。

1.3.1.2 FET 的高频混合 π 等效模型及其参数

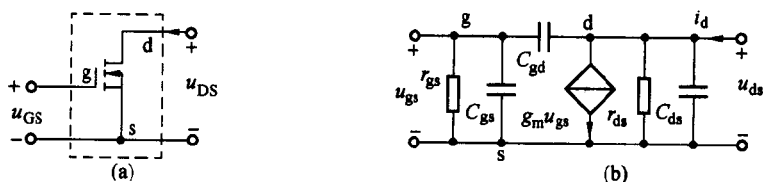


图 1-3-2 场效应管混合 π 型模型

(a) 共源极电路; (b) FET 模型

图 1-3-2a 是 FET 的共源电路。根据 FET 的内部物理结构及其物理过程,可得高频混合 π 型等效模型,如图 1-3-2b 所示。

根据 FET 的物理结构、工作的物理过程,漏极输出电流 i_d 受输入电压 u_{gs} 的控制,而 i_d 可用 u_{gs} 控制的电流源 $g_m u_{gs}$ 来等效。因此,场效应管的输出端可以等效成一个内阻为 r_{ds} 且受 u_{gs} 控制的电流源 $g_m u_{gs}$ 。其中, g_m 称为场效应管的跨导,定义为

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_Q = \left. \frac{i_d}{u_{gs}} \right|_{u_{ds}=0} \quad (1-3-4)$$

它表示栅-源电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制能力,反映了场效应管的放大能力。其值一般比 BJT 小一个数量级。

r_{ds} 称为交流短路时的漏极输出电阻,定义为

$$r_{ds} = \left. \frac{\Delta u_{ds}}{\Delta i_D} \right|_Q = \left. \frac{u_{ds}}{i_d} \right|_{u_{gs}=0} \quad (1-3-5)$$

表示 u_{gs} 不变时, u_{DS} 的变化所引起的 i_D 的变化。其值较大,通常为几十 k Ω ~几百 k Ω 。

图中 r_{gs} 为场效应管的输入电阻,由于栅-源极间的输入端或处于反向偏置(结型),或处于绝缘状态(MOS 型),所以 r_{gs} 极高,栅极电流极小(近似为零), r_{gs} 值常在 100 M Ω 以上。故 r_{gs} 常近似视为开路。

等效模型中电容 C_{gs} , C_{gd} 和 C_{ds} 分别为栅-源间、栅-漏间和漏-源间的极间电容。FET 在运用高频时, 这些电容必须考虑。

1.3.1.3 混合 π 型参数与 Y 参数的关系

在超高频范围内, 各种高频器件还常用 Y 参数模型来进行等效。这是因为, 晶体管(或场效应管)等效参数与调谐回路并联, 因而用导纳形式方便分析计算; 同时 Y 参数易于通过实验手段进行测试和分析, Y 参数也可用矩阵方法表示, 便于计算机辅助计算。

为了分析方便, 将三极管看做一个二端口网络。如图 1-3-3a 所示。

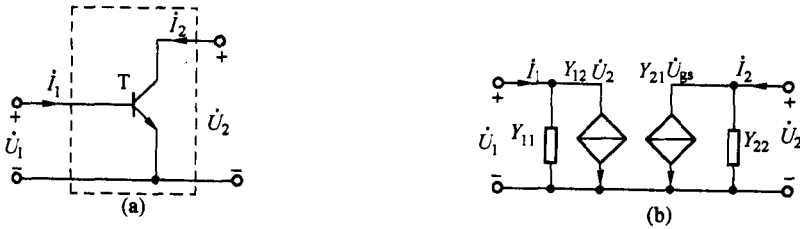


图 1-3-3 晶体管的 Y 参数模型
(a) 二端口网络; (b) Y 参数等效电路

根据图 1-3-3b 所示等效电路, 列方程如下:

$$\dot{I} = Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2 \quad (1-3-6)$$

$$\dot{I} = Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2 \quad (1-3-7)$$

式中, $Y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$ 称为输出短路时的输入导纳;

$Y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$ 称为输出短路时的正向传输导纳;

$Y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$ 称为输入短路时的反向传输导纳;

$Y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$ 称为输入短路时的输出导纳。

Y 参数仅表示晶体管在输入端或输出端短路时的参数。它们都是晶体管本身的参数, 只与晶体管特性有关, 而与外电路无关。对共射极电路来说, 根据图 1-3-1b 及 Y 参数的定义, 并考虑到等效模型中通常满足 $r_{b'c} \gg r_{b'e} \gg r_{bb'}$, $r_{b'e} \ll 1/\omega C_{b'c}$, $1/g_m \ll 1/\omega C_{b'c}$, 于是可求得共射极晶体管的 Y 参数与混合 π 型参数之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} Y_{ie} &= \frac{g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})}{1 + j\omega r_{bb'}(C_{b'e} + C_{b'c})} \\ Y_{re} &= \frac{j\omega C_{b'c}}{1 + j\omega r_{bb'}(C_{b'e} + C_{b'c})} \\ Y_{fe} &= \frac{g_m}{1 + j\omega r_{bb'}(C_{b'e} + C_{b'c})} \\ Y_{\alpha e} &\approx g_{\alpha e} + j\omega C_{b'c} + \frac{j\omega g_m r_{bb'} C_{b'c}}{1 + j\omega r_{bb'}(C_{b'e} + C_{b'c})} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-8)$$