

第 1 章 绪 论

通信的任务是传递信息，信息可以是语言、音乐、文字、符号、图像或数据。古代人们曾用烽火、信鸽或信使报告敌情，用军旗来指挥战斗，用战鼓和号角传达军令。这些方法都依赖于人的视觉和听觉，而人的视觉和听觉范围都非常有限，很难实现远距离信息传递。我国古代神话创作中的千里眼、顺风耳都反映了人们渴望实现远距离快速传递信息的愿望。

1837 年，莫尔斯（Morse）发明了电报，开创了通信的新纪元；1864 年麦克斯韦（Maxwell）发表了著名论文《电磁场的动力理论》，该论文在总结前人工作的基础上，得出了电磁场方程，从理论上预言了电磁波的存在；1876 年贝尔（Bell）发明了有线电话，能直接将语音信号变为电信号沿导线传输；1887 年，德国物理学家赫兹（Hertz）用实验证实了电磁波的客观存在，验证了麦克斯韦理论的正确性。自此以后，许多科学家都致力于研究如何利用电磁波传输信息的问题，即无线电通信。著名的科学家包括英国的罗吉（Lodge）、法国的勃兰利（Branly）、俄国的波波夫、意大利的马可尼（Marconi）等。其中，马可尼的贡献最为重要，1895 年他首次在几百米距离上实现了电磁波通信，1901 年又完成了横跨大西洋的无线电通信。从此无线电通信进入实用阶段，无线电技术也就蓬勃发展起来了。

1.1 通信系统模型

1.1.1 通信系统的基本组成

任何一个通信系统，都从一个被称为信息源的时空点向另一个被称为受信者的目的点传送信息。通信系统是指实现这一通信过程的全部技术设备和信道的总和。通信系统种类很多，它们的具体设备和业务功能各不相同，但一个完整的通信系统应包括信息源、输入变换器、发送设备（发射机）、信道、接收设备（接收机）、输出变换器和受信者，通信系统的基本组成如图 1-1 所示。

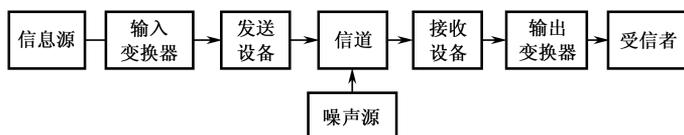


图 1-1 通信系统的基本组成

信息源：信息来源，具有各种不同的形式，如音乐、语言、文字、图像等，一般是非电量信号。

输入变换器（话筒、拾音器、摄像机等）：将信息源输入的待传输的信息转换成相应的电信号，这种包含消息的电信号称为基带信号。例如，利用话筒可以把语音转换成与之相应变化的电信号，利用摄像机可把图像信号转换成与之相应变化的电信号。

发射机：主要任务是调制和放大，将基带信号变换为适合信道传输的高频电信号（调制），高频电信号经过放大后获得足够的功率送入信道，完成信号的有效传输。变换后的高频电信号称为已调信号或频带信号（Passband Signal）。

信道：带有信息高频电信号的传输通道，也就是传输媒介。信道可分为有限信道和无线信道两大类。有限信道可以是架空明线、电缆、波导、光纤等，无线信道是自由空间。

接收机：其功能是从信道接收到的信号中恢复出与发射机输入信号一致的基带信号。因信号经信道传输后，难免有噪声干扰的加入，在接收机中必须滤除这些干扰，确保通信质量。

输出变换器：将接收机输出的电信号还原成原始信息，如声音、图像等。例如，通过耳机或扬声器把代表语音变化的电信号还原为语音，通过显像管把图像信号还原成图像信息重现在荧光屏上。

噪声源：信道中的噪声及分散在通信系统中所有噪声的集中表示。

通信系统通常要完成两种重要的变换。在发送端，将要传输的非电量信号转换成电信号，该电信号一般由零频附件的直流分量和低频信号组成，称为基带信号（Baseband Signal），其特点是频率低、相对带宽较大。例如，语音信号带宽为 300~3400Hz，波长为几百千米，天线尺寸与信号波长相比拟难以实现，所以不适合无线传输，也不适合发射。为了实现有效发射和传输就必须对信号进行调制。

调制过程：使高频载波信号的某一参数（幅度、频率、相位）随着要传输的低频电信号变化，即实现包含消息的低频信号对高频信号的加载。

调制过程的目的如下。

1. 天线有效发射

无线电通信中的“发射”是指把高频电流转换成电磁波的形式在空间传播。只有当馈送到天线上的信号波长与天线尺寸可以相比拟时，天线才能有效发射。代表消息的基带信号通常都是低频信号，其波长远远大于天线尺寸，因此将基带信号电流送到天线上，是不能有效地变换成辐射到远方的无线电波的。例如，频率为 50Hz 的信号，波长为 6000km，要有效发射，天线尺寸要几百千米，这样的天线几乎无法实现。

2. 实现有效传输

高频具有宽阔的频段，能容纳许多互不干扰的频道，从而传输某些宽频带信号。我们知道，任何通信系统为了传递一定的信息必须占据一定的带宽。也就是说，代表消息的电信号通常都具有复杂的波形，它含有许多频率分量，因而占有一定的频率范围。单纯的正弦波不携带任何信息。要听懂对方的语音需要传递信号的频率为 300~3400Hz；

要传送一个语音信号至少要 3kHz 的频带。普通电话就是这样设计的，因为电话的声音只能听懂，不悦耳，也不逼真。为了相当逼真地传送语音和音乐信号，要占据 6~15kHz 的带宽。在调频广播中，其信号频率规定为 50Hz~15kHz，这是广播所要求的频率。电视中的图像信号，波形较复杂。它会有宽广的频率范围，图像信号占据的带宽为 0~6MHz。一路彩色图像信号加上伴音信号要占据 8MHz 带宽；而一条通信线路一般只能有不超过 10% 的相对带宽 ($\frac{\Delta f}{f_0}$)，其中 f_0 为载波频率。 f_0 越高，则 Δf 越大，所能容纳的互不干扰的信息就越多，传输的信息容量就越大。这就是无线电通信要通过调制之后才能进行发射传输的原因。

3. 实现信道的复用，提高信道利用率

音频信号的频带几乎分布在同一范围，都集中在 20Hz~20kHz。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形式传送，则无法保证同时传送多路信息而又不相互干扰，并且不利于接收端正确区分两路以上的信息，因此必须要把传送的信息分开。本书即将介绍的 AM、FM 中，就是通过调制实现频带分离的。这种分离信号的方法称为频分多址 (FDMA)，即不同信号被分配到不同频率的信道里，采用带通滤波器滤除邻近信道的干扰。另外，还有一种方法称为时分多址 (TDMA)，即两个或两个以上的信号共享相同的频带，但在不同的时间段使用。人耳在接收时，可以将不同的时间段结合起来，感觉上就像信号是连续的一样。扩展频谱技术称为码分多址 (CDMA)，即多个用户连续使用一个较宽的频带，然而在每个用户发送和接收数据时，使用接收的方式进行编码，以便能够和其他所有用户区分开来。

1.1.2 无线电发射系统的组成及工作原理

无线电广播调幅发射系统应用极其广泛，现以图 1-2 所示调幅发射机为例说明无线电发射系统的主要组成及基本工作原理。

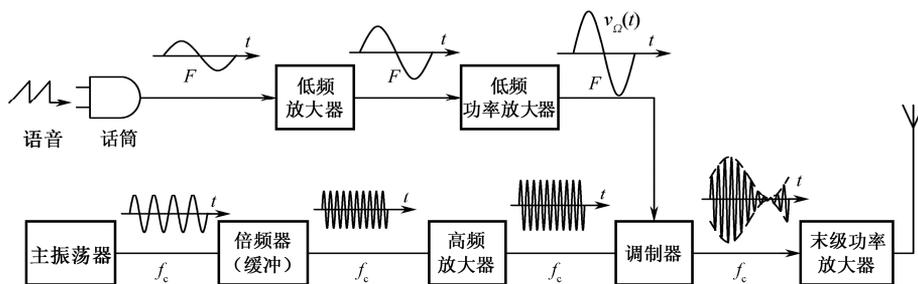


图 1-2 调幅发射机的主要组成及基本工作原理

发射机的主要功能是调制、上变频、功率放大和滤波。原始信号（语音、图像、数据等）经过变换器变换为电信号，用该低频基带信号对高频载波进行调制，将已调波信号经过功率放大器放大后通过天线发射出去。发射机通常由高频、低频、电源和天线 4

部分组成。

高频部分如下。

主振荡器（Master Oscillator）：由石英晶体振荡器产生频率稳定的高频振荡。

缓冲级（Buffer）：实质上是一种吸收功率小、工作稳定的放大级，其作用是减弱后级对主振荡器的影响。

倍频器（Frequency Double）：将主振荡器的频率提高到需要的频率。

高频放大器（Amplifier）：放大高频信号，以推动末级功率放大器的电平。

调制器（Modulator）：完成低频信号对高频载波信号的加载。

末级功率放大器（Power Amplifier）：将输出功率提高到所需的发射功率。

低频部分用于实现声电变换，并将音频信号逐级放大到调制所需功率，对高频载波信号进行调制。低频部分包括声电变换器（话筒）、低频放大器、低频功率放大器。

直流电源：给各部分电路提供直流电能。

天线：把高频已调制信号变换为空间电磁波辐射出去。

1.1.3 无线电接收系统的组成及工作原理

无线电信号的接收过程与发射过程相反，其根本任务就是准确恢复信息。为了提高灵敏度，目前无线电接收机都采用超外差式，系统框架如图 1-3 所示，主要包括选频回路、高频放大器、变频器、本振、中频放大器、检波器、低频功放器和扬声器。接收过程如下：接收天线收到微弱高频调幅信号，经选频回路选频后，通过高频放大器放大，送到变频器与本振所产生的等幅高频信号进行混频，混频后得到的中频信号的包络形状与天线感应输入的高频信号的包络形状完全相同，经中频放大器放大后送到检波器，检出原调制的低频信号，经低频功放器去推动扬声器。超外差式无线电接收机（Super Heterodyne Receiver）的主要特点是把天线感应进来的不同已调波信号的载波频率 f_c ，通过混频转换为固定中频频率 f_i （Intermediate Frequency）的已调信号，通常中频频率要比接收信号频率低得多。我国广播收音机的中频频率为 465kHz，电视接收机的图像中频频率为 38MHz。由于中频信号是频率较低的固定中频信号，因而中频放大器的谐振回路在接收机选频时不需要调整，这显著提高了接收机整机的选择性和灵敏度。这是无线电设备中的接收机都要用超外差式的原因。

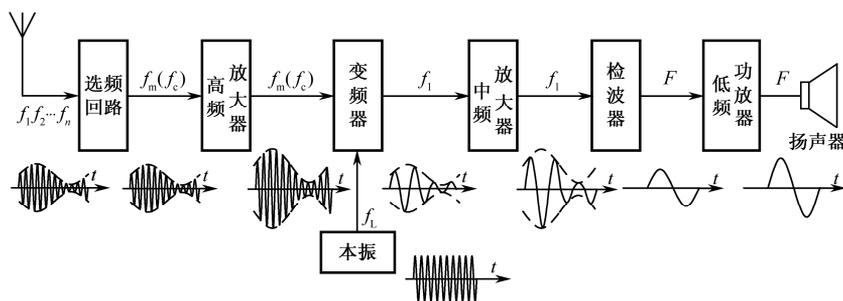


图 1-3 典型超外差式无线电接收机系统框架

1.1.4 无线电系统的通信方式

如果通信只在点与点之间进行，那么按消息的传送方向与时间，通信方式可分为单工通信、半双工通信、全双工通信3种。

单工通信是指消息只能单方向进行传输的工作方式，如图1-4(a)所示。广播、遥控就采用单工通信方式。

半双工通信是指通信双方都能收发信息，但收和发不能同时进行的工作方式，如图1-4(b)所示。使用同一载频工作的对讲机就是按这种通信方式工作的，当一方占用载频发送信息时，另一方只能接收信息。

全双工通信是指通信双方可同时、双向传输消息的工作方式，如图1-4(c)所示。普通电话就采用最简单的全双工通信方式。

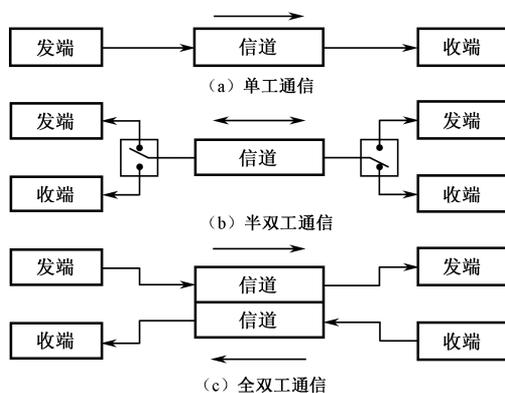


图 1-4 通信方式

1.1.5 通信系统的主要性能指标

通信系统的性能指标是衡量、比较和评价一个通信系统的标准，是针对整个通信系统综合提出的。

发射机的主要技术指标如下。

1. 频率范围

发射机的工作频率是指发射机的射频载波频率，一般是接收机能够正常工作的频率范围或频段，有两个方面的要求。其一，在频段内任何一个频率点上都能工作；其二，在整个频段内所有频率上的电性能基本稳定。

2. 频率的准确度与稳定度

发射机的频率准确度与稳定度是相对于射频载波而言的，基本上由载波基准频率振荡器决定。

频率准确度是指实际工作频率对于标称工作频率的准确程度。频率稳定度是指在各种外界因素的影响下发射机频率的稳定程度。一般调幅发射机、单边带发射机的频率稳定度量级分别为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 、 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 。

3. 载波的频率捷变

载波的频率捷变是多频道发射机的一个重要指标，是指载波频率快速改变的能力。通常利用频率合成器来设置和改变发射频率。

4. 频谱纯度

发射机除产生载波信号及需要的边带信号外，还会产生一些寄生信号。所有的放大器都可能产生谐波失真，如C类功率放大器就会产生大量的谐波成分，必须设计电路对寄生谐波进行滤除，以免影响正常通信。

5. 输出功率

发射机的输出功率是指发射机传送到天线馈线上的功率。因为发射机采用不同的调制方式，故发射输出功率的测量方法是不同的。例如，普通调幅波（AM）系统的发射功率是根据载波功率来确定的，而在抑制载波的调幅系统中采用峰值包络功率（PEP）来确定发射功率。FM系统发射的额定功率为输出信号的总功率。

接收机的主要性能指标包括频率范围、频率稳定度、频率准确度、灵敏度、选择性、工作稳定性等。

1. 频率范围

接收机通常是分波段工作的，即具有一定的工作频率范围。对于接收机的频率范围有以下两点要求：

- （1）接收机能准确调谐到给定频率范围内的任何一个频率点；
- （2）在给定频率范围内的任何一个频率点上，接收机的主要性能指标均符合要求。

2. 频率稳定度与频率准确度

接收机的频率稳定度是指其本振频率的稳定度。频率准确度用于描述接收机实际工作频率与度盘刻度的一致性程度。

3. 灵敏度

灵敏度是指当接收机输出功率和输出信噪比一定时，接收机接收微弱信号的能力，即天线上所需的最小感应电动势。灵敏度越高，接收微弱信号的能力就越强。

需要指出的是，接收机应具有选择信号而抑制干扰的能力。提高接收机增益虽然有利于提高灵敏度，但接收机的噪声也被同时放大。当接收信号很微弱时，噪声就可能淹没有用信号。

4. 选择性

选择性是指接收机从与有用信号相近的各种频率干扰信号中鉴别出有用信号的能力。通常接收机的选择性由谐振回路及滤波器实现，谐振曲线是描述选择性最基本、最常用的表示方法。谐振曲线可以很好地说明对邻近干扰的抑制情况。谐振曲线过于尖锐往往会使通频带减小而造成信号失真，故不能离开通频带来讨论选择性，必须同时兼顾。

5. 工作稳定性

接收机的工作稳定性包括两个方面：一是在任何情况下，接收机不应产生寄生振荡；二是在工作过程中，接收机质量指标的变动不应超出许可范围。

1.2 无线信道及无线电波的传播特性

无线信道主要是自由空间。由于地球表面及空间层的环境条件不同，发射的无线电波因其频率或波长不同，传播特性也不相同。传播特性指的是无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。决定传播方式的关键因素是无线电信号的频率，不同频段的无线电信号有各自最适宜的传播方式，而传播方式又决定了其传播距离和传播特点。

无线电波的传播方式主要有绕射（地面波）传播、折射和反射（天波）传播、直射（视距）传播、散射传播。

图 1-5 给出了无线电波的几种主要传播方式。

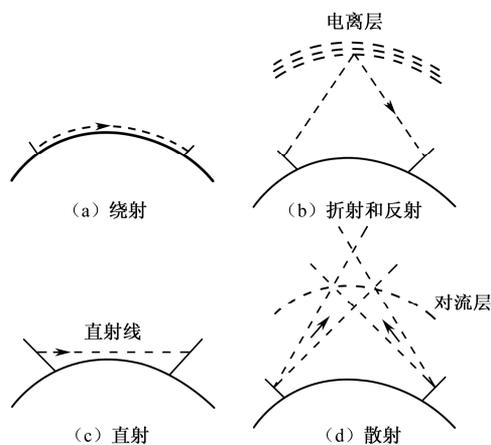


图 1-5 无线电波的几种主要传播方式

1. 绕射（地面波）传播

沿着地球弯曲表面传播的无线电波叫地面波，又叫表面波，如图 1-5 (a) 所示。由于地球表面是具有电阻的导体，当电磁波沿地面传播时，一部分能量将被消耗，并且频率越高，趋肤效应越严重，损耗越大，传播的距离就越短，因此频率较高的电磁波不宜采用绕射方式传播。通常只有中、长波范围的信号才采用绕射方式传播。例如，1.5MHz 以下的电磁波可以采用这种传播方式。由于地面的电性能在短时间内不会有大的变化，故地面波的传播特性是稳定、可靠的。它主要用于无线电导航、中波无线电通信和中波广播。

2. 折射和反射（天波）传播

在地球表面存在一定厚度的大气层，由于受到太阳照射，大气层上部的气体将发生电离而产生自由电子和离子。距地球表面 60~450km 被电离了的这部分大气层叫作电离层。通过电离层的折射和反射返回地面的无线电波叫天波，如图 1-5 (b) 所示。

当无线电波入射到电离层后，一部分能量被电离层吸收后损失，另一部分能量被电离层折射和反射回地面。无线电波频率越高，在电离层中被吸收的能量越少。随着频率升高，

无线电波穿入电离层越深;当频率超过一定值后,无线电波将穿透电离层而不再返回地面。最适合采用天波传播方式的是短波波段,如 1.5~30MHz 的电磁波主要靠天波传播。远距离无线电广播、短波无线电通信、国际无线电广播都采用天波传播。

当短波波段利用天波传播时,受到电离层反射、折射回到地面的无线电波可能受到地面的反射再次入射电离层,经过多次反复反射、折射,可使天波传播距离很远,所以天波传播方式可利用较小的功率传播很远的距离。不足之处在于电离层物理特性受季节、昼夜、气候的影响,因而采用天波传播的短波波段通信不稳定。例如,在接收短波电台时,声音忽大、忽小,有时甚至完全收听不到。

3. 直射(视距)传播

电波从发射天线出发,沿直线传播到接收天线的传输方式称为直射传播,这种波也叫空间波,如图 1-5(c)所示。对于频率在 30MHz 以上,进入米波、分米波、厘米波的波段,以地面波方式传播衰减极大,以天波方式传播将穿透电离层不能返回地面,只能以空间波方式在视距范围内传播。

由于地球表面是弯曲的,因此发射天线和接收天线的高度将影响这种直射传播的距离。也就是说,空间波传播的距离受限于视距范围。发射天线和接收天线越高,所能进行通信的距离越远。理论计算和实践经验表明,当接收天线和发射天线高度均为 50m 时,视距传播距离约为 50km。利用通信卫星来增加天线高度,可大大增加通信距离。微波中继通信中的天线高度大约为几十米,视距传播距离可达 50~60km。

4. 散射传播

距离地表面 10~13km 的大气层称为对流层。对流层空气密度较高,所有的大气现象(如风、雨、雷、电等)都发生在对流层。对流层中存在各种不同尺度的非均匀介质,当无线电波辐射到这种非均匀介质上时,它将入射波的能量向四面八方辐射,称为散射。利用对流层的散射进行超视距远距离通信的无线电波传播方式称为散射传播,如图 1-5(d)所示。东方鱼肚白,就是大气对阳光的散射作用。散射传播主要发生在 400~10000MHz,属于超短波和微波范围。对流层散射传播的通信距离为 100~500km,电磁波经对流层散射后能量损失很大,所以对流层散射通信要求使用大功率的发射机、高灵敏度的接收机、方向性强的天线。

1.3 本书的主要内容及特点

“通信电子电路”是通信类、电子类、信息类专业一门重要的专业基础课,是理论性和实践性很强的课程,也是难点课程之一。

本书的内容主要包括以下 3 个方面。

- (1) 信号的放大:包括高频小信号谐振放大器、高频谐振功率放大器。
- (2) 信号的产生:正弦波振荡器。

(3) 信号的频率变换：调制、解调及混频电路。

“通信电子电路”课程主要研究无线电通信系统发射设备、接收设备中各组成模块的基本功能、工作原理及设计方法。

“通信电子电路”课程特点如下。

(1) 通信电子电路主要由线性元件和非线性元件组成。严格来讲，所有包含非线性元件的电路都是非线性的，只是在不同的工作条件下，非线性元件表现出的非线性程度不同而已。例如，当分析高频小信号谐振放大器时，就利用非线性元件在较小的动态范围内可用线性等效电路来描述的特点，将其近似地用线性电路进行分析。非线性电路一般都采用非线性电路分析方法。

(2) 通信电子电路学习的一个重点是实现各种功能电路的分析。熟悉典型的单元电路对提高识图能力和系统电路的设计能力都非常有意义，在学习中还必须抓住各种电路模块之间的共性，洞察各功能模块之间的内在联系。近年来，集成电路（IC）和数字信号处理芯片（DSP）技术发展迅速，各种通信电路模块甚至系统都可以集成到一个芯片内完成，称为片上系统（SOC）。但所有这些电路都是以分立元件为基础的，在学习中应做到“分立为基础，集成为重点，分立为集成服务”。在学习具体电路时，要掌握“管为路用，以路为主”的方法，做到以点带面、触类旁通。

(3) 通信电子电路是在科学技术和生产实践中发展起来的，只有通过实践才能对理论有深刻的理解，在学习中一定要重视实践环节，坚持理论联系实际，在实践中积累丰富经验。随着系统电路复杂程度的不断提高，运用电子设计自动化（EDA）技术对电路进行仿真分析、优化设计和 PCB 板的电磁兼容分析，已成为一种必然趋势，因此掌握通信电子电路 EDA 技术成为本课程的一个重要内容。

1.4 本章小结

本章简要介绍了无线电通信的发展史、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和工作原理，阐述了“通信电子电路”课程的主要研究内容及学习方法，为后续章节的学习奠定了基础，并提供了引导。

思考题与习题

1-1 画出无线电通信接收机/发射机的原理框架及各功能模块的输出波形，并说明各部分的功能。

1-2 为什么在无线电通信中要使用“载波”发射？其作用是什么？

1-3 基带信号有什么特点？无线电通信为什么要进行调制？

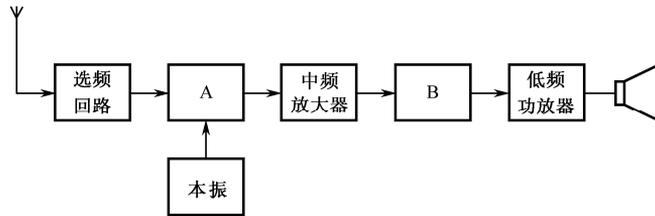
1-4 无线电通信传播主要有哪几种方式？

1-5 不同波段的无线电信号的传播特性有何不同？

1-6 在超外差式接收机中，天线收到的高频信号经_____、_____、_____、_____后送入低频放大器的输入端。

1-7 一个完整的通信系统由_____、_____和_____组成。

1-8 接收机框架如题图 1-1 所示，写出空白框 A 和 B 的名称。在框架中由非线性电路实现的功能有_____。



题图 1-1 接收机框架