

绪 论

1.1 无线电信号的传输原理

无线电技术的出现和发展是建立在电磁场与电磁波的理论、实践的基础之上的。在当今的信息社会里,无线电技术仍然是人类改造自然和征服自然的有力工具,与人们的工作和生活分不开,比如数字移动通信、高速无线电通信。英国物理学家 J.C. 麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)于 1864 年发表了著名的论文《电磁场的动力理论》,在总结前人工作的基础上,得出了电磁场方程,并从理论上证明了电磁波的存在。他认为,电磁波在自由空间的传播速度、折射和反射等特性与光波相同。麦克斯韦的这一发现,为人们证实电磁波的存在实践活动提供了理论依据,也为后来无线电的发明和发展奠定了坚实的基础。

1887 年,德国物理学家 H. 赫兹(H. Hertz)在实验中证实了电磁波的客观存在。他在实验中还证明了电磁波在自由空间的传播速度与光速相同,并有反射、折射、驻波等与光波性质相同的特性。这个著名的赫兹实验证明了麦克斯韦理论的正确性。此后,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,即无线电通信。比如英国的 O. J. 罗吉(O. J. Lodge)、法国的勃兰利(Branly)、俄国的 A. C. 波波夫(A. C. Попов)和意大利的 G. 马可尼(Guglielmo Marconi)等。其中,马可尼的贡献最大。他在 1895 年首次在几百米的距离,用电磁波进行通信获得成功,1901 年又首次完成了横渡大西洋的无线电通信。马可尼首次无线电通信的成功让无线电通信进入实用阶段,无线电技术从此蓬勃发展起来。

从无线电发明开始,直到今天的信息社会,传输信号成了无线电技术的首要任务,而且在有些场合,无线电通信比有线通信更适合或者是唯一的选择。通信电子线路所涉及的功能电路都将从传输与处理信号这一基本点出发。因此,有必要先从无线电信号的传输原理开始阐述。

1.1.1 传输信号的基本方法

信息社会中,信息无处不在,信息的传输已经成为人类生活的重要组成部分。最基本的传输手段当然是语言与文字。随着人类社会生产力的发展,对远距离迅速且准确传输信息的需求越来越高。我国古代利用烽火传送边疆警报,可以说是最古老的通信方法。

在肉眼可见的范围内,利用“旗语”传输信息也是一个从古代流传至今的方法。信鸽、驿马接力、信件等都是人们采用过的方法,有些直到今天仍然没有过时。19世纪,人们发现电可以以光速沿导线传播,这为远距离快速、大容量通信提供了物质条件。因此,电报和电话被发明出来。1837年,F. B. 莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报,并创造了莫尔斯电码。在莫尔斯电码中,用点、划、空的适当组合来表示字母和数字,这可以说是数字通信的雏形。1876年,A. G. 贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话,直接将语音信号转换为电信号,电信号沿导线传输到远方的目的地,然后电信号又转换成语音信号,从而实现了语音的直接实时传输。电报和电话的发明,为迅速而准确地传递信息提供了新的方法,是通信技术发展的里程碑。下面简要介绍有线电报和电话的基本工作原理。

有线电报的基本原理如图 1-1 所示。当发报方没有按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 为零,水平杆在弹簧拉力作用下靠在上方;当发报方按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 不为零,水平杆在电磁铁的磁场力作用下靠在下方(磁场力大于弹簧的拉力)。所以,发报方间断地按下电键时,通过收报方电磁铁的电流 i 的波形图为如图 1-1(b)所示的脉冲状。电流不为零的时间由电键按下的时间来决定。收报方因水平杆下击时间的长短,听到“嘀”(点)、“嗒”(划)的声音。由事先约定的长短组合和次序,就能明白传输信号所代表的信息。如果用一支笔来代替水平杆,则笔在一张匀速移动的白纸上就会写下如图 1-1(c)所示的长短线条,长划是“嗒”,短划是“嘀”。

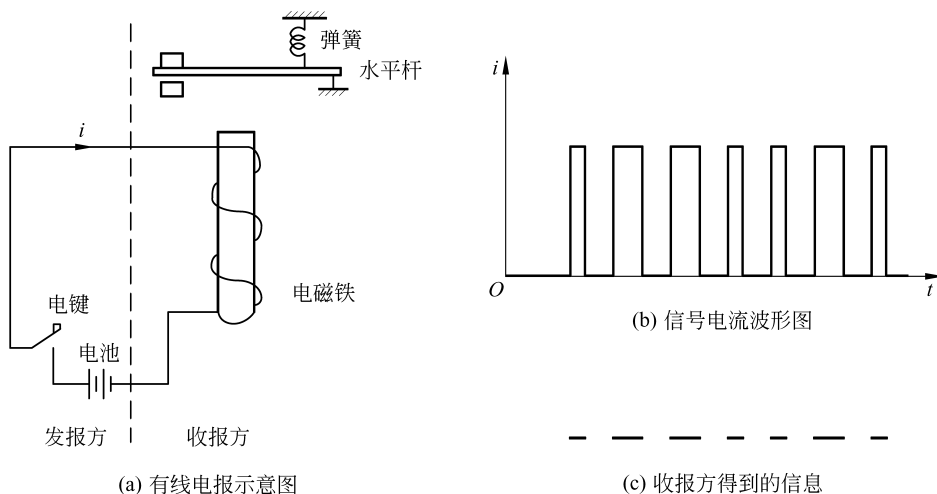


图 1-1 有线电报的基本原理

人们至今仍然把有线电报作为一种重要的通信方法,并且在很多方面进行了改进。

有线电报不能实时地传输语音信号,而人们强烈需要远距离、实时、准确地传输语音信号,这促进了电话的发明。语音信号的传输首先要把声音信号转换为电信号,然后通过导线传到目的地,再把电信号恢复成声音信号。将声能转换成电能的换能器叫作“传声器”或“话筒”或“麦克风”。把电能转换成声能的换能器叫作“喇叭”。有线电话的基本工作原理如图 1-2 所示。

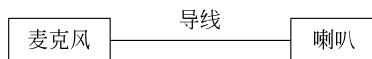


图 1-2 有线电话的基本工作原理

在赫兹实验之前,人们认为电信号只能沿着导线传输。赫兹实验证实了电磁波的客观存在,这自然让人们联想到用电磁波在空间传输信息,于是促进了无线电通信的发明。

无线电通信系统包括发送设备、接收设备和它们之间的无线信道。下面简要介绍无线电发送设备和接收设备。电磁波在无线信道中的传输理论在“电磁场与电磁波”这类课程中介绍。

1.1.2 无线电发送设备的基本组成及其工作原理

调幅无线电广播是无线电技术的典型应用之一,是远距离传递信息的有效而快速的手段,是人们获取信息以及欣赏音乐、电影等文艺节目的重要渠道。根据天线理论,只有当天线的尺寸可以与信号的波长相比拟的时候,信号才可能被有效地发射和接收。由于语音信号的频谱处于低频段(波长很长),如果直接通过无线电信号传输,需要很大的发射天线和接收天线。因此它是不便于直接远距离传输的,必须采用一种名叫“调制”的技术进行处理。一般的处理方法就是用语音信号(已经被转换为电信号)去控制一个频率相对较高的正弦波信号——载波信号的振幅或频率或相位,这个过程就叫调制。调制以后的已调波信号分别叫作调幅信号、调频信号和调相信号。调幅无线电广播发射机是一个具有多种功能模块的系统,如图 1-3 所示。由图 1-3 可见,无线电调幅广播发射机主要由正弦波振荡器、缓冲器、高频电压放大器、振幅调制器、高频功率放大器、声/电变换器、低频电压放大器及发射天线等组成。正弦波振荡器产生高频载波信号;缓冲器能隔离正弦波振荡器与高频电压放大器,提高正弦波振荡器带负载的能力和频率稳定性;高频电压放大器把载波信号的振幅放大到振幅调制器需要的程度;振幅调制器完成调制,得到调幅波;高频电压及功率放大器实现调幅信号的电压及功率放大,以便于调幅信号远距离辐射出去;天线把调幅信号有效地辐射到空间;声/电变换器把语音信号转换为电信号;低频电压放大器把微弱音频信号的幅度放大。我国的调幅广播的载波频率为 535k~1605kHz。

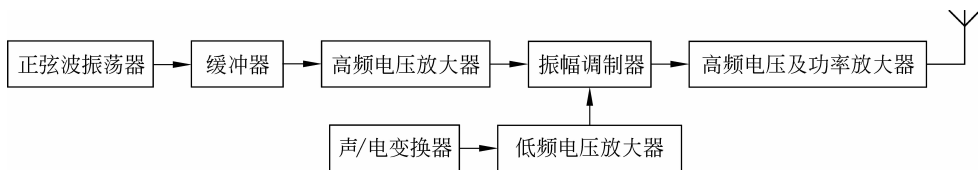


图 1-3 调幅无线电广播发射机的基本组成方框图

1.1.3 无线电接收设备的基本组成及其工作原理

无线电信号的接收过程与其发射过程正好相反。在接收设备中,先用接收天线将接收到的电磁波转变为已调波电流,然后从这个已调波电流中恢复出原始信号。这个过程正好与调制过程相反,称为解调(接收调幅信号叫检波,接收调频信号叫鉴频,接收调相信号叫鉴相)。最后,再用耳机或喇叭(扬声器)将检波出的信号转换为声波,人们就可以

听到远处的发射机传送过来的语音、音乐等信号了。无线电接收设备的基本任务是从天线感应的调幅波中恢复出语音信号。相对于发射设备,接收设备的结构要复杂些。

随着通信技术的发展,现代通信系统的无线电接收设备常见的有3种:直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机。下面逐一介绍它们的基本组成、工作原理及优缺点。

1. 直接放大式接收机

直接放大式接收机出现较早,原理简单,比较容易理解。以调幅广播接收机,即调幅收音机为例,直接放大式接收机的基本组成方框图如图1-4所示,主要包括选频电路、高频小信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭。天线感应的信号通过选频电路后,提取有用信号的同时也抑制了无用噪声和干扰;选频电路输出的有用信号的幅度非常微小,一般的调频信号的幅度为 μV 量级,调幅信号的幅度为 mV 量级,它们不能直接检波,所以必须由高频小信号放大器把微弱的调幅信号进行电压放大,以有利于检波器有效地工作;检波器实现调制信号的恢复,不同的调制方式,对调制器的要求有所区别;低频电压放大器把解调出来的音频信号的幅度放到低频功率放大器需要的程度;低频功率放大器把音频信号的功率放大,以推动喇叭发出声音。由此可见,选频电路和高频小信号放大器的传输函数的中心频率等于某发射台的载波频率时,就是选中了该发射台的节目。

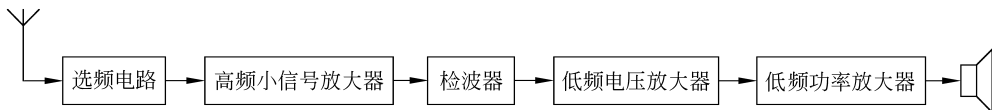


图 1-4 直接放大式接收机的基本组成方框图

直接放大式接收机是将接收到的高频信号直接放大后就检波。直接放大式接收机的优点是结构比较简单,成本较低,特别适合于作固定工作频率的接收机,比如对讲机等。其缺点是由于工作频率一般是固定的或者只能微调,所以不能选择别的电台节目;对于不同的载波频率,接收机的灵敏度(接收微弱信号的能力)和选择性(区分不同电台的能力)变化比较剧烈,而且由于高频小信号放大器不稳定性的影响,灵敏度不可能太高。

2. 超外差式接收机

超外差式接收机的出现相对较晚,原理比较复杂。以调幅广播接收机为例,超外差式接收机的基本组成方框图如图1-5所示,主要包括选频电路、混频器、本机振荡器、中频信号放大器、检波器、低频电压放大器、低频功率放大器和喇叭。需要注意的是,有一些超外差式接收机的选频电路与混频器之间还有一级高频小信号放大器。

在图1-5中,本机振荡器产生正弦波信号,输入混频器后,与输入的调幅信号互相作用,产生一个固定频率的信号——中频信号,这是超外差式接收机的关键技术所在。其他部分的功能与直接放大式接收机一样,这里不再赘述。虽然天线感应的不同已调波信号有不同的载波频率,但是在超外差式接收机中,从中频信号放大器以后的电路的工

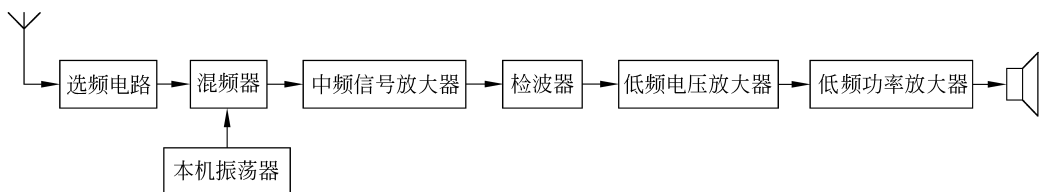


图 1-5 超外差式接收机的基本组成方框图

作频率都是不变的。对于超外差收音机,选择不同的节目,本质上就是选择不同载波频率的已调波信号,这个操作常被称为选台。在超外差收音机中,选台是靠选频电路和本机振荡器共同调整参数完成的。

超外差接收机的应用非常广泛,比如收音机、电视机、卫星差转机。

超外差接收机的主要特点是把接收到的已调波信号的载波角频率或中心角频率 ω_c 先变成频率较高或较低的、固定不变的中间频率 ω_i (通常称为中频),而其振幅、频率和相位的变化规律保持不变。超外差接收机的核心模块是混频器。混频器的功能就是把接收到的载波频率不同的信号变换为载波频率固定不变的中频信号。这种功能就是所谓的外差功能,这也是超外差式接收机名称的由来。由于中频是固定的,接收机的中频放大器及其后面的电路的性能都与接收到信号的载波频率没有关系,这就克服了直接放大式接收机的缺点。在无线电技术里,混频器与本地振荡器往往被合并为一个电路,叫作变频器。

由于从中频信号放大器以后的电路的工作频率都是不变的,作为超外差收音机核心电路的检波器就能非常稳定地保持比较好的工作效能,有利于提高整个接收机的性能。

超外差收音机的优点是灵敏度比较高,既适合于作固定工作频率的接收机,也适合于作工作频率变化范围较大的接收机,而且调谐方便,工作性能比较稳定;其缺点是结构比较复杂。

3. 超再生接收机

超再生接收机又称为直接转换型接收机,或零差接收机,或零中频接收机,可以认为它是一种特殊的超外差式接收机,以调幅广播接收机为例,其基本组成方框图如图 1-6 所示。目前,许多监控系统常常使用超再生接收机。

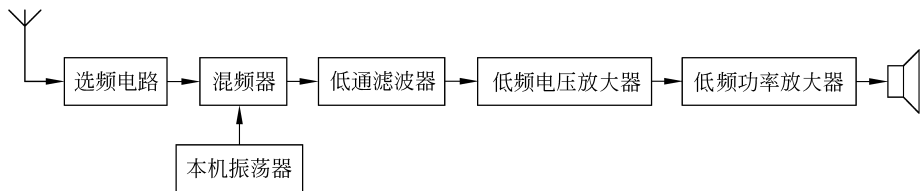


图 1-6 超再生接收机的基本组成方框图

在这种接收机中,本机振荡器输出信号的频率与选频电路输出信号的载波频率或中心频率相同,也就是说,该接收机的中频频率为零,这样放大和滤波就能在低频处实现,在低频段只需较低的功耗就可以获得与在较高中频处相同的增益,同时还可以用表面贴封装的电阻和电容实现滤波,而无须外加一个既昂贵又庞大的类似 SAW(声表面波滤波

器)的滤波器。对于超再生接收机,本质上就是把已调波的频谱线性搬移到调制信号(基带信号)的频带内,而无须检波器。超再生接收机只适用于模拟调制中的标准调幅、双边带调幅、单边带调幅、残留边带调幅和数字调制中的 OOK(On-Off Keying,通断键控)调制。标准调幅信号的超再生接收机的工作原理示意图如图 1-7 所示。标准调幅的频谱中包括载波频率分量和上、下边带信号(相当于调制信号在频率轴上向左和向右分别平移 f_c 得到的信号),如图 1-7(a)所示。超再生接收机把标准调幅信号的频谱向左平移 f_c 得到的信号就是原来的调制信号,从而实现了解调,如图 1-7(b)所示。

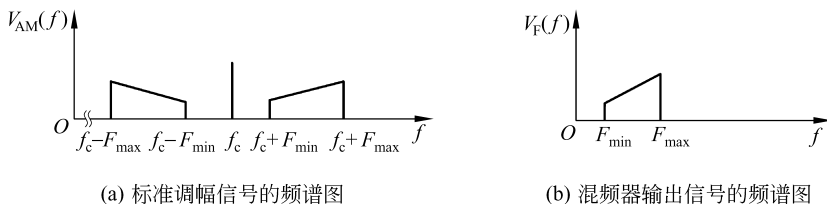


图 1-7 标准调幅信号的超再生接收机的工作原理

一般超再生接收机在中波段和短波段工作时,灵敏度很高。超再生接收机的优点是灵敏度比较高,既适合于作固定工作频率的接收机,也适合于作工作频率变化范围较大的接收机,而且调谐方便;其缺点主要是选择性、稳定性和信噪比稍差,当本机振荡器输出信号的频率发生漂移时,接收机的非线性失真比较严重。

1.2 通信电子线路的研究对象

信息的传输是人类每时每刻都在进行的活动。信号是信息的载体,人类利用电信号来传输信息已有一百多年的历史,信息正日益成为人们工作和生活的重要组成部分。通信的基本功能就是把信号从一个地方传输到另一个地方。图 1-8 所示的是通信系统的基本组成方框图,主要包括输入变换器、发送设备、传输信道、接收设备和输出变换器。输入变换器把非电物理量转换为电信号;发送设备把电信号处理成适合于信道传输、满足人们特别要求(如加密、频谱搬移)的信号;传输信道是信号接收点与发送点之间的通道;接收设备是完成与发送设备对等、相反的处理的设备;输出变换器把电信号转换为需要的物理信号,如声音、图像、文字和符号。根据传输信道分,通信系统分为有线通信系统和无线通信系统两类。无论是有线通信系统还是无线通信系统,高频电子线路是必不可少的电路,也是生产、设计通信系统的难点之一。

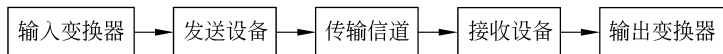


图 1-8 通信系统的基本组成方框图

“通信电子线路”是通信类、电子类以及信息类专业的一门重要的专业基础课,是理论性和实践性很强的课程,也是所有课程中的难点之一。这门课程通常由以下内容组

成：高频小信号谐振放大器、高频谐振功率放大器、正弦波振荡器、调制器（包括调幅电路、调频电路和调相电路）、混频器、解调器（检波器、鉴频器和鉴相器）及反馈控制电路（包括自动增益控制电路、自动频率控制电路和自动相位控制电路）。

“通信电子线路”课程的研究对象是通信系统发送设备和接收设备中的各种完成高频信号处理的电路的功能、原理和组成。该课程所研究电路的工作频率从几百千赫到几百兆赫。不同频段有不同的特点，适合完成不同的功能。不同频段的典型用途如表 1-1 所示。

表 1-1 不同频段的典型用途

频率范围	波 长	名 称	典 型 用 途
30~300Hz	10 000~1000km	特低频	水下通信、电报
0.3~3kHz	1000~100km	音频	数据终端设备、固定电话
3~30kHz	100~10km	甚低频	导航、声呐、电报、电话、频率标准
30~300kHz	10~1km	低频（长波）	导航、航标信号、电报
0.3~3MHz	1km~100m	中频（中波）	商用调幅广播、业余通信、海军无线电通信、测向、遇险与呼救
3~30MHz	100~10m	高频（短波）	国际定点通信、军用通信、商用调幅广播、飞机与船通信、岸与船通信
30~300MHz	10~1m	甚高频（超短波）	电视广播、调频广播、车辆通信、航空通信、导航设备
0.3~3GHz	1~0.1m	超高频（分米波）	电视广播、雷达、遥控遥测、导航、卫星通信、无线电测量、移动通信
3~30GHz	0.1~0.01m	极高频（厘米波）	卫星通信、空间通信、微波接力、机载雷达、气象雷达、陆地机动车通信
30~300GHz	0.01~0.001m	特高频（毫米波）	雷达着陆系统、射电天文、铁路设施、科学研究

注：频率 30kHz 以下的称为超长波，30~1000MHz 的称为超短波，1000MHz 以上的称为微波。

本课程研究的大部分电路都是非线性电路。非线性电路的分析方法与线性电路的分析方法是不同的，所以，非线性电路的分析方法也是本课程的重要内容之一。

另外，本课程是理论性和实践性很强的课程，同学们可以一边学习，一边动手做一些紧密结合本课程内容的小电路，或者做一些电子设备的维修，比如收音机、电视机。需要特别注意的是，一定要注意人身安全，尤其是在维修彩色电视机等有高电压、大电流的设备的时候。

本章小结

本章介绍了无线电通信的发展历史、无线电信号的传输特点和传输方法，概述了无线电发射设备和接收设备的基本组成与工作原理，提出了“通信电子线路”课程的主要研究内容和学习方法，为后续章节的展开建立了一个整体的概念。

通过本章的学习，读者可以了解无线电通信的发展历史、无线电发射设备和接收设

备的基本组成和工作原理,掌握直接放大式接收机、超外差式接收机和超再生接收机的基本组成、工作原理和它们的优缺点。

思考题与习题

- 1.1 电磁波具有哪些特点?
- 1.2 试画出无线电发射设备的一般组成方框图,并简要说明各部分的功能。
- 1.3 现代通信系统有哪几种接收机?各有什么优点、缺点?

高频小信号放大器

2.1 概述

高频信号是指频率在数百千赫至数百兆赫的信号。小信号放大器是指放大器输入信号小,可以认为放大器的有源器件工作在线性区,并把它看成线性元件,分析电路时将其等效为二端口网络。高频小信号放大器的功能就是对微弱的高频信号进行不失真放大。

高频小信号放大器是通信设备中常用的功能电路,广泛应用于广播、电视、通信和测量仪器仪表等设备中。按照所使用的器件不同,高频小信号放大器可以分为晶体管高频小信号放大器、场效应管高频小信号放大器和集成电路高频小信号放大器;按照所放大信号的频带宽度不同,可以将其分为窄带高频小信号放大器和宽带高频小信号放大器;按照所使用负载的性质不同,可将其分为谐振高频小信号放大器和非谐振高频小信号放大器。

本章主要讨论晶体管单级窄带谐振高频小信号放大器,对其他器件的单级谐振放大器、多级级联放大器、集成宽带放大器也略加讨论。

谐振放大器是指采用谐振回路(可以是串联回路、并联回路及耦合回路)作为放大器的负载。由于谐振回路具有选频特性,因此,谐振放大器对于靠近谐振回路的谐振频率的信号,有比较大的电压增益;而对于越远离谐振频率的信号,电压增益越小。因此,谐振放大器不仅具有电压放大的作用,还具有滤波或选频的作用。

由集中滤波器(如 LC 集中选频滤波器、石英晶体滤波器、声表面波滤波器、陶瓷滤波器等)和宽带放大器组成的高频小信号放大器具有结构简单、调试方便、性能良好和易于集成化等优点。

高频小信号放大器的主要性能指标有电压增益、功率增益、通频带、选择性、矩形系数、抑制比、工作稳定性和噪声系数,下面将逐一介绍。

1. 电压增益和功率增益

电压增益或电压放大倍数 $\dot{A}_u$ 等于放大器输出电压 $\dot{U}_o$ 与输入电压 $\dot{U}_i$ 之比,功率增益或功率放大倍数 $\dot{A}_p$ 等于放大器输出功率 $\dot{P}_o$ 与输入功率 $\dot{P}_i$ 之比,即

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (2-1)$$

$$\dot{A}_p = \frac{\dot{P}_o}{\dot{P}_i} \quad (2-2)$$

电压增益和功率增益常常用分贝数(dB)表示。我们希望放大器的增益尽量大些,在满足总增益的要求时,放大器的级数就会少些。但是,放大器的增益过大也是引起放大器不稳定的一个因素。因此在设法提高放大器增益的同时,也要考虑其稳定性。放大器的增益大小,取决于所选用的有源器件性能、要求的通频带宽度、阻抗是否匹配和稳定性等因素。

2. 通频带

放大器的输入信号一般都是已调波信号,它有一定的频谱宽度。如果放大器要实现不失真放大,则必须让输入信号的频谱分量都等增益地通过放大器。因此,放大器必须有适当的通频带。

对于谐振放大器,放大器的选频特性和谐振回路的选频特性是一致的。与谐振回路的通频带定义相同,放大器的通频带是指放大器的电压增益从最大值下降到其 0.7 (即 $\sqrt{2}/2$) 倍处所对应的频率范围,常用 $2\Delta f_{0.7}$ 表示。

放大器的通频带取决于谐振回路的形式和谐振回路的有载品质因数 Q_L 。此外,放大器的总通频带随着放大器级数的增加而变窄,而且,通频带越宽,放大器的增益越小。

通频带 $2\Delta f_{0.7}$ 也被称为 3dB 带宽,因为电压增益下降至 3dB 处就是下降至 $\sqrt{2}/2$ 倍处。为了测量方便,还将通频带定义为放大器的电压增益从最大值下降到其最大值的 0.5 倍处所对应的频率范围,用 $2\Delta f_{0.5}$ 表示,也称为 6dB 带宽。

不同用途的放大器,其通频带差异比较大。比如,收音机的中频放大器的通频带为 $6\sim 8\text{kHz}$,而电视机的中频放大器的通频带约为 6MHz 。

3. 选择性、矩形系数和抑制比

放大器从含有各种不同频率分量的信号(包括有用信号和干扰信号)中选出有用信号,排除或抑制干扰信号的能力,称为放大器的选择性。一方面,由于无线电电台的数量日益增多,汽车、摩托车、机床的电动机以及供电设备的合闸与分闸等电脉冲干扰越来越严重,必然对放大器的选择性要求越来越高;另一方面,干扰的情况也很复杂,有中心频率位于有用信号中心频率附近的临近电台或频道的干扰,称为临台干扰或临频道干扰,有特定频率的组合干扰,有电子元器件的非线性产生的交调干扰和互调干扰;等等。

对于放大器的选择性的定量分析,常用矩形系数和抑制比来说明。

放大器的选择性是指放大器对有用信号的放大和对无用信号的抑制的能力。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,而把通频带以外的频谱分量衰减为零,此时放大器的频谱特性曲线是矩形。但是,实际上的频谱特性曲线与矩形有比较大的差异。为了评定实际频谱特性曲线的形状接近矩形的程度,引入矩形系数这个参数,用 K_r 表示。如果用 $2\Delta f_{0.1}$ 或 $2\Delta f_{0.01}$ 表示放大器的电压增益从最大值下降到其 0.1 或 0.01 倍处所对应的频率范围,矩形系数 $K_{r0.1}$ 就是 $2\Delta f_{0.1}$ 与 $2\Delta f_{0.7}$ 之比, $K_{r0.01}$ 就是 $2\Delta f_{0.01}$ 与 $2\Delta f_{0.7}$ 之比,即