

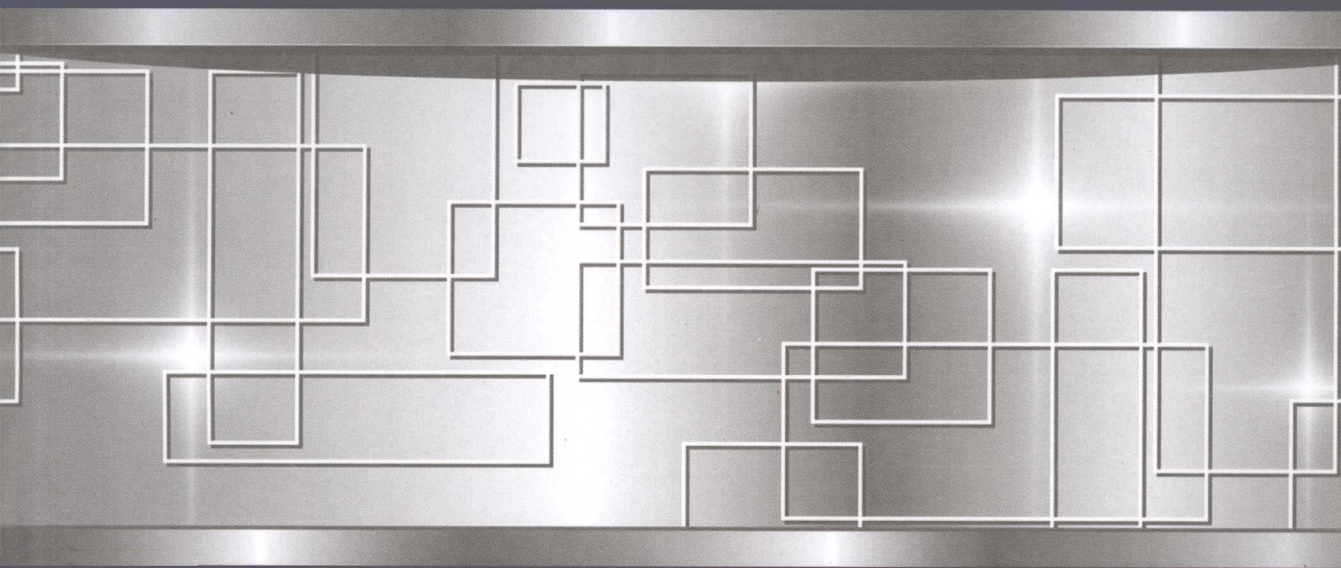


高等学校电子信息系列

高频电子线路

(第3版)

阳昌汉 主编



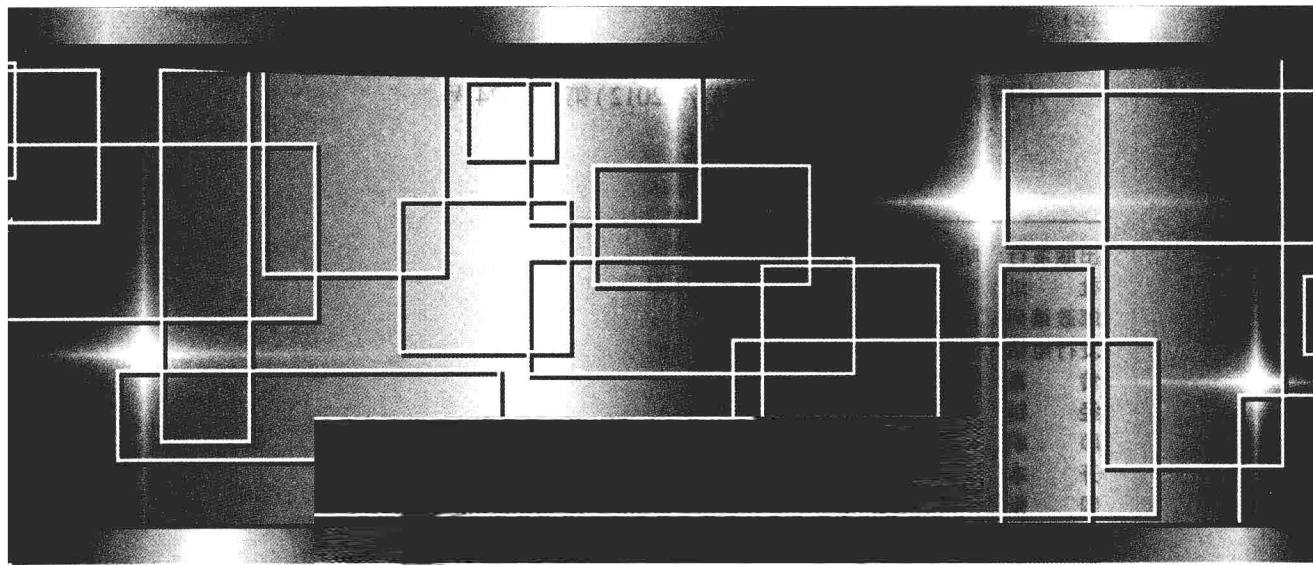
HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

高等学校电子信息系列

高频电子线路

(第3版)

阳昌汉 主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书是根据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会最新制定的“电子线路Ⅱ”课程教学基本要求,并考虑到科学技术的飞速发展,新器件、新技术不断更新的实际情况,遵循“加强基础,强调功能,优选内容,便于学习”的原则,结合我们多年的教学实践,参考了国内外有关教材,在我们原编写的《高频电子线路》教材(2001年第二版)的基础上修订改编而成。

本书以通信功能电路的“功能”为基点,从通信功能电路的输入信号频谱与输出信号频谱的变换关系出发,在理论上讲清楚各个通信功能电路的基本原理和实现电路的基本方法。本书的内容以模拟通信功能电路为主,对数字信号的调制与解调功能电路、频率合成技术和功率合成技术也有适当的叙述。本书主要内容包括绪论、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调电路、角度调制与解调电路、变频电路和反馈控制电路共8章。各章后附有思考题与习题。

本书可作为高等学校通信、电子信息等专业的“高频电子线路”“通信电子线路”“电子线路Ⅱ”等课程的教材。还可供从事电子系统研制与开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/ 阳昌汉主编. —3版. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2012.7
ISBN 978-7-5661-0390-1

I. ①高… II. ①阳… III. ①高频-电子电路-高等学校-教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 153574 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂印刷
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 17
字 数 421 千字
版 次 2012 年 7 月第 1 版
印 次 2012 年 7 月第 1 次印刷
定 价 34.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书是根据教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会最新制定的“电子线路Ⅱ”课程教学基本要求,并考虑到科学技术的飞速发展,新器材、新技术不断更新的实际情况,遵循“加强基础,强调功能,优选内容,便于学习”的原则,结合我们多年教学实践,并参考了国内外有关教材,在我们原编写的《高频电子线路》教材(2001年第二版)的基础上修订改编而成。

本书主要内容是讲述通信功能电路的基本原理及其实现方法。对于大规模通信集成电路来说,它是由许多基本功能电路组成,其中也包含基本的通信功能电路。基本的通信功能电路经历了电子管、晶体管、场效应管、集成电路及大规模集成系统等不同的实现过程,但基本功能电路的“功能”是没有变化的。因而以通信功能电路的“功能”为基点,从通信功能电路的输入与输出信号的频谱关系出发,分析各个通信功能电路的输入频谱与输出频谱变换关系的特征,从理论上讲清楚组成各个通信功能电路的基本原理和实现电路的基本方法,使学生能够深刻认识功能电路在信息传输系统中的作用,增强学生对系统各部分的内在关系的认识,培养学生适应新器材、新技术不断更新的能力,从而开发学生的创新思维能力。

本书基本上保留了第二版的体系,对各章节的内容进行了调整,增加了集成电路的应用内容。在高频功率放大器一章中增加了输入与输出匹配网络的基本原理及计算和高效率的D类和E类高频功率放大器的内容。将振幅调制电路与调幅信号的解调两章内容合并为振幅调制与解调电路一章,突出以模拟乘法器为主兼顾其他类型的电路的分析,并增加了数字振幅调制与解调的内容。将角度调制电路与调角信号的解调电路两章内容经删减与补充合并为角度调制与解调电路一章,同时也增加了数字调角与解调的内容。在反馈控制电路一章中重点增强了频率合成的内容,对集成频率合成器的原理与应用作了分析说明。

本书内容以通信系统为主线,以模拟通信功能电路为主,对数字信号的调制与解调功能电路、频率合成技术和功率合成技术也有适当的叙述。本书主要内容包括绪论、高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调电路、角度调制与解调电路、变频电路和反馈控制电路共8章。本书可作为通信、电子信息等专业的“高频电子线路”“通信电子线路”“电子线路Ⅱ”等课程的教材。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程,有许多理论知识和实践技能,如实际应用电路的组成、大规模通信集成电路在系统中的应用和测试技术等,必须在学习实践中完成。有关集成电路及大规模集成系统电路的应用内容我们是通过实验课和课程设计来完成的,并增加了EDA的内容,以提高学生的素质,培养创新能力。

本书由阳昌汉教授担任主编。原参加本书编写的有阳昌汉、谢红、杨翠娥,这次改编由阳昌汉和谢红完成。

主审张占基教授对本书进行了认真审阅,并提出了许多宝贵的意见。同时,在编写过程中参考或引用了国内外一些专家学者的论著,对此我们表示深深的谢意!

限于编者水平,不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2012年5月

于哈尔滨工程大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统的基本组成	1
1.2 无线信道及其传播方式	2
1.3 无线电发送设备的组成与原理	3
1.4 无线电接收设备的组成与原理	4
1.5 高频电子线路的研究对象	6
1.6 思考题与习题	7
第 2 章 高频小信号放大器	8
2.1 概述	8
2.2 高频电路的基础知识	9
2.3 晶体管高频小信号等效电路.....	16
2.4 晶体管谐振放大器.....	19
2.5 小信号谐振放大器的稳定性.....	24
2.6 场效应管高频放大器.....	29
2.7 线性宽频带放大集成电路与集中滤波器.....	30
2.8 放大电路的噪声.....	33
2.9 思考题与习题.....	42
第 3 章 高频功率放大器	46
3.1 概述.....	46
3.2 丙类(C 类)高频功率放大器的工作原理	47
3.3 丙类(C 类)高频功率放大器的折线分析法	49
3.4 丙类高频功率放大电路.....	60
3.5 丁类(D 类)和戊类(E 类)高频功率放大器	73
3.6 宽频带高频功率放大器.....	75
3.7 功率合成.....	79
3.8 附录.....	84
3.9 思考题与习题.....	86
第 4 章 正弦波振荡器	89
4.1 概述.....	89
4.2 反馈型 LC 振荡原理	90
4.3 反馈型 LC 振荡电路	95
4.4 振荡器的频率稳定原理.....	99
4.5 高稳定度的 LC 振荡器	102
4.6 晶体振荡电路	104

4.7	负阻振荡器	109
4.8	集成压控振荡器	111
4.9	思考题与习题	113
第5章	振幅调制与解调电路	117
5.1	概述	117
5.2	低电平调幅电路	123
5.3	高电平调幅电路	130
5.4	单边带信号的产生	133
5.5	包络检波电路	135
5.6	同步检波器	145
5.7	数字信号调幅与解调	148
5.8	思考题与习题	150
第6章	角度调制与解调电路	155
6.1	概述	155
6.2	频率调制电路	162
6.3	相位调制电路	170
6.4	集成调频发射机	176
6.5	调相信号解调电路(鉴相器)	178
6.6	调频信号解调电路(鉴频器)	183
6.7	数字角度调制与解调	193
6.8	思考题与习题	198
第7章	变频电路	203
7.1	概述	203
7.2	晶体三极管混频器	205
7.3	场效应管混频器	210
7.4	二极管混频电路	211
7.5	模拟乘法器混频器	217
7.6	混频器的干扰与失真	218
7.7	集成接收电路	221
7.8	思考题与习题	224
第8章	反馈控制电路	227
8.1	概述	227
8.2	锁相环路基本原理及应用	229
8.3	频率合成器	244
8.4	自动频率控制电路	256
8.5	自动增益控制电路	259
8.6	思考题与习题	261
参考文献		264

绪 论

1.1 通信系统的基本组成

能完成信息传输任务的系统称为通信系统。一个通信系统应由输入变换器、发送设备、传输信道、接收设备和输出变换器五个基本部分组成。图 1-1 是通信系统的组成方框图。其中,输入变换器的功能是将输入信息变换为电信号。当输入信息为非电量(例如,语言、音乐、文字、图像等)时,输入变换器是必要的。当输入信息本身就是电信号(例如,计算机输出的二进制信号、传感器输出的电流或电压信号等)时,在能满足发送设备要求的条件下,可不用输入变换器,而直接将电信号送给发送设备。输入变换器输给发送设备的电信号应反映原输入的全部信息,通常称此信号为基带信号。基带信号由于频率为低频且相对频带较宽,不一定适合信道的有效传输。例如,无线电波的自由空间信道就不适合基带信号的直接传输。需将输入变换器输出的基带信号送给发送设备,将其变换成适合信道传输的高频已调信号,通过信道传送到接收设备。传输信道是信号传输的通道,它可以是平行线、同轴电缆或光缆,也可以是传输无线电波的自由空间或传送声波的水等。接收设备是将经信道传送的高频已调信号变换成基带信号送给输出变换器。输出变换器的功能是将接收设备输出的基带信号变换成原来的信息,如语言、音乐、文字、图像等。

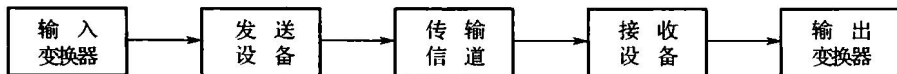


图 1-1 通信系统方框图

通信系统的类型较多,按传输信道的不同通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统;按通信方式的不同通信系统可分为双工通信系统、半双工通信系统和单工通信系统。所谓单工通信系统是指只能发或只能收的方式;半双工通信系统是一种既可以发也可以收,但不能同时收发的方式;双工通信系统是可以同时收发的通信方式。当通信系统中传输的基带信号是模拟信号时,称为模拟通信系统;当通信系统中传输的基带信号是数字信号时,则称为数字通信系统。尽管它们的种类不同,但就系统的基本组成部分来说是相同的。

为了使读者对无线信道及其传播方式以及发送设备、接收设备各组成部分之间的相互

关系有所了解,使读者对无线通信系统有基本的认识,以介绍无线电广播原理为例,说明无线电信号的发送和接收的过程及系统的组成是很有必要的。尽管无线电广播系统较为简单,但麻雀虽小,五脏俱全。

1.2 无线信道及其传播方式

电磁波的波谱很宽,除了无线电波以外还有红外线、可见光、紫外线、X射线和宇宙射线等。无线通信中所用的无线电波只是一种波长比较长的电磁波,占有的频率范围很宽。波长与频率的关系为

$$c = f\lambda$$

式中, c 为光速, f 为无线电波的频率, λ 为无线电波的波长。因此,也可以认为无线电波是一种频率相对较低的电磁波。

表1-1列出了无线电波的频段划分、主要传播方式和用途等。表中列出的频段、传播方式和用途的划分是相对而言的,相邻频段间无绝对的分界线。电波在无线信道中传播的主要方式可分为三种:地波(绕射)传播、天波(反射和折射)传播和直线(视距)传播。地波(绕射)传播是电波沿着地球弯曲表面传播,其示意图如图1-2(a)所示。由于地面不是理想的导体,当电波沿其表面传播时,将有能量的损耗。这种损耗随电波波长的增大而减小。因此,通常只有中长波范围的信号才适合绕射方式传播。地波传播由于地面的电特性不会在短时间有很大的变化,所以电波沿地面传播比较稳定。天波传播是利用电离层的折射和反射来实现传播的,其示意图如图1-2(b)所示。在地球表面存在着具有一定厚度的大气层,由于受到太阳的照射,大气层上部的气体将发生电离而产生自由电子和离子,被电离了的这一部分大气层叫作电离层。电离层从里向外可以分为D、E、F₁、F₂四层,D层和F₁层在夜晚几乎完全消失,因此经常存在的是E层和F₂层。

表1-1 无线电波的频段、传播方式与用途

频 带	波 长	名 称	主要传播方式	典型应用
3 ~ 30 kHz	10 ~ 100 km	甚低频	地波	远距离导航,声呐,电报,电话
30 ~ 300 kHz	1 ~ 10 km	低频(长波)	地波	导航系统,航标信号,电报通信
0.3 ~ 3 MHz	100 ~ 1 000 km	中频(中波)	地波或天波	调幅广播,舰船无线通信,测向,遇险和呼救
3 ~ 30 MHz	10 ~ 100 m	高频(短波)	天波或地波	调幅广播,短波通信,飞机与船通信,岸与船通信
30 ~ 300 MHz	1 ~ 10 m	甚高频(超短波)	直线传播	电视广播,调频广播,航空通信,导航设备
0.3 ~ 3 GHz	10 ~ 100 cm	特高频(分米波)	直线传播	电视广播,雷达,遥控遥测,导航,卫星通信,移动通信
3 ~ 30 GHz	1 ~ 10 cm	超高频(厘米波)	直线传播	卫星通信,空间通信,微波接力,机载雷达,气象雷达
30 ~ 300 GHz	1 ~ 10 mm	极高频(毫米波)	直线传播	雷达着陆系统,射电天文

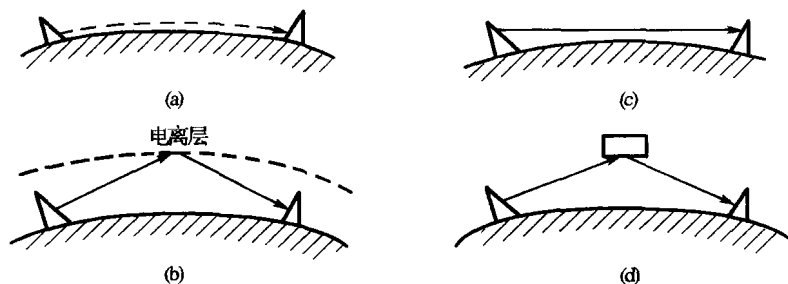


图 1-2 无线电波的主要传播方式

(a) 地波传播; (b) 天波传播; (c) 直线传播; (d) 卫星通信

电离层是一层介质,对射向它的无线电波会产生反射与折射作用。入射角越大,越易反射,入射角太小,容易折射。同时电离层对通过的电波也有吸收作用。频率越高的电波,其电离层吸收能量越弱,电波的穿透能力越强。因此,频率太高的电波会穿透电离层而到达外层空间。短波信号主要是利用电离层的反射实现传播,对于短波信号, F_2 层是反射层,D层和E层是吸收层。利用电离层反射可以实现信号的远距离传输。特别是,可以利用地面与电离层之间的多次反射,实现距离为几千千米的通信。但电离层的特性受多种因素的影响,这种通信的稳定性较差。直线(视距)传播是电波从发射天线甲发出,沿直线传播到接收天线乙,其示意图如图1-2(c)所示。由于地球表面是一个曲面,因此发射天线和接收天线的高度会影响这种直线传播的距离。增高天线可以提高直线传播距离,但天线的高度不可能无限增高。目前,采用一个离地面几万千米的卫星作为地面信号的转发器,可以使传播距离大大提高,这就是卫星通信,其示意图如图1-2(d)所示。

从电波的传播来看,长波信号以地波传播为主;中波和短波信号可以以地波和天波两种方式传播,而中波以地波为主,短波以天波为主。频率较高的超短波及其更高频率的无线电波,主要沿空间直射传播。

1.3 无线电发送设备的组成与原理

无线电发送是以自由空间为传输信道,把需要传送的信息(声音、文字或图像)转换成无线电波传送到远方的接收点。

为什么要用无线电波发送方式把信息(例如声音)传送出去呢?信息传输通常应满足两个基本要求:一是希望传送距离远;二是要能实现多路传输,且各路信号传输时,应互不干扰。为了把声音传送到远方,常用的方法是将声音变成电信号,再通过发送设备送出去。这种电信号是与声音同频率的交变电磁振荡信号,可以利用天线向空中辐射出去。电磁波在空气中的传播速度很快(3×10^8 m/s)。在天线高度足够的条件下是能够实现远距离传送的。但是,无线电波通过天线辐射,天线的长度必须和电磁振荡的波长相近,才能有效地把电磁振荡波辐射出去。对于频率为 $20 \sim 20\,000$ kHz 的声频来说,其波长为 $15 \times 10^3 \sim 15 \times 10^6$ m。那么,这样大尺寸的天线,制造是很困难的。即使可以做出来,由于各个电台所发出的信号频率范围相同,接收者也无法选择所需的接收信号。解决的办法是,将发射的电

磁波的频率提高,使传送的音频信号“加载”到高频振荡之中。这样,天线的尺寸可以减小。不同的电台可以采用不同的高频振荡频率,这样接收时很容易分辨开。通常,把需传送的信息“加载”到高频振荡中的过程称为调制。能实现这样功能变换的电路称为调制器。调制可以分为三类,即调幅、调频和调相。可见,无线发送设备的关键部分是调制器。

图1-3是调幅广播发射机的方框图,它由三部分组成。

(1) 低频部分

这部分由声电变换器(话筒)和低频放大器组成,实现声电变换,并对音频电信号进行放大,使其满足调制器的要求。

(2) 高频部分

这部分由主振器、缓冲器、高频电压放大、振幅调制器和高频功率放大器组成,实现载波的产生,放大,振幅调制和高频功率放大。

(3) 传输线和天线部分

这部分完成将已调波通过天线以电磁波形式辐射出去。

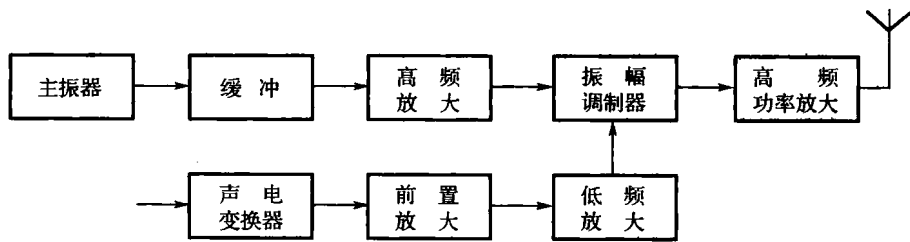


图1-3 调幅广播发射机的方框图

主振器产生的高频振荡信号经缓冲、放大后,作为高频载波电压送给振幅调制器。设其表达式为

$$u_i(t) = U_{im} \cos(\omega_c t + \varphi)$$

其中, $u_i(t)$ 是调制器输入高频载波信号的瞬时值, U_{im} 是它的振幅, ω_c 是角频率, φ 为初始相位。

送给调制器的另一信号是,由声音经话筒转变成电信号,并经低频电压放大的低频电信号。设其表达式为

$$u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$$

其中, $u_\Omega(t)$ 为送给调制器的调制信号的瞬时值, $U_{\Omega m}$ 是振幅, Ω 是角频率。

$u_i(t)$ 和 $u_\Omega(t)$ 送到调制器进行振幅调制,调制器输出的调幅波为

$$u(t) = U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega_c t + \varphi)$$

调制器输出电压通过高频功率放大,传输线通过天线以电磁波形式辐射出去。

1.4 无线电接收设备的组成与原理

无线电接收过程正好和发送过程相反,它的基本任务是将通过天空传来的电磁波接收下来,通过选频和解调器,从中取出需要接收的信息信号。

图1-4是一个最简单的接收机的方框图。它由接收天线、选频电路、检波器和输出变换器(耳机)四部分组成。接收天线接收从空中传来的电磁波。在同一时间,接收天线不仅会接收到所需接收的无线电信号,而且也会接收到若干个不同载频的无线电信号与一些干扰信号。为了

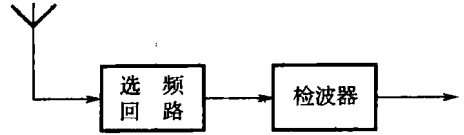


图1-4 最简单的接收机方框图

选择出所需要的无线电信号,在接收机的接收天线之后要有一个选频电路,其作用是将所要接收的无线电信号取出来,并把不需要的信号滤掉,以免产生干扰。利用并联LC回路的谐振特性就能够实现选频。通过选频电路选频,将选出所需要的高频调幅波,例如 $u(t) = U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$, 送给检波器。检波器的任务是从已调波信号中解调出原调制信号,即音频 Ω 成分。音频信号送给耳机将电信号转换成声音。这样就完成了全部接收过程。

这种最简单的接收机叫作直接检波式接收机,其特点是线路简单。因为从天线得到的高频无线电信号非常微弱,一般只有几十微伏至几毫伏,直接送给检波器解调,检波器的电压传输系数很小,检波后输出的音频信号更弱,只能采用高阻耳机完成电声变换。为了提高检波器的电压传输系数,通常希望送给检波器的高频信号电压达到1V左右。这就需要在选频电路与检波器之间增加高频放大器,将通过选频电路的高频信号进行放大。增加高频放大器后,送给检波器的高频信号幅值增大,检波器的电压传输系数增大。但是检波器输出的音频信号通常只有几百毫伏,要推动功率大一点的扬声器是不行的。因而,在检波器之后要进行音频电压放大和功率放大,然后去推动扬声器。这种带有高频放大器的接收机叫作直接放大式接收机,其方框图如图1-5所示。

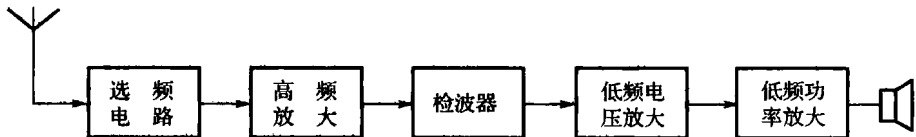


图1-5 直接放大式接收机的方框图

直接放大式接收机的特点是,灵敏度较高,输出功率也较大,特别适用于固定频率的接收。但是,在用于多个电台接收时,其调谐比较复杂。再则,高频小信号放大器的整个接收频带内,频率高端的放大倍数比低端要小。因此,对不同的电台其接收效果也就不同。为了克服这样的缺点,现在的接收机几乎都采用超外差式线路。图1-6所示是超外差式接收机的方框图。

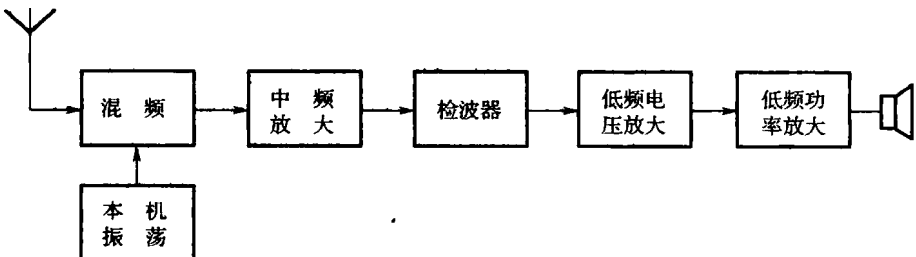


图1-6 超外差式接收机的方框图

超外差接收机的主要特点是,把被接收的已调波信号的载波角频率 ω_c 先变为频率较低的(或较高的),且是固定不变的中间频率 ω_i (称为中频),而其振幅的变化规律保持不变,即仍由 Ω 来决定;然后利用中频放大器加以放大送至检波器进行检波,解调出与调制信号 $u_\Omega(t)$ 呈线性关系的输出电压;随后通过低频电压放大、功率放大,由扬声器还原为原来的声音。因为中频放大器的中心频率是固定不变的,而且接收机的主要放大倍数由中频放大器承担。所以,整机增益在接收频率范围内,高端和低端的差别就会很小。对于调谐来说,仅对混频器的选频输入回路和本机振荡器进行同步调谐,这是容易实现的。

将高频信号的载波频率 ω_c 降低为中频 ω_i 的任务是由变频器来实现的。变频器是由混频器和本机振荡器组成的。有关变频器的变频原理将在变频电路一章中讨论,在此仅简述变频的工作过程。当许多高频信号通过天线进入混频器的输入回路时,由于输入回路调谐于 ω_c ,并具有选频作用,则只有角频率为 ω_c 及其附近的频率成分通过输入回路进入混频器。另外,本机振荡器产生的角频率为 ω_L 的等幅振荡信号也送入混频器与输入信号的各个频率分量进行混频,并由混频器的输出选频回路选出 $\omega_i = \omega_L - \omega_c$ 的中频信号及上下边频分量。输入为调幅波时,输出信号的振幅变化规律与输入信号振幅变化规律相同。值得注意的是,本机振荡的振荡角频率 ω_L 的调节与混频器输入回路的调谐是同步进行的,必须保持二者的角频率之差为 ω_i 。

超外差式接收机由于具有固定频率的中频放大器,它不仅可以实现较高的放大倍数,而且选择性也很容易得到满足。可以同时兼顾高灵敏度与高选择性,这是非常重要的。

1.5 高频电子线路的研究对象

上面介绍了无线电广播发送与接收的基本原理和工作过程。虽然介绍的是传送语言的特殊例子,但对传输其他形式的信号来说,其基本工作原理是相同的。发送设备和接收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、振幅调制与解调电路、角度调制与解调电路、变频电路和反馈控制电路等都是高频电子线路课程所要讲授的内容,而这些内容又是组成发送设备和接收设备不可缺少的重要组成部分。

本课程讲授的各功能电路,大多属于非线性电子线路。非线性电子线路的分析方法与线性电子线路的分析方法是不相同的。因而,在学习本课程的各功能电路时,要根据不同电路的功能和特点,掌握各个功能电路的实现方法和基本原理;要根据输入信号的大小和器件工作状态的不同选用不同的近似分析方法,系统地了解非线性电子线路的分析方法。高频电子线路的理论与实践必须紧密联系,要学会用理论去指导实验和分析实验现象,从而得出合理的结论。这对从事科学研究和电子系统开发会有很大帮助。

值得注意的是,在科学技术快速发展,新电路和新器件日新月异,通信集成电路不断更新的今天,学习本课程时应特别注意对电路功能和基本原理的理解,加上实践环节的训练,培养运用集成电路去设计与开发新的电子系统的能力。因为对高频功能电路来说,可以用不同的器件组成。虽然使用的器件不同,但是每个高频功能电路的功能和基本原理是不会变的。通信集成电路通常是由多个功能电路组成的,掌握了各个功能电路的功能,对理解和应用集成电路会有很大的帮助。

1.6 思考题与习题

- 1.1 为什么在无线电通信中要使用“载波”发射,其作用是什么?
- 1.2 在无线电通信中为什么要采用“调制”与“解调”,各自的作用是什么?
- 1.3 计算机通信中应用的“调制解调”与无线电通信中的“调制解调”有什么异同点?
- 1.4 试说明模拟信号和数字信号的特点,它们之间的相互转换应采用什么器件实现?
- 1.5 理解“功能”电路的功能的含意,说明掌握功能电路的功能在开发电子系统中有什么好处。
- 1.6 理解地波传播、天波传播和直线传播的无线信号传播的主要方式,它们主要的传送频率范围是什么?

高频小信号放大器

2.1 概 述

2.1.1 高频小信号放大器的功能

高频小信号放大器是电子系统中常用的功能电路。高频小信号放大器的功能是实现对微弱的高频信号进行不失真的放大。

高频小信号放大器的特点是:①高频是指被放大信号的频率在数百千赫至数百兆赫。由于频率高,放大器的晶体管的极间电容的作用不能忽略。②小信号是指放大器输入信号小,可以认为放大器的晶体管(或场效应管)是在线性范围内工作。这样就可以将晶体管(或场效应管)看成线性元件,分析电路时可将其等效为二端口网络。也就是,放大器工作于线性放大状态,输入信号电压为 $u_i = U_{im} \cos \omega t$ 时,输出电压 $u_o = A_u U_{im} \cos \omega t$,其中 A_u 为放大器的电压增益。从信号所含频谱来看,输入信号频谱与放大后输出信号的频谱是完全相同的。

2.1.2 高频小信号放大器的分类与用途

高频小信号放大器按照所放大信号的频谱宽窄可分为宽带小信号放大器和窄带小信号放大器;按照所用负载的性质可分为谐振和非谐振小信号放大器。

高频小信号放大器的主要用途是做接收机的前置高频放大器和中频放大器。

2.1.3 高频小信号放大器的主要技术指标

1. 电压增益与功率增益

电压增益(A_u)等于放大器输出电压与输入电压之比,而功率增益(A_p)等于放大器输出给负载的功率与输入功率之比。

2. 通频带

通频带的定义是放大器的电压增益下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时,所对应的频带宽度,常

用 $2\Delta f_{0.7}$ 来表示。

3. 矩形系数

矩形系数是表征放大器选择性好坏的一个参量,而选择性是表示选取有用信号,抑制无用信号的能力。理想的频带放大器应该对通频带内的频谱分量有同样的放大能力,而对通频带以外的频谱分量要完全抑制,不予放大。所以,理想的频带放大器的频率响应曲线应是矩形。但是,实际放大器的频率响应曲线与矩形有较大的差异,矩形系数用来表示实际曲线形状接近理想矩形的程度,通常用 $K_{r0.1}$ 来表示。其定义为

$$K_{r0.1} = 2\Delta f_{0.1} / 2\Delta f_{0.7}$$

式中, $2\Delta f_{0.7}$ 为放大器的通频带宽度; $2\Delta f_{0.1}$ 为放大器电压增益下降至最大值的 0.1 倍时所对应的频带宽度。

4. 噪声系数

噪声系数是用来表征放大器的噪声性能好坏的一个参量。对于放大器来说,总是希望放大器本身产生的噪声越小越好,即要求噪声系数接近于 1。

本章重点分析晶体管单级谐振放大器。对于其他器件组成的放大器,只是所用器件的等效电路有所差别,总的分析方法是相同的。本章还将介绍由集成放大电路和集中滤波器组成的高频小信号放大器的基本电路形式和特点。

2.2 高频电路的基础知识

2.2.1 LC 串、并联谐振回路的特性

1. 电感线圈的高频特性

在高频电路中电感元件的损耗是不能忽略的,因而在等效电路中应该考虑到损耗电阻的影响。一个实际的电感元件可以用一个理想无损耗的电感 L 和一个串联的损耗电阻 r_s 来等效,也可以用一个理想无损耗的电感 L 和一个并联电导 g_s 来等效。通常一个有损电感线圈可在工作频率下通过 Q 表,测得电感线圈的电感值和空载品质因数 Q_0 ,而 Q_0 的大小就能反映损耗的大小,图 2-1 所示是一个

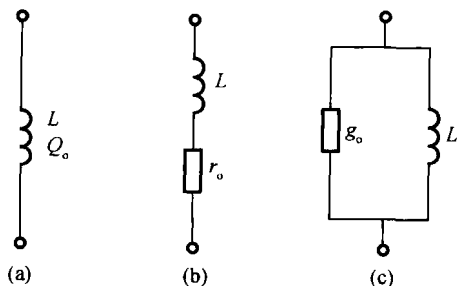


图 2-1 有损电感的等效关系

有损电感等效为一个无损电感和一个串联损耗电阻或一个并联损耗电导的等效关系,图 2-1(a) 是一个在工作频率下用 Q_0 表示损耗的有损电感,它可以等效为图 2-1(b) 所示的串联形式, $r_s = \omega_0 L / Q_0$,也可以等效为图 2-1(c) 所示的并联形式,在 $Q_0 \gg 1$ 时, $g_s = \frac{1}{\omega_0 L Q_0}$,式中 ω_0 为工作频率。

2. 电容元件的高频特性

由于在高频电路所讨论的频率范围内,电容元件损耗很小,因而可以认为其是理想元

件,不考虑其损耗的影响。

3. LC 串联谐振回路

图 2-2 所示是一个 LC 串联谐振电路。由于电感 L 有损耗,可以等效为一个 LCr_o 串联电路。 $r_o = \omega_o L / Q_o$,其中 Q_o 为电感 L 在工作频率为 ω_o 时测得的品质因数。

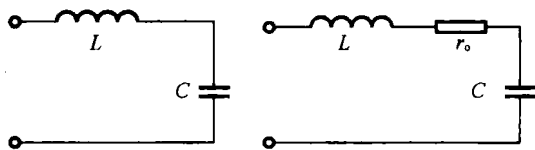


图 2-2 LC 串联谐振回路

串联回路的阻抗为 $Z = r_o + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ 。

谐振频率 $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

串联回路的品质因数是表征回路谐振过程中电抗元件的储能与电阻元件耗能的比值。由于回路无负载电阻,回路总电阻 $r = r_o$,则

$$Q = \frac{\omega_o L}{r} = \frac{\omega_o L}{r_o} = Q_o$$

上式表明串联谐振回路无负载电阻时,其品质因数等于电感 L 在 ω_o 时反映本身损耗的品质因数,通常称为空载品质因数 Q_o 。

图 2-3 所示为 LCr 串联电路。外接负载电阻为 r_L ,由于电感 L 有损耗电阻 r_o ,回路总电阻为 $r = r_o + r_L$ 。

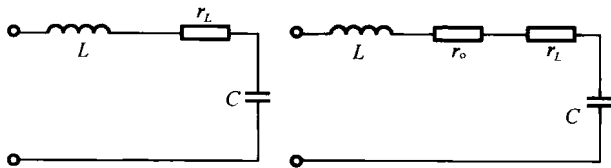


图 2-3 LCr 串联谐振回路

串联回路的阻抗 $Z = r_o + r_L + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ 。

谐振频率 $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

回路的有载品质因数 $Q_L = \frac{\omega_o L}{r_o + r_L} = \frac{1}{\omega_o C(r_o + r_L)}$ 。

当在 LCr 串联谐振回路加入激励电压 $\dot{U}$ 时,流过电路的电流 $\dot{I}(j\omega)$ 可表示为

$$\dot{I}(j\omega) = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{\dot{U}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2-1)$$

当 $\omega = \omega_o$ 时,流过电路的电流最大,即 $\dot{I}(j\omega_o) = \dot{U}/r$,称为谐振电流。则相对电流为

$$\frac{\dot{I}(j\omega)}{\dot{I}(j\omega_o)} = \frac{1}{1 + jQ_L\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)} \quad (2-2)$$

相对电流值的模及相角分别为