

绪 论

1.1 无线电通信概述

通信的任务是传递信息，信息可以是语音、音乐、文字、图像或数据。

人类目前对语音等信息的处理尚不成熟，而对电信号的控制技术已经日趋完善，所以，传递信息，首先是将它们通过输入变换器变成电信号，这个输入变换器也就是俗称的传感器，它把不同类的信息变成称为基带信号的电信号。

为了有效地进行远距离传输，在无线通信中还必须把基带信号变成高频已调信号，这个过程称为调制，调制的主要原因有如下三个。

(1) 为了有效地把信号用电磁波辐射出去。

代表信息的基带信号的频率较低（如语音信号频谱分布范围为 300~3000Hz），与要传递的原来信息的频率一致，能量较低，在空气中的传播速度也慢，衰减很快，不能远距离传播。

(2) 在实际产品中方便实现。

我们知道，无线电波是以光速传播的，与信号周期 T 对应的一个参数是波长，它们之间的关系为

$$\lambda = c \times T \quad (1.1.1)$$

式中， c 为光速（ $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）， λ 的单位为 m。为了有效地将信号的能量辐射到空间，根据电磁波传播理论，欲使交变电能以电磁波的形式有效地从天线上辐射出去，要求天线的长度和信号的波长可比拟（天线的长度为信号 λ 的 0.1~1 倍）。而基带信号一般是低频信号，如语音的频率可以认为在 300~3400Hz 范围内，如果直接辐射语音信号，就要求天线长度达 300km 以上，这是不方便实现的。因此为了有效地辐射，发射信号的频率必须是高频。

(3) 为了有效利用频带。

一般要传送的基带信号的频率范围都差不多，比如广播电台要广播的音乐节目的频率范围集中在 100Hz~10kHz，如果每个电台都直接发射这些信号，就会互相干扰，令接收机无法区分。只有将不同电台的节目调制到该电台对应的不同频率的载波上，变成中心频率不同的频带信号，接收机才能任意选择所需要的电台而抑制其余不需要的电台和干扰。

调制好比人类行走速度较慢，为了快速到达目的地，人们借助飞机、火车等交通工具。不同的交通工具有不同的特点，同样调制的方式也有多种。

调制是指：携带信息的基带信号控制高频振荡信号的某一参数，使之按照该基带信号的变化规律而变化。

调制信号如为模拟信号（模拟信号指电信号的某一参量的取值范围是连续的），称为模拟调制（Analog Modulation）；如为数字信号（数字信号是指电信号的某一参量携带离散信息，其取值是有限个数值），则称为数字调制（Digital Modulation）。采用不同调制方式的通信系统的性能和技术难度都是不同的，数字调制的原理和应用将在通信原理中讲述，本书重点阐述模拟调制。

模拟调制分为三种：振幅调制，频率调制，相位调制，下面分别介绍。

携带信息的基带信号也称为调制信号，是由原始信息变换后的低频电信号，通常用 $V_{\Omega}(t)$ 表示。未调制的高频振荡信号称为载波信号，它可以是正弦波，也可以是非正弦波，如方波、三角波、锯齿波等，但都是周期性信号，一般用符号 $V_c(t)$ 表示。载波信号的频率称为载频（或射频）。经过调制后的高频振荡信号称为已调波信号。

正弦载波有三个参数：振幅、频率和相位。若受控的参数是振幅，则这种调制称为振幅调制（Amplitude Modulation, AM），简称为调幅，相应的已调波信号称为调幅波信号；如果受控的参数是高频振荡的频率或相位，则这种调制称为频率调制（Frequency Modulation, FM）或相位调制（Phase Modulation, PM），简称为调频或调相，并统称为调角，相应的已调波信号分别称为调频波信号或调相波信号，也统称为调角波信号。

- 调幅：调制信号控制高频振荡的振幅。
- 调频：调制信号控制高频振荡的频率。
- 调相：调制信号控制高频振荡的相位。

这三种调制方式的波形示意图如图 1.1.1 所示。

无线通信的理论基础是英国物理学家麦克斯韦提出的电磁波理论，1861 年，Maxwell 从理论上预言了电磁波的存在，1887 年，德国物理学家赫兹（Hertz）的火花放电实验证明了麦克斯韦预言的正确性。由于电磁波是横波，电磁场的磁场、电场及其行进方向三者互相垂直，振幅沿传播方向的垂直方向作周期性交变，其强度与距离的平方呈反比，电磁波本身带能量，任何位置的能量功率与振幅的平方呈正比，其传输不需要介质。电磁波频率低时，主要借由有形的导体才能传递，原因是在低频的电振荡中，磁电之间的相互变化比较缓慢，其能量几乎全部返回原电路而没有辐射出去。电磁波频率高时，既可以在自由空间内传递，也可以束缚在有形的导体内传递。在自由空间内传递的原因是在高频率的电振荡中，磁电互变甚快，能量不可能全部返回原振荡电路，于是电能、磁能随着电场与磁场的周期变化以电磁波的形式向空间传播出去，不需要介质也能向外传递能量，这就是一种辐射。举例来说，太阳与地球之间的距离非常遥远，但在户外时，我们仍然能感受到和煦阳光的光与热，这与“电磁辐射借由辐射现象传递能量”的原理一样。

所以，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的问题，即无线电通信。从 1896 年马可尼（Marconi）的无线通信实验开始，出现了无线通信技术，并逐步涉及陆地、海洋、航空、航天等固定和移动无线通信领域。现在的无线通信技术已相当成熟，并还在继续发展。

本书主要讨论用于通信电子设备中的电路，它们的一个共同特点就是利用高频信号来传递信息，电路常常工作在线性状态。尽管它们在所传递信息的形式、工作方式及设备组成等方面有很大不同，但设备中产生、接收、处理高频信号的原理电路及系统架构大都是相同的。

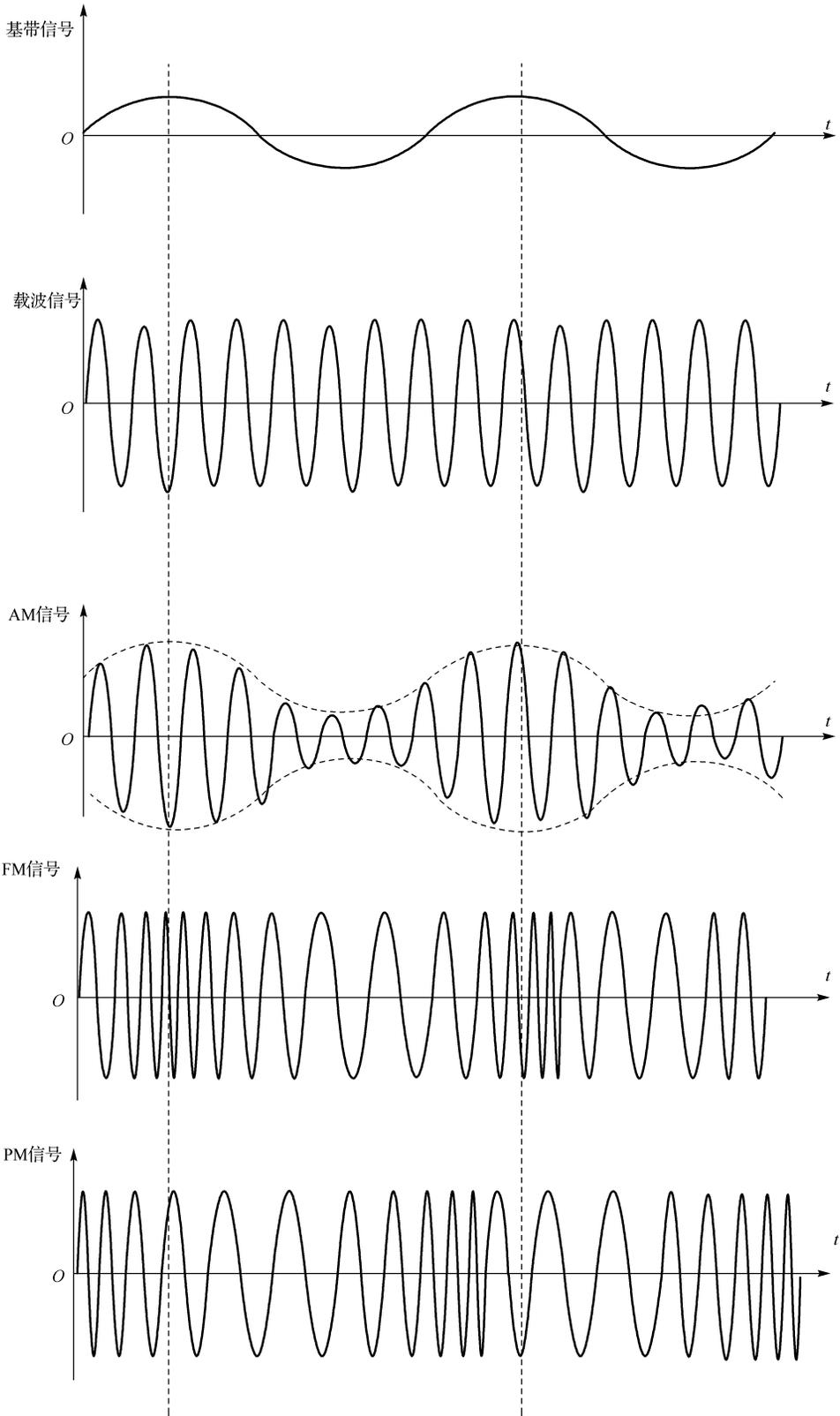


图 1.1.1 三种模拟调制波形

1.2 无线通信系统的基本组成

从广义上说,一切将信息从发送者传送到接收者的过程都可视为通信(Communication),实现这种信息传送过程的系统称为通信系统。根据信道不同,通信系统可分为有线通信和无线通信,本书重点讲述无线通信系统。

无线通信系统的典型框图如图 1.2.1 所示,它由输入变换器、发射机、信道、接收机、输出变换器等组成,各部分的主要功能简述如下。

(1) 信息源:即信息的来源,具有各种不同的形式,如音乐、语音、文字、图像等。

(2) 输入变换器:包含传声器、拾音器、电键、摄像机等,它将信息源输入的信息(待传送的信息)转换成相应的电信号,该信号一般由零频附近的直流分量和低频信号组成,称为基带信号(Baseband Signal),它可以是模拟信号,也可以是数字信号。

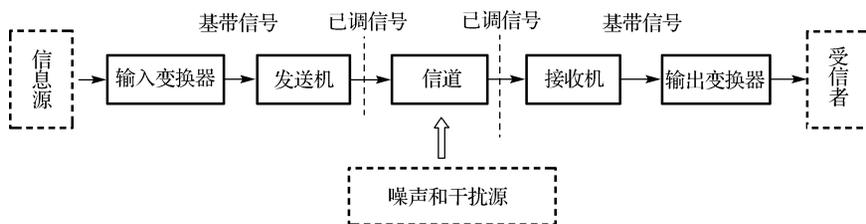


图 1.2.1 无线通信系统的典型框图

(3) 发射机:将基带信号变换为适合信道远距离传输的高频电信号(这一过程称为调制),变换后的高频电信号经过放大处理后以足够的功率送入信道,以实现信号的有效传输。变换后的信号称为已调信号。

(4) 接收机:与发射机相反,接收机完成的功能是从信道接收到的信号中还原出与发射机输入信号一致的基带信号(这一过程称为解调)。在信号传输过程中,不可避免地会有噪声和干扰的加入,这里框图中虽然将噪声和干扰源集中加在信道上,实际上,噪声和干扰是分布于各个框图电路中的,因此接收机除了包含与发送端相反作用的解调电路和放大电路外,还有滤除干扰和噪声的电路。

(5) 输出变换器:将接收设备输出的电信号还原成原始信息,如语音、图像等,供受信者利用。

(6) 噪声和干扰源:是信道中的噪声及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

(7) 信道:信道是传输带有信息的电信号的媒质。按照所用信道(传递信息的媒质)的不同,通信方式的分类如下:信道是导线(如架空明线、电缆、波导管等)的通信称为有线通信;信道是光缆的通信称为光纤通信;信道是自由空间的通信称为无线通信。

由通信系统的框图可知,通信系统中一般要进行两种变换和反变换。

第一种变换是在发送端输入变换,把要传递的非电信号变换成电信号,即基带信号,该信号一般是低频,且包括零频附近的分量。接收后输出变换器将解调后的基带信号变换为相应的信息,即将电信号恢复成原来的非电信号。

第二种变换是发射机将基带信号变换成适合在信道中有效传播的高频信号形式，并送入信道，这种变换称为调制（Modulation）。在接收端，接收机与发射机的功能相反，它从信道中选取欲接收的已调波并将其变换为基带信号，此变换称为解调（Demodulation）。

无线通信的类型很多，可以按传输手段、频率范围、用途等进行分类。按传输手段分类，有短波通信、超短波通信、微波中继通信和卫星通信等；按传送信息的类型分类，有模拟通信和数字通信；按用途分类，有地面移动通信、航空通信和舰船通信等。各种不同的通信系统，其设备的组成、复杂程度都有很大不同，但其实现无线通信的关键设备——发射机和接收机基本组成不变。下面重点介绍典型的无线通信发射机和超外差接收机框图。

1.3 无线通信发射机框图

图 1.3.1 为采用调幅方式的中波广播调幅发射机框图。

在发射机中由高频振荡器（Oscillator）产生的高频信号称为载波，载波本身并不携带要发射的信息，用携有信息的基带信号去控制高频载波的某一个参数，使该参数按照基带信号的规律而变化，从而使载波携带信息，该过程称为调制，这是发射机的核心。

根据图 1.3.1 中各方框之间所示的波形，图中各方框的功能一目了然。

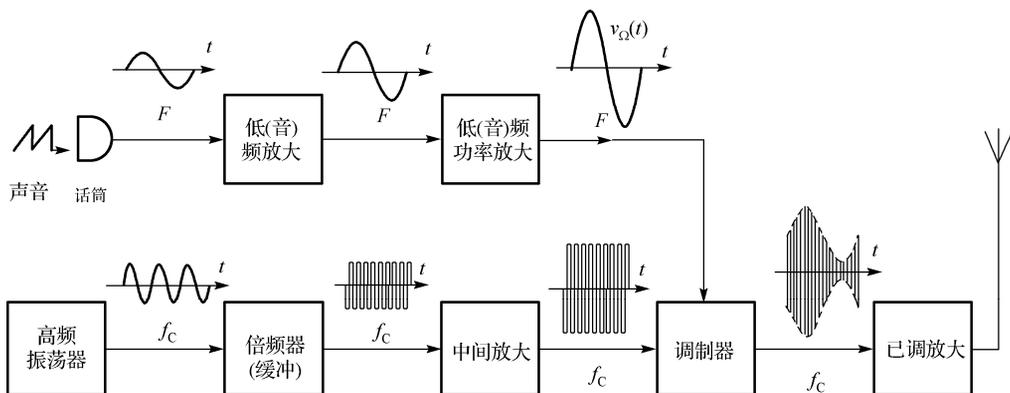


图 1.3.1 中波广播调幅发射机框图

话筒是将语音变为电信号的变换器，低频放大器是小信号放大器，用来放大话筒输出的电信号，低频功率放大器用来提供足够功率的调制信号。

振荡器用来产生频率为 f_{osc} 的高频振荡信号，其频率一般在几十 kHz 以上，有时载波频率较高，而第一级振荡器频率不宜太高，需加倍频器逐级增大载波频率，以便将振荡频率提高到所需的载频频率。另外为了提高频率稳定度，需在它后面加缓冲级，以削弱后级对振荡器的影响。中间放大器由多级带有谐振系统的谐振放大器组成，用来放大振荡器产生的振荡信号。

调制器完成调制的作用，利用高频载波的幅度来携带信息。调幅波信号经放大后加到发射天线上通过天线有效辐射出去。

发射机工作原理小结：一路产生等幅的高频载波信号，另一路产生低频调制信号，载波信号被基带信号调制（调频、调相或调幅），产生高频已调信号，最后经放大器放大，获得足够的发射功率，通过天线转换成电磁波发送到空间。

1.4 无线通信接收机框图

1.4.1 简单收音机（接收机）框图

如图 1.4.1 所示，简单收音机的电路框图包含以下几部分。其中，天线的作用是将接收到的电磁波转换为已调波信号。

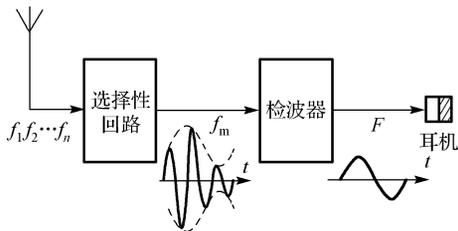


图 1.4.1 简单收音机（接收机）框图

选择性回路的作用：对需要的频率信号放大，将不需要的频率信号滤除。

检波器的作用：调制的逆过程，将已调波电压变换为原来的音频电压（基带信号）。

耳机的作用：实现电-声转换。

1.4.2 实际收音机（超外差接收机）框图

如图 1.4.2 所示，实际收音机比较复杂，采用超外差接收机，原因如下。

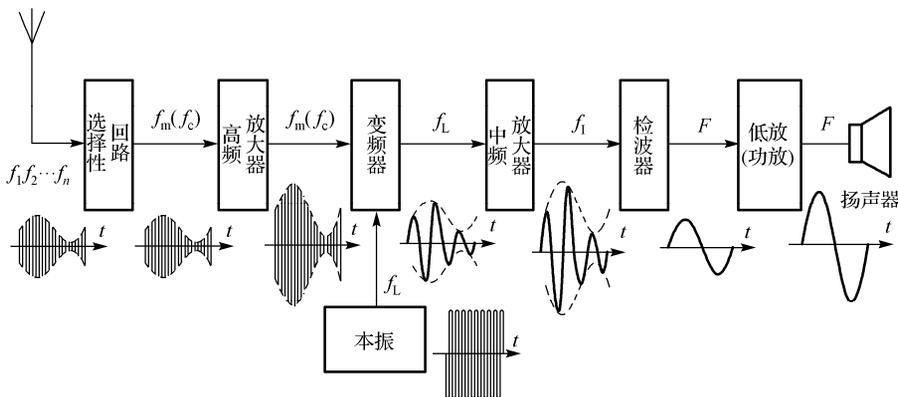


图 1.4.2 实际收音机（超外差接收机）框图

一是天线接收的高频无线电信号非常弱，只有几十 μV 至几 mV ，所以应加高频放大器。

二是各电台的载波不同，用同一接收机接收不同电台的信号时，兼顾高低频段放大倍数的调谐困难（当频率范围较广时，放大器的放大倍数不太一致），所以应加混频器（有时也称变频器）。将接收到的不同载频的电信号转变成为固定的中频信号，即所谓的外差作用。

三是检波器需要较高的推动电压（约 500mV ），所以应加中频放大器。

四是检波器输出只有几十 mV ，而推动扬声器需要大功率，因此应加低频放大器（低频功率放大器）。

超外差接收机工作原理小结：天线上感应的信号由选择性回路选出中心频率为 f_c 的已调信号，经高频放大器放大后，与本地振荡产生的频率为 f_L 的本振信号进行混频。变频器（混频器）产生的中频已调信号经中频放大器放大后进入检波器，从中频已调信号中恢复出能反映所传送信息的调制信号，实现解调功能。低频放大器放大调制信号，并经扬声器将基带调制信号转换成声音。

变频器（混频器）是超外差接收机的核心，其作用是将载波频率变化的高频已调信号（载波频率一般用 f_c 表示）不失真地变换为载波频率为固定频率的中频信号（中频信号频率一般用 f_i 表示，本地振荡器频率用 f_L 表示），中频信号频率一般为差频频率（ $f_i=f_L-f_c$ ），少部分场合为和频频率（ $f_i=f_L+f_c$ ）。调幅广播接收机的固定中频 f_i 为 465kHz。其中 f_c 随接收信号的不同而不同，本地振荡器频率 $f_L=f_i+f_c$ 是可调的，设计电路时要求与 f_c 同步变化，以保证 f_i 是固定值。

超外差接收机的主要特点是加了变频电路，并由频率固定的中频放大器来完成对后续接收信号的选择和放大。当接收信号频率改变时，只要相应地改变本地振荡信号频率，即可使中频放大器的输入频率不变，电路目的是兼顾高、低频段的放大特性并降低成本。

应该指出，实际的通信设备通常比上面所画框图复杂得多。况且还可采用调频等其他方式的无线通信，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的组成方框，区别在于调制和解调的方式不同。例如，采用调频方式的通信系统中，调制器称为频率调制器，解调器称为鉴频器（或频率检波器）。再如，在宽频段工作的电台中，发射机的振荡器和接收机的本地振荡器就可能由更复杂的组件——频率合成器来代替，它可能产生多个可供选择的、频率稳定的信号。

1.5 无线电信号的频谱及传播特性

1.5.1 无线电信号的频谱

任何信号都具有一定的频率或波长。无线电波只是一种波长比较长的电磁波，电磁波频谱（频段和波段图）如图 1.5.1 所示。

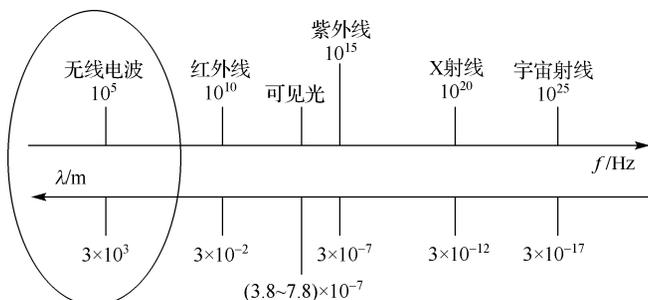


图 1.5.1 电磁波频谱

无线电波的频率范围为 10kHz~1000GHz；根据波长与频率公式 $c=f\lambda$ ，无线电波在空间传播的速度 $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ，可知波长为 0.3mm~30km。

无线通信系统使用的频率范围很宽阔，习惯上按电磁波的频率范围划分为若干区段，称为频段，也可以按波段进行划分，如图 1.5.2 所示。电磁波的波长（或频率）范围不同，电磁波在自由空间的传播方式也不同。

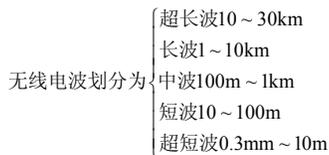


图 1.5.2 无线电波波谱

一般电视信号传输占用 48.5~951.25MHz (38MHz) (CH 间隔 8MHz);

收音机信号传输分三种方式:

(1) 调频收音机: 88~108MHz (10.7MHz) (CH 间隔 0.1MHz);

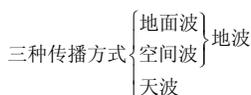
(2) 调幅收音机: 530~1600kHz (465kHz) (CH 间隔 9kHz);

(3) 短波收音机: 1.6~30MHz, 世界上许多国家利用短波频率来进行世界范围的广播传输。

一般手机无线通信占用的频率范围为: 800MHz/900MHz/1800MHz/1900MHz/2300MHz/2500MHz/2600MHz。

1.5.2 无线电信号的传播特性

和光波一样, 无线电波传输也具有直射、反射、折射等现象, 它的传播方式有三种。



无线电波的传播方式主要有: 地面波、空间波 (视距传播)、天波 (电离层传播) 三种, 图 1.5.3 所示为这几种传播方式的示意图。

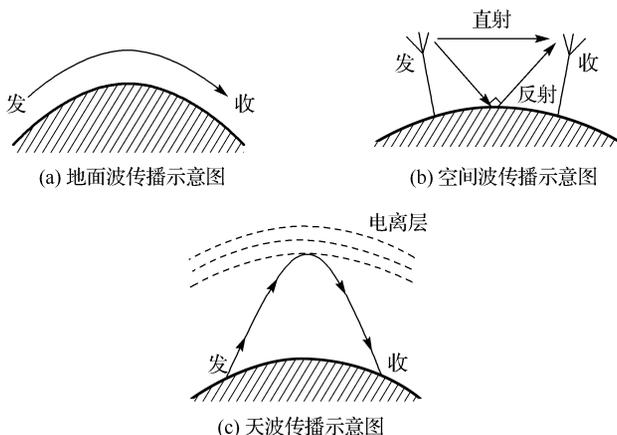


图 1.5.3 三种传播方式示意图

地面波、天波、空间波特点分析如下。

地面波沿地球弯曲表面传播, 适用于波长为 200m 以上的中、长波。地面传播的优点是地面的电特性不会在短时间有大的变化, 所以地面波的传播较稳定。但由于大地表面是导体, 当电磁波在其表面传播时, 一部分能量将被损耗掉, 且频率越高, 趋肤效应越强, 损耗越大, 故频率更高的电磁波不宜沿地面传播, 而主要靠电离层。

天波利用电离层的折射与反射, 使电磁波到达电离层后, 一部分能量被吸收, 一部分被

反射、折射到地面。电离层的特性，如电离层的高度、离子浓度等与太阳、白天和气候有关，所以，这种通信稳定性较差。当频率升高时，电磁波被电离层吸收的能量增大，当频率升高超过一定值时，电磁波将会穿过电离层，不再返回地面。所以天波适用于波长为 10~200m 的短波。

对于频率更高的电磁波 ($\lambda \leq 10\text{m}$)，不适用地面波传播，也不适用电离层传播，需用空间波形式传播。空间波沿空间直线传播，即利用直射和反射实现电磁波的传播，它只限于较短距离有效，所以需要中继站层层中转。通常，50m 高的天线通信距离约 50km。

从以上简述的三种传播方式来看，低频信号（长波）适宜于用地面波传播，较高频率信号（短波）适宜于用天波传播，超高频信号则一般利用空间波传播，由于地球表面是个曲面，天线的高度将影响传播的距离，为了覆盖更多通信终端，通信站要建在高处且信号要层层中转（建立足够的中继站），目前常用的卫星通信是用卫星作为转发器来增加传输距离的。

不同的波段通常有最适宜的传播方式，而传播方式又决定了传播性能，最终导致应用不同，表 1.5.1 列出了三种传播方式的特点与应用。

表 1.5.1 三种传播方式的特点与应用

传播方式	优点	缺点	典型应用
地面波传播	受干扰小，稳定	频率上升时或有高大障碍物时衰减大，传播距离不远	低中频：调幅收音机（中长波）、海洋通信
天波传播	传播距离远	受电离层干扰	中高频：短波广播、军事通信
空间波传播	信号好	会中断，需要中转	高频、超高频：电视、手机通信（超短波通信）

表 1.5.2 列出了无线电波的波段（频段）划分、主要传播方式和用途，其中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。

表 1.5.2 无线电波的波段（频段）划分、主要传播方式和用途

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途
超长波波段	104~108m	3~30kHz	VLF（甚低频）	地波；音频、电话等
长波波段	1000~10000m	30~300kHz	LF（低频）	地波；远距离通信
中波波段	100~1000m	300~3000kHz	MF（中频）	地波、天波；广播、通信、导航
短波波段	10~100m	3~30MHz	HF（高频）	地波、天波；短波广播、移动电话
超短波波段	1~10m	30~300MHz	VHF（甚高频）	视距传播、对流层散射；通信、电视广播、调频广播、雷达
分米波波段	10~100cm	300~3000MHz	UHF（超高频）	视距传播、对流层散射；中继通信、卫星通信、雷达、电视广播、移动通信
厘米波波段	1~10cm	3000~30000MHz	SHF（特高频）	视距传播；中继通信、卫星通信、雷达
毫米波波段	1~10mm	30~300GHz	EHF（极高频）	视距传播；微波通信、雷达、射电天文学

1.6 本书主要内容

由上面的分析可以总结出无线通信系统的基本组成部分如下。

- (1) 高频振荡器——产生高频信号；
- (2) 放大器（含选频）——放大需要频率的高频信号，包含小信号放大和功率放大；
- (3) 混频或变频——将已调信号变为固定频率的中频信号；
- (4) 调制——便于远距离有效发射信号；

(5) 解调——将高频已调信号变换回低频的基带信号。

其中，混频、调制和解调是本课程所讨论的重点。另外，包括自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制（锁相环）在内的反馈控制电路也是通信电子线路所研究的重要对象，因为这是通信系统中必不可少的辅助部分。这些基本单元电路的组成、原理及有关技术问题，就是本书研究的主要内容。

上述单元电路按其功能也可以归纳为放大、振荡和频率变换电路。

需要强调的是，通信电子线路一般工作频率较高，而且电路复杂，在理论分析时往往是在忽略一些实际问题的情况下进行一定的归纳和抽象，有许多实际问题需要通过实践环节进行学习理解。同时通信电子线路的调试技术要比低频模拟电子线路复杂得多，因此加强实践训练是十分重要的。

思考题与习题

- 1.1 无线通信为什么要进行调制？模拟调制共有几种调制和解调的方式？
- 1.2 无线通信为什么要用载波信号？“射频”信号一般指的是什么？
- 1.3 在无线通信系统中，为了实现以无线电形式传输信号，对于原始信息要进行何种形式的变换？每种变换的目的是什么？
- 1.4 画出无线通信系统的框图，并简述各部分的功用。
- 1.5 无线电信号的频段或波段是如何划分的（写出低频、中频和高频三个频段大概范围）？按三个频段写出对应的传播方式和传播特点。
- 1.6 简述无线通信系统中 5 种信号概念——原始信号，基带信号，载波信号，已调波信号（射频信号），中频信号。
- 1.7 画出无线电发送设备的原理框图，说明各部分的作用。
- 1.8 画出超外差式调幅收音机电路的组成框图、对应波形示意图，并简单分析与直接式接收机的区别。
- 1.9 我国常用民用频段知识（收音机、电视机、手机等）。