

新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材



应用电子技术专业

# 高频电子线路

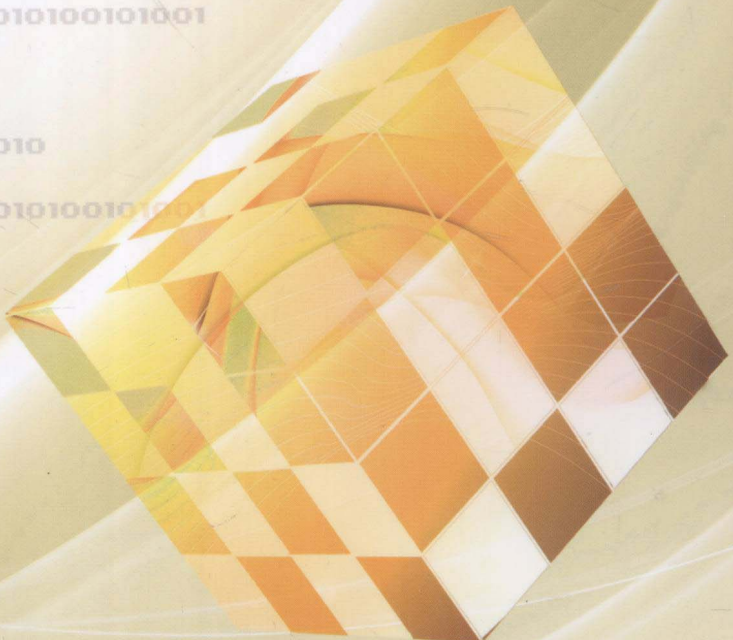
## (第3版)

林春方 主 编

彭俊珍 方庆山 副主编

陶亚雄 主 审

010101001  
010101001010010101010010100101010  
01010100101001010101  
0101010010100101010100101001010101001  
01010100101  
010101001010010101010010100  
010101001010010101010010100101010  
01010100101001010101  
0101010010100101010100101001010101001  
01010100101  
010101001010010101010010100  
010101001  
010101001010010101010010100101010  
01010100101001010101  
0101010010100101010100101001010101001  
01010100101  
010101001010010101010010100  
010101001  
010101001010010101010010100101010  
01010100101001010101  
0101010010100101010100101001010101001  
01010100101  
010101001010010101010010100  
010101001



新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·应用电子技术专业

# 高频电子线路

## (第 3 版)

林春方 主 编

彭俊珍  
方庆山 副主编

陶亚雄 主 审

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

高频电子线路是电子与通信技术专业的一门重要专业基础课程,全书系统地介绍了无线通信系统主要单元电路的组成与工作原理。本书的主要内容包括:高频小信号放大器,高频功率放大器,正弦波振荡器,调幅、检波与混频,角度调制与解调以及反馈控制电路。本书强调基本概念,注重实际应用,各章末附有相应的技能训练,书末还附有高频电子线路 EWB、Labview 仿真实验以及收音机的装配调试实训等内容。

本书可作为高职高专院校电子信息技术、应用电子技术、通信技术及相关专业的教材或参考书,也可供相关专业工程技术人员参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 林春方主编. —3 版. —北京: 电子工业出版社, 2010.1

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·应用电子技术专业

ISBN 978-7-121-09934-2

I. 高… II. 林… III. 高频—电子电路—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 214163 号

策 划: 陈晓明

责任编辑: 陈晓明 特约编辑: 张晓雪

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 印张: 12.75 字数: 326 千字

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 21.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。



### 作者简介：

林春方，男，1964年出生，安徽无为  
人，工程硕士，教授，技师。1985年  
7月毕业于安徽大学无线电系无线电  
技术专业，并获学士学位；2006年获  
南京理工大学电子与通信工程专业工  
程硕士。2005~2006年在中国科学技术  
大学做访问学者。自毕业以来，一直  
从事职业教育教学及管理工作。在省  
级以上刊物上发表论文近20篇，其中  
2篇论文被EI检索；主编及参编电子信  
息类专业教材近20部；主持省级教研  
项目4项，参与省级教研项目2项；荣  
获安徽省教学成果三等奖1次。1997  
年被安徽省信息产业厅授予“优秀教  
师”，2003年被中共安徽省委组织  
部、中共安徽省委宣传部、中共安徽  
省教育工作委员会联合授予“全省高  
校优秀共产党员”，2004年被安徽省  
人事厅、安徽省教育厅联合授予“全  
省模范教师”，2006年荣获第二届安  
徽高等学校“省级教学名师奖”，  
2008年荣获安徽省蚌埠市“劳动模  
范”等光荣称号。在2006~2010年期  
间被教育部聘为高职高专通信类专业  
教学指导委员会委员。

# 目 录

绪论 .....	(1)
本章小结 .....	(5)
思考与练习 .....	(5)
<b>第 1 章 高频小信号放大器</b> .....	<b>(6)</b>
1.1 宽带放大器的特点、技术指标和分析方法 .....	(6)
1.1.1 宽带放大器的主要特点 .....	(6)
1.1.2 宽带放大器的主要技术指标 .....	(7)
1.1.3 宽带放大器的分析方法 .....	(7)
1.2 扩展放大器通频带的方法 .....	(9)
1.2.1 负反馈法 .....	(9)
1.2.2 组合电路法 .....	(9)
1.2.3 补偿法 .....	(10)
1.3 小信号谐振放大器 .....	(13)
1.3.1 小信号谐振放大器的分类和主要性能指标 .....	(13)
1.3.2 单级单调谐放大器 .....	(15)
1.3.3 多级单调谐放大器 .....	(17)
1.3.4 双调谐放大器 .....	(18)
1.3.5 调谐放大器的稳定性 .....	(19)
1.4 集中选频放大器 .....	(20)
1.4.1 集中选频放大器的组成 .....	(20)
1.4.2 集中选频滤波器 .....	(21)
1.4.3 集中选频放大器的应用 .....	(23)
技能训练 1 高频小信号谐振放大器的测试 .....	(25)
本章小结 .....	(26)
习题 1 .....	(26)
<b>第 2 章 高频功率放大器</b> .....	<b>(28)</b>
2.1 概述 .....	(28)
2.1.1 高频功率放大器的分类 .....	(28)
2.1.2 丙类谐振功率放大器的特点 .....	(28)
2.1.3 丙类谐振功率放大器的主要性能指标 .....	(29)
2.2 丙类谐振功率放大器 .....	(29)
2.2.1 丙类谐振功率放大器的工作原理 .....	(29)
2.2.2 丙类谐振功率放大器的性能分析 .....	(33)
2.2.3 丙类谐振功率放大器电路 .....	(37)



2.3	丙类倍频器 .....	(41)
*2.4	丁类高频功率放大电路简介 .....	(42)
2.5	宽带高频功率放大器 .....	(43)
2.5.1	传输线变压器 .....	(43)
2.5.2	功率合成与分配电路 .....	(45)
	技能训练 2 谐振功率放大器的性能测试 .....	(47)
	本章小结 .....	(48)
	习题 2 .....	(49)
<b>第 3 章</b>	<b>正弦波振荡器 .....</b>	<b>(50)</b>
3.1	反馈式振荡器的工作原理 .....	(50)
3.1.1	组成与分类 .....	(50)
3.1.2	平衡条件和起振条件 .....	(51)
3.1.3	主要性能指标 .....	(52)
3.2	LC 正弦波振荡器 .....	(54)
3.2.1	变压器反馈式正弦波振荡器 .....	(54)
3.2.2	三点式振荡器 .....	(56)
3.2.3	改进型电容三点式振荡器 .....	(59)
3.3	石英晶体振荡器 .....	(60)
3.3.1	石英谐振器及其特性 .....	(60)
3.3.2	石英晶体振荡器 .....	(62)
3.4	RC 正弦波振荡器 .....	(64)
3.4.1	RC 串并联选频网络 .....	(64)
3.4.2	文氏电桥振荡器 .....	(66)
3.4.3	RC 桥式振荡器的应用举例 .....	(67)
*3.5	负阻正弦波振荡器 .....	(68)
3.5.1	负阻器件 .....	(68)
3.5.2	负阻振荡原理 .....	(69)
3.5.3	负阻正弦波振荡器电路 .....	(70)
	技能训练 3 RC 正弦波振荡器的设计与调试 .....	(71)
	本章小结 .....	(73)
	习题 3 .....	(74)
<b>第 4 章</b>	<b>调幅、检波与混频 .....</b>	<b>(77)</b>
4.1	调幅波的基本性质 .....	(77)
4.1.1	调幅波的数学表达式和波形 .....	(77)
4.1.2	调幅波的频谱与带宽 .....	(78)
4.1.3	调幅波的功率关系 .....	(79)
4.1.4	双边带调制与单边带调制 .....	(80)
4.2	调幅电路 .....	(81)
4.2.1	高电平调幅 .....	(82)

4.2.2	低电平调幅 .....	(83)
4.3	检波器 .....	(86)
4.3.1	大信号包络检波器 .....	(86)
4.3.2	同步检波器 .....	(89)
4.4	混频器 .....	(91)
4.4.1	混频的基本原理 .....	(92)
4.4.2	混频电路 .....	(93)
4.4.3	混频干扰 .....	(96)
*4.5	数字信号幅度键控和解调 .....	(98)
4.5.1	基带数字信号 .....	(98)
4.5.2	幅度键控 .....	(103)
技能训练 4	小功率调幅发射机的设计与制作 .....	(106)
本章小结	.....	(108)
习题 4	.....	(108)
<b>第 5 章</b>	<b>角度调制与解调</b> .....	<b>(110)</b>
5.1	调角信号的基本性质 .....	(110)
5.1.1	调角信号的数学表达式和波形 .....	(110)
5.1.2	调角信号的频谱与带宽 .....	(113)
5.1.3	调频信号与调相信号的比较 .....	(115)
5.2	调频电路 .....	(116)
5.2.1	直接调频电路 .....	(116)
5.2.2	间接调频电路 .....	(119)
5.2.3	扩展最大频偏的方法 .....	(120)
5.3	鉴频器 .....	(121)
5.3.1	鉴频方法综述 .....	(121)
5.3.2	斜率鉴频器 .....	(123)
5.3.3	相位鉴频器 .....	(125)
5.4	调频制抗干扰技术 .....	(127)
*5.5	数字信号频率键控、相位键控及其解调 .....	(128)
5.5.1	频率键控 .....	(128)
5.5.2	相位键控 .....	(129)
技能训练 5	无线调频耳机的设计与制作 .....	(136)
本章小结	.....	(137)
习题 5	.....	(137)
<b>第 6 章</b>	<b>反馈控制电路</b> .....	<b>(139)</b>
6.1	自动增益控制 (AGC) .....	(139)
6.1.1	AGC 电路的作用与组成 .....	(139)
6.1.2	AGC 电压的产生 .....	(140)
6.1.3	实现 AGC 的方法 .....	(142)

6.2	自动频率控制 (AFC)	(144)
6.2.1	AFC 的工作原理	(144)
6.2.2	AFC 的应用	(144)
6.3	锁相环路	(145)
6.3.1	锁相环路的基本工作原理	(145)
6.3.2	锁相环路的相位模型与环路方程	(146)
6.3.3	捕捉过程与跟踪过程	(150)
6.3.4	锁相环路的基本特性	(152)
6.3.5	集成锁相环路及其应用	(152)
6.3.6	频率合成	(157)
	技能训练 6 基于锁相环的频率合成器的设计与制作	(162)
	本章小结	(163)
	习题 6	(163)
<b>附录 A</b>	<b>实训</b>	(165)
A.1	EWB 基本操作方法简介	(165)
A.2	实训内容及要求	(166)
	实训 1 高频小信号谐振放大器	(166)
	实训 2 高频谐振功率放大器	(167)
	实训 3 正弦波振荡器	(168)
	实训 4 调幅与检波	(169)
	实训 5 混频器	(173)
	实训 6 斜率鉴频器	(174)
<b>附录 B</b>	<b>综合实训——HX108-2 型调幅收音机的装配与调试</b>	(177)
<b>附录 C</b>	<b>基于 Labview 的教学平台</b>	(184)
C.1	Labview 简介	(184)
C.2	Labview 编程基础	(184)
C.3	Labview 仿真实例	(186)
	C.3.1 幅度调制 (AM) 仿真	(186)
	C.3.2 频率调制 (FM) 仿真	(189)
	C.3.3 超外差式接收机的仿真	(190)
	参考文献	(193)



# 绪 论

21 世纪人类已进入信息时代，人们可用各种方式方便快捷地传递与接收信息。信息是一个抽象的概念。信息的具体形式有：语言、文字、符号、音乐、图形、图像和数据。各种类型的信息对人类社会生活产生极大的影响，如军事信息影响战争的胜负，甚至决定国家民族的存亡；经济信息影响交易的成败和公司的兴衰等。

通信的主要任务是传递信息，即将经过处理的信息从一个地方传递到另一个地方。传递信息既可以通过有线信道，也可以通过无线信道，即进行有线通信或无线通信。由于无线电波能方便快捷地在空间传播，所受限制较少，因此广泛应用于广播、电视、通信、雷达和导航等领域。而高频电子线路研究的对象主要是无线电发送与接收设备中有关电路的原理、组成与功能，因此下面仅以无线通信系统为例，简单介绍通信系统的基本工作原理及各高频单元电路的应用，以增加读者对高频电子线路的认识。

## 1 无线通信系统的基本工作原理

无线通信系统的组成框图如图 1 所示。它由发射设备、传输媒质和接收设备构成。其中，发送设备包括变换器、发射机和发射天线三部分；接收设备包括接收天线、接收机和变换器三部分；传输媒质为自由空间。

信息源发出需要传送的信息，如符号、文字、声音和图像等，由变换器将这些要传送的声音或图像信息转换成相应的电信号，然后由发射机把这些电信号转换成高频振荡信号，发射天线再将高频振荡信号转换成无线电波，向空间发射。无线电波经过自由空间到达接收端，接收天线将接收到的无线电波转换成高频振荡信号，接收机把高频振荡信号转换成原始电信号，再由变换器还原成原来传递的信息（声音或图像等），送给受信者，从而完成信息的传递过程。

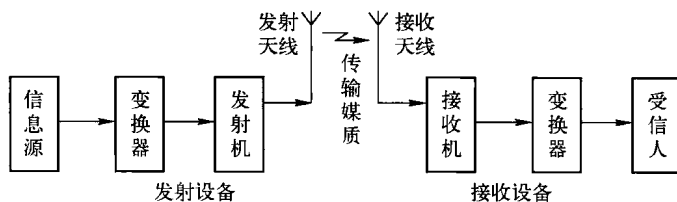


图 1 无线通信系统组成框图

无线电波是一种电磁波，其传播的速度与光速相同，约为  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。无线电波的波长、频率和传播速度之间的关系可用下式表示为：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (0-1)$$

式中， $\lambda$  是波长，单位为 m；

$c$  是传播速度，单位为 m/s；

$f$  是频率，单位为 Hz。

无线电波与光波一样，也具有直射、绕射、反射及折射等现象。不同频率的无线电波，其传播的规律与应用范围也不同，因此通常把无线电波划分为若干波段或频段，如表 1 所示。

表 1 无线电波波段划分表

波段名称	波长范围	频段名称	频率范围	主要用途
长波 (LW)	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$	低频 (LF)	30~300kHz	长距离点与点间的通信、船舶通信
中波 (MW)	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$	中频 (MF)	300~3000kHz	广播、船舶通信、飞行通信、船港电话
短波 (SW)	$10^1 \sim 10^2 \text{m}$	高频 (HF)	3~30MHz	短波广播、军事通信
米波	1~10m	甚高频 (VHF)	30~300MHz	电视、调频广播、雷达、导航
分米波	1~10dm	特高频 (UHF)	300~3 000MHz	电视、雷达、移动通信
厘米波	1~10cm	超高频 (SHF)	3~30GHz	雷达、中继、卫星通信
毫米波	1~10mm	极高频 (EHF)	30~300GHz	射电天文、卫星通信、雷达

无线电波在空间的传播途径有三种：一是沿地面传播，叫地波，如图 2 (a) 所示；二是依靠电离层的反射传播，叫天波，如图 2 (b) 所示；三是在空间直线传播，叫直线波，如图 2 (c) 所示。

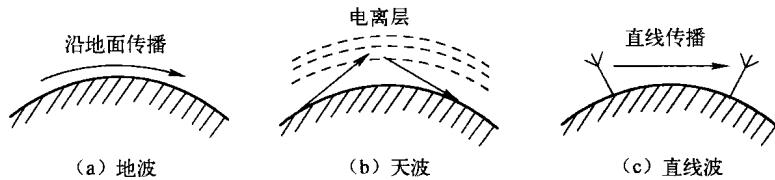


图 2 无线电波的传播方式

长波的波长较长，遇障碍物绕射能力强，且地面的吸收损耗较少，因此长波的通信主要以地波方式传播。

波长介于长波与短波之间的中波，由于电离层对其吸收较强，尤其是在白天吸收更为严重，因而，中波在白天基本上不能依靠电离层的反射，而只是依靠地波方式进行传播，但是，地面对中波的吸收比长波厉害。因此，中波在白天的传播距离约 100km 左右；而在晚上，电离层对中波的吸收减弱，这时中波可借助电离层反射传播到较远的地方。这就是为什么某些远距离的广播电台在白天收不到而在夜间却能收到的原因。

短波的波长较短，地面绕射能力弱，且地面吸收损耗较大，不宜采用地面传播。虽然电离层对短波的吸收也很厉害，但依靠电离层的反射可以实现远距离的短波通信。尤其是利用电离层与地球表面之间的多次反射现象，可实现超远距离的无线电通信，因此短波的广播和通信主要以天波方式传播。

波长比短波更短的无线电波称为超短波（如米波、分米波等）。超短波的波长很短，往往小于地面障碍物（如山峰、高大建筑物等），不能绕过，且地面吸收损耗很大，所以不能以地波方式传播。同时超短波也能穿透电离层，即电离层很难反射它，所以也不能以天波方式传播。因此超短波只能在空间以直线波方式传播。由于地球的表面是球面的，为了增大传播的距离，发射天线往往要提高架设的高度。

## 2 发射设备的基本原理和组成

在无线通信的发射部分，待传送的信息（声音、图像等）由变换器转换成相应的电信号。

一般来说,这些电信号的频率较低或频带较宽,例如,音频信号(包括语言、音乐)的频率约为20Hz~20kHz,图像信号的频率约为0~6MHz。若把上述信号直接以电磁波形式从天线辐射出去,则存在下述两个问题:

(1)无法制造合适尺寸的天线。由电磁场理论知,只有当天线的尺寸可与被辐射信号的波长相比拟时(波长 $\lambda$ 的 $1/10\sim 1$ ),信号才能被天线有效地辐射出去。对于频率 $f$ 为20Hz~20kHz的音频信号,由式(0-1)可得,相应的波长 $\lambda$ 为15~15000km。若采用 $\lambda/4$ 天线,则天线的长度应在3.75km以上。显然,这么长天线的制造与安装实际上是做不到的。

(2)无法选择所要接收的信号。即使上述信号能发射出去,由于多家电台的发射信号的频率大致相同,它们在空间混在一起,因此接收机无法区分,接收者也就无法选择所要接收的信号。

由此可见,要实现无线通信,首先必须让各电台发射频率不同的高频振荡信号,再把要传送的信号“装载”到这些频率不同的高频振荡信号上,经天线发射出去。这样既缩短了天线尺寸,又避免了相互干扰。

把待传送的信号“装载”到高频振荡信号上的过程称为调制。所谓“装载”,是指由携有信息的电信号去控制高频振荡信号的某一参数,使该参数按照电信号的规律变化。通常将携有信息的电信号称为调制信号;未经调制的高频振荡信号好比“载运工具”,称为载波信号;经过调制后的高频振荡信号称为已调波信号。当传输的调制信号为模拟信号时,称为模拟通信系统;当传输的调制信号是数字信号时,称为数字通信系统。虽然调制信号不同,但通信系统的原理和组成是相同的。

高频载波通常是一个正弦波振荡信号,有振幅、频率和相位三个参数可以改变,因此,用调制信号对载波进行调制就有调幅、调频和调相三种方式。

(1)调幅(Amplitude Modulation,AM)。载波的频率和相位不变,载波的振幅按调制信号的变化规律而变化。调幅获得的已调波称为调幅波。

(2)调频(Frequency Modulation,FM)。载波的振幅不变,载波的瞬时频率按调制信号的变化规律而变化。调频获得的已调波称为调频波。

(3)调相(Phase Modulation,PM)。载波的振幅不变,载波的瞬时相位按调制信号的变化规律而变化。调相获得的已调波称为调相波。调频和调相统称为调角。

由于调幅应用较早而且使用广泛,因此,下面以调幅广播发射机为例简明扼要地说明发射设备各部分的作用,调幅广播发射机的组成方框图如图3所示。

高频振荡器用来产生频率稳定的高频振荡信号,现多采用石英晶体振荡器。高频放大器用来放大振荡器产生的高频振荡信号,它通常是由多级谐振放大器组成的。由于石英晶体产生的振荡频率不能太高,所以这时还应通过倍频器,使高频振荡的频率倍增到所需的载波频率上,最后输出的是幅度足够大的载波。

低频放大器又称为调制信号放大器,用来放大话筒变换来的电信号,最后输出足够强的调制信号。通常,低频放大器是由几级小信号低频电压放大器和低频功率放大器组成的。

高频功放及调幅器将载波信号的功率放大到足够大,同时用调制信号对载波进行调幅,得到功率足够大的调幅波信号,最后由天线以电磁波形式辐射出去。

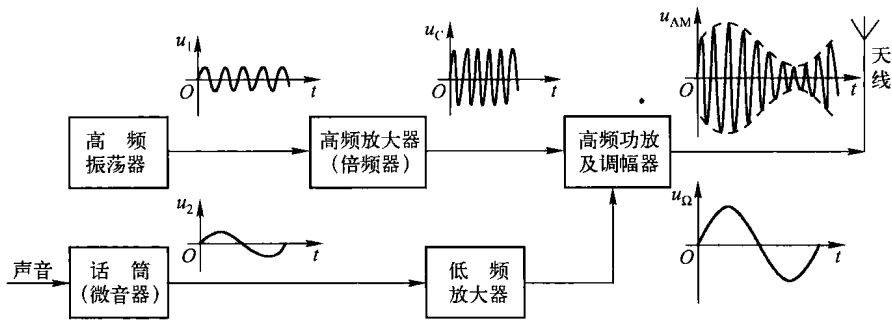


图3 调幅式无线电广播发射机方框图

### 3 接收设备的基本原理和组成

无线通信接收设备的工作过程与发射设备相反，它的任务是把空间传来的电磁波接收下来，选出所需的已调波信号，并把它还原为原来的调制信号，以推动输出变换器，获得所需的信息。从高频已调波中“取出”调制信号的过程称为解调。由于已调波的调制方式有三种，因此解调也有三种方式，即检波（调幅波的解调）、鉴频（调频波的解调）和鉴相（调相波的解调）。

目前，无论是无线电广播接收机（收音机），还是电视接收机（简称电视机）、通信接收机、雷达接收机等都毫无例外地采用“超外差”接收机的形式。以上各类接收机的组成与工作原理大同小异，所以，下面以超外差收音机为例，对其工作原理做简略分析。超外差调幅收音机的组成方框图如图4所示。

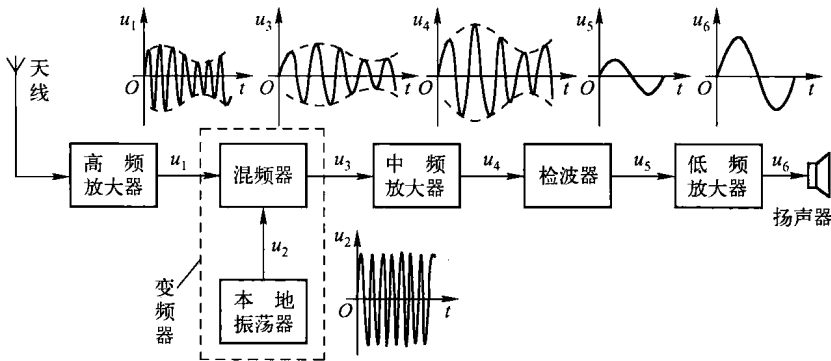


图4 超外差调幅收音机方框图

接收天线接收从空间传来的电磁波并感生出微小的高频信号，高频放大器从中选择出所需的信号并进行放大，得到高频调幅波信号  $u_1(t)$ ，高频放大器通常由一级或多级具有选频特性的小信号谐振放大器组成。本地振荡器（又称本机振荡器）产生高频等幅振荡信号  $u_2(t)$ ，它比  $u_1(t)$  的载频高一个中间频率，简称中频。调幅波信号  $u_1(t)$  和本振信号  $u_2(t)$  同时送至混频器进行混频，混频后输出电压  $u_3(t)$ 。 $u_3(t)$  与  $u_1(t)$  相比，其包络线的形状不变，即仍携有原来调制信号的信息，但载波频率则转换为  $u_2(t)$  的频率与  $u_1(t)$  的载频之差，即转换为中频，因此  $u_3(t)$  为中频调幅波信号。 $u_3(t)$  经中频放大器放大为  $u_4(t)$ ，再送到检波器。检波器从中频调幅

信号  $u_4(t)$  中取出反映传送信息的调制信号  $u_5(t)$ ，再经低频放大器放大为  $u_6(t)$ ，送到扬声器中转变为声音信号。

超外差式接收机的核心是混频器，其作用是将接收到的不同载波频率转变为固定的中频，这就要求本振频率始终比外来信号频率超出一个差频，这也是超外差式接收机名称的由来。由于中频是固定的，因此中放的选择性和增益都可以较高，从而使整机的灵敏度和选择性较好。混频器和本地振荡器如果共用一个电子器件，则它们将合并为一个电路，称为变频器。

## 本章小结

本章介绍了无线电广播发射与接收的基本原理和工作过程，传输的信息是声音。对于其他形式的信息，无线电波的发射与接收的基本原理和工作过程也是相同的。本书后面各章将分别介绍设备中的高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、混频器、调幅和检波、调频和鉴频等内容。

## 思考与练习

1. 无线通信系统由哪几部分组成？各部分起什么作用？
2. 无线通信中为什么要进行调制与解调？它们的作用是什么？
3. 画出超外差式调幅收音机的原理示意框图，并简要叙述其工作原理。
4. 如接收的广播信号频率为 936kHz，中频为 465kHz，问接收机的本机振荡频率是多少？

# 第1章 高频小信号放大器

## 学习目标

- (1) 了解宽带放大器的特点、技术指标和分析方法。
- (2) 掌握扩展放大器通频带的方法。
- (2) 正确理解小信号谐振放大器的基本工作原理及其主要性能分析。
- (4) 熟悉集中选频放大器的基本组成及其工作原理。

放大高频小信号（中心频率在几百千赫到几百兆赫）的放大器称为高频小信号放大器。根据高频信号占有频宽的不同，放大器分为宽带放大器和窄带放大器两类。其中窄带放大器又可分为两类：一类是以谐振回路为负载的谐振放大器；另一类是以滤波器为负载的集中选频放大器。本章首先介绍宽带放大器的特点、分析方法和扩展放大器通频带的方法，然后分析小信号谐振放大器，最后简单介绍具有集中选频功能的集中选频放大器。

## 1.1 宽带放大器的特点、技术指标和分析方法

随着电子技术的发展及其应用的日益广泛，被处理信号的频带越来越宽。例如，在电视接收机中，由于图像信号占有的频率范围为  $0\sim 6\text{MHz}$ 。为了不失真地进行放大，要求放大器的工作频率至少为  $50\text{Hz}\sim 5\text{MHz}$ ，最好是  $0\sim 6\text{MHz}$ 。再如，在  $300\text{MHz}$  的宽带示波器中，Y轴放大器需要具有  $0\sim 300\text{MHz}$  的通频带。放大这类信号的宽带放大器称为视频放大器。

在雷达和通信系统中，也需要传输和放大宽频带信号。例如，同时传输一路电视和几百路电话信号的微波多路通信设备，放大器的通频带约需  $20\text{MHz}$ 。若设备的中频选为  $70\text{MHz}$ ，则相对通频带达  $30\%$  左右，这就需要宽频带的中频放大器。而雷达系统中信号的频带可达几千兆赫。要放大这样的信号，就更需要采用宽带放大器。

### 1.1.1 宽带放大器的主要特点

虽然宽带放大器的下限频率低，但由于其上限频率很高，因此三极管必须采用特征频率  $f_T$  很高的高频管，分析电路时也必须考虑三极管的高频特性。

宽带放大器，从技术上讲，比一般低频放大器要求高。这不仅因为它的频带宽，而且还由于它所放大的信号，最终接受的感觉器官往往是眼睛，而不是耳朵。前者比后者敏感得多。所以，在低频放大器中未考虑的一些问题，例如相位失真等，在宽带放大器中就必须予以考虑。

不同用途的宽带放大器，其电路形式有所不同，大体上可分为两种情况。放大从零频到高频信号的宽带放大器，一般采用直接耦合的直流放大器；放大从低频到高频信号的宽带放大器，多采用阻容耦合放大器。但不管哪一类宽频带放大器，由于频带宽，负载总是非调谐的。

## 1.1.2 宽带放大器的主要技术指标

宽带放大器的主要技术指标有以下四项。

### 1. 通频带

通频带是基本指标，由于用途不同，对其要求也不同。因为下限频率很低，而上限频率很高，往往就用上限频率表示频带宽度。当下限频率接近零时，就必须注明它的下限频率值，以便在设计电路时，充分考虑下限频率的顺利通过。

### 2. 增益

宽带放大器的增益应足够高，但增益与带宽的要求往往相互矛盾，有时不得不通过牺牲增益来得到带宽。为了全面衡量放大器的质量指标，常需考虑放大器的增益带宽积（ $GB$ ）。 $GB$  值越大，宽带放大器的质量越高。

### 3. 输入阻抗

为了减轻宽带放大器对前级的影响，要求放大器的输入阻抗高。高质量的宽带放大器的输入阻抗一般为兆欧级。

### 4. 失真

宽带放大器的失真要小。失真包括非线性失真、频率失真和相位失真。为减小非线性失真，宽带放大器和音频放大器一样，都应该工作在器件特性曲线的直线段，而且应工作在甲类状态。产生频率失真的原因是由于三极管在高频时的电容效应，以及外电路中存在的电抗元件。由此使宽带放大器对不同频率的信号增益不同，从而引起频率失真。而不产生相位失真的条件则是各频率分量的时延时间相等。如：在电视接收机中，相位失真会使显示的图像色调失真、出现双重轮廓、画面亮度不均匀等故障。

## 1.1.3 宽带放大器的分析方法

分析宽带放大器的频率特性，可以采用与分析一般音频放大器频率特性相似的方法，即稳态法。也可以用另一种分析方法，就是考察阶跃信号通过放大器后的失真情况，称为暂态法。以下简单说明这两种方法的区别与联系。

### 1. 稳态法

视频信号是包含有从零频到很高频率分量的多频信号。通过测量和分析宽带放大器的振幅频率特性（幅频特性）和相位频率特性（相频特性），即可分析出宽带放大器的增益、带宽、相移和信号失真的情况。这种方法称为稳态分析法，亦称频域分析法。用稳态法测试放大器频率特性时，一般用扫频仪进行。采用扫频仪测试的接线如图 1.1 所示。将扫频仪输出的频率连续变化的扫频信号送到被测放大器的输入端，再用扫频仪的探头观测放大器的输出端，即可在扫频仪的屏幕上直接看到放大器的幅频特性。然后通过扫频仪的频标及  $Y$  轴衰减器就可以读出放大器的中频增益和通频带。



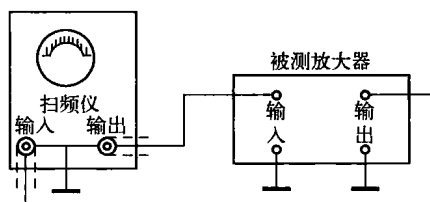


图 1.1 扫频仪测试放大器的接线图

## 2. 暂态法

暂态法是在时域内研究放大器对阶跃脉冲的响应。图 1.2 为用暂态法测试时的接线图。其方法是给宽带放大器输入一个理想的矩形脉冲，如图 1.3 (a) 所示，然后用脉冲示波器观察该放大器对此矩形脉冲的响应。图 1.3 (b) 是有失真时的输出波形。失真程度用脉冲的上升时间  $t_r$  和平顶降落  $\Delta U_m$  来表示。上升时间  $t_r$  又叫建立时间，它是指输出电压  $u_o(t)$  从  $0.1U_m$  上升到  $0.9U_m$  所需要的时间。平顶降落  $\Delta U_m$  表示输出电压  $u_o(t)$  的上升沿顶点  $U_m$  与下降沿拐点处脉冲值之差的绝对值。为了比较降落的程度，常用平顶降落的相对值  $\delta$  表示，即  $\delta = \Delta U_m / U_m$ 。



图 1.2 暂态法测试接线图

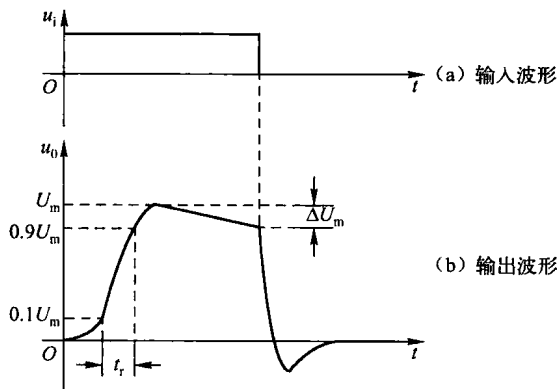


图 1.3 被测放大器的矩形脉冲输入波形与输出波形

宽带放大器的高频特性影响输出脉冲陡峭的前沿；而低频特性则影响平顶部分。输出脉冲的上升沿越陡，说明放大器的高频特性越好；平顶降落越少，说明放大器的低频特性越好。因此，根据输出脉冲的波形就可判断宽带放大器的特性。

稳态法和暂态法分别是频域和时域分析放大器特性的方法，它们在本质上是一致的。稳态法适合于定量计算，暂态法比较直观，适合于电路的调整。

## 1.2 扩展放大器通频带的方法

宽带放大器的通频带主要取决于放大器的上限频率，因此，要得到频带较宽的放大器，必须提高其上限频率。为此，除了选择 $f_H$ 足够高的管子外，还广泛采用负反馈、组合电路以及对电路加以改进（高频补偿）等方法，以达到展宽频带的目的。

### 1.2.1 负反馈法

采用负反馈技术以增宽放大器的通频带，是一种非常重要的手段，在宽频带放大器中用得最多。负反馈既能抑制外界因素引起的放大器的增益变化，又能抑制由频率变化而引起的增益变化。图 1.4 是无负反馈和有负反馈时的放大器幅频特性曲线。由图可见，加入负反馈后中频电压增益降低了，但幅频特性变得平坦了，即通频带得到展宽。所以负反馈是以降低增益为代价来展宽频带的。而且反馈越深，通频带扩展得越宽。这里必须指出，加负反馈后在改善幅频特性的同时，还会产生附加相移。如果在中频段能满足负反馈条件，在低频段或高频段上，由于这些附加相移的存在，有可能改变反馈信号的极性，致使负反馈变成正反馈，造成反馈放大器工作不稳定，这是在实践中必须注意的问题。

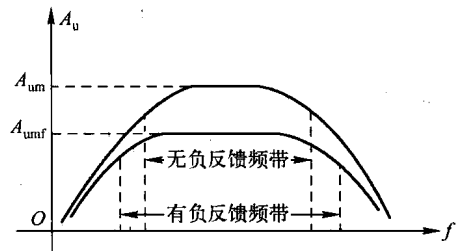


图 1.4 负反馈展宽频带

### 1.2.2 组合电路法

我们知道，影响放大器高频增益的因素除电路的外接电容、布线电容等外部因素外，主要与三极管内部参数有关，即结电容、结电阻等。考虑到不同组态的放大电路，即共射（CE）、共基（CB）、共集（CC）有各自不同的特点，如共射电路的电压增益最高，上限频率 $f_H$ 却最低，输入、输出阻抗适中；共基电路的电流增益最低，有一定的电压增益，上限频率 $f_H$ 较高，输入阻抗低、输出阻抗高；共集电路的电压增益最低，由于它是全电压负反馈，所以它的上限频率 $f_H$ 很高，另外，它的输入阻抗高、输出阻抗低。因此，如果将它们合理组合，取长补短，就可以用较少的元器件组成优质的宽带放大器。例如采用“共射-共基”、“共射-共集”等组合形式，均可组成较满意的宽带放大器。图 1.5 即为常见的几种组合电路的连接图。

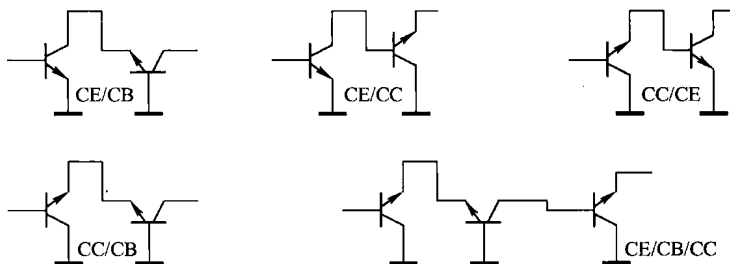


图 1.5 几种组合电路的连接方式

对于“共射-共基”组合电路，由于共基电路的上限频率远高于共射电路，所以整个组