

第1章

绪论

本书主要讨论应用于各种电子系统和电子设备的高频电子线路。

通信系统尤其是无线通信系统已广泛应用于国民经济、国防建设和人们日常生活的各个领域。通信系统是用以完成信息传输过程的技术系统的总称。通信的任务就是传递各种信息，包括语音、图像、数据等。通信中传递的消息的类型很多，传递消息的方法也很多。现代通信大多以电或光信号的形式出现，因此通常被称为电信系统。

现代通信系统分为有线通信系统和无线通信系统，有线通信系统利用导引媒体中的传输机理来实现通信，有线通信实现了地理距离的通信；无线通信系统主要借助电磁波在自由空间的传播实现通信，无线通信实现了地球距离甚至是星球距离的通信。无线通信延伸了人类的通信距离，回顾百年来现代通信的发展历史，从有线通信到无线通信，反映了人类通信需求从受束缚向自由方向前进的必然趋势。由于人们对通信的容量要求越来越高，对通信的业务要求越来越多样化，因此通信系统正迅速向着宽带化、无线化方向发展。

无线通信系统的一个重要特点就是利用高频无线电信号来传递消息。传输电信号的媒质可以是有线的，也可以是无线的，而以无线的形式最能体现高频电路的应用。高频电路是在高频段范围内实现特定电功能的电路，高频电子线路是无线通信系统的基础，是无线通信设备的重要组成部分。尽管各种无线通信系统在所传递消息的形式、工作方式、设备体制组成等方面有很大差异，但设备中产生、接收和检测高频信号的基本电路都是相同的。本书将主要结合无线通信来讨论高频电路的线路组成、工作原理和分析、设计、仿真方法。这不仅有利于明确学习基本电路的目的和加强对有关设备及系统的概念，而且对于其他通信系统也有典型意义。随着科学技术的发展，以及人类对通信领域越来越深刻的研究，高频电子线路知识已成为无线通信领域中的重要组成部分。

本书主要内容：

- 高频电子线路的典型应用是无线通信系统。
- 无线通信系统由发射设备、接收设备和传输媒介三部分组成。
- 无线电信号的发射与接收的关键是调制与解调。
- 高放、混频、本振、调制、解调等相关知识是本书要解决的问题。
- 了解无线信号所具有的基本特点是必备的基本知识。

本章主要内容：

- 无线通信系统的基本工作原理（通信系统模型）。
- 发射设备的基本原理和组成（调制）。

- 接收设备的基本原理和组成（解调）。
- 无线电波的基本特点。

1.1 无线通信系统的概念

三个里程碑：

- 1907年 Lee de forest 发明电子三极管。
- 1948年 W.Shockley 发明晶体三极管。
- 20世纪60年代集成电路、数字电路出现。

摩尔斯码：又称摩尔斯电码，是一种时通时断的信号代码，通过不同的排列顺序来表达不同的英文字母、数字和标点符号，最早应用于等幅电报，它由美国人艾尔菲德·维尔于1835年发明。无线电通信发展过程如图1-1所示。

无线电通信发展简史

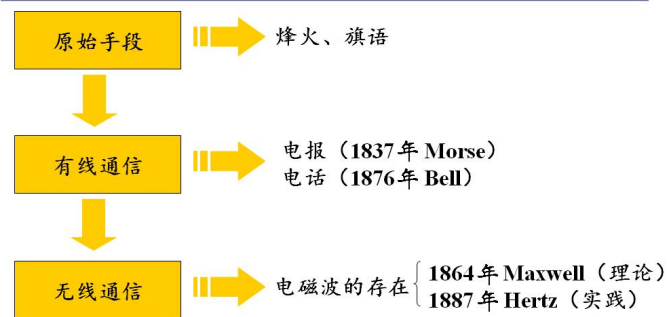


图 1-1 无线电通信发展过程

1.1.1 通信系统基本模型

通信系统模型如图1-2所示。

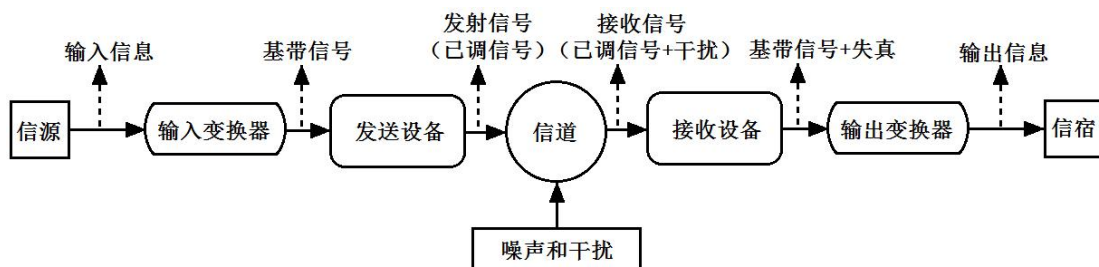


图 1-2 通信系统模型

无线通信系统一般由信源、输入变换器、发送设备、信道（传输媒介）、接收设备、输出变换器信宿组成。

(1) 信源：提供需要传送的信息。

在实际的通信电子电路中传输的是各种电信号，为此就需要将各种形式的信息转变成电信号。

常见的信号源有：话筒、摄像机、各种传感器件。

(2) 输入变换器：待传送的信息（图像、声音等）与电信号之间的互相转换。

(3) 发送设备：将基带信号变换成适合信道传输的高频信号，并由天线发射出去。

对基带信号进行变换的原因：由于要传输的信息种类多样，其对应的基带信号特性各异，这些基带信号往往并不适合信道的直接传输。

(4) 信道：信息的传送通道（自由空间）。

信号从发射到接收之间要经过传输信道，传输信道又称传输媒质。不同的传输信道有不同的传输特性，如电缆、光缆、无线电波等。

根据传输媒质的不同，通信系统可以分为以下两大类：

- 有线通信：双绞线、同轴电缆、光纤。
- 无线通信：电磁波自由空间传输。

(5) 接收设备：接收传送过来的高频信号并进行处理，从而转换成发送端的原始基带信号。

对接收设备的要求：由于信号在传输和恢复的过程中存在着干扰和失真，接收设备要尽量减少这种失真。

(6) 输出变换器：传送的电信号与还原的信息（图像、声音等）之间的互相转换。

(7) 信宿：信息的最终接受者。

将接收设备输出的电信号变换成原来形式信号的装置，如还原声音的喇叭、恢复图像的显像管等。

1.1.2 信道的传输系统

传输系统（Transmission Systems）是数据通信系统的一部分，它负责将通信系统中的源端和目的端连接起来，可能是直接连接也可能是通过一个或者多个网络系统进行连接。传输系统作为信道可连接两个终端设备构成电信系统，作为链路则可连接网络节点的交换系统构成电信网。传输系统在传输信号的过程中不可避免地要引入一些导致信号质量恶化的因素，如衰减、噪声、失真、串音、干扰、衰落等。为了不断提高传输质量、扩大容量并取得技术经济方面的优化效果，传输技术必须不断地发展与提高。传输系统的发展水平主要以传输媒质的开发和调制技术的进步为标志，以传输质量、系统容量、经济性、适应性、可靠性、可维护性等方面为衡量标准。提高工作频率来扩展绝对带宽和以压缩已调信号占用带宽来提高频谱利用率是有效扩大传输系统容量的重要手段。

传输系统按其传输媒质可分为有线传输系统和无线传输系统两类，按其传输信号性质可分为模拟信号传输系统和数字信号传输系统两类。

1. 有线传输系统

有线传输系统是以线型金属导体及其周围或包围的空间为媒质，或以线型光介质为媒体的传输系统，传输质量比较稳定，金属缆线因受外电磁场辐射交连或集肤效应制约，工作频率和可用频带受到限制，适用于模拟载波系统，可借助缩小中继距离来提高系统容量。光纤以光

波载荷信号，频率高、可用频带宽。有线传输介质主要有：双绞线（如图 1-3 所示）、同轴电缆（如图 1-4 所示）、光纤（如图 1-5 所示）。

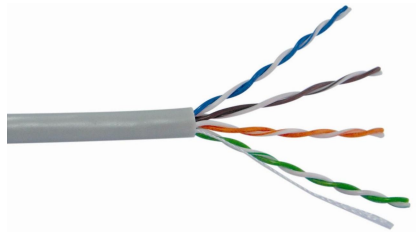


图 1-3 双绞线

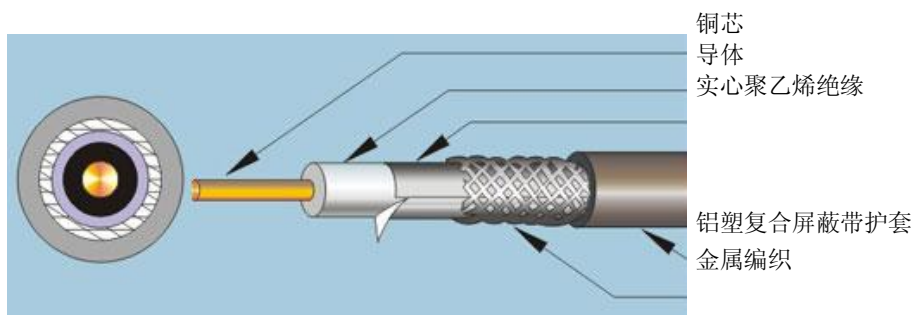


图 1-4 同轴电缆

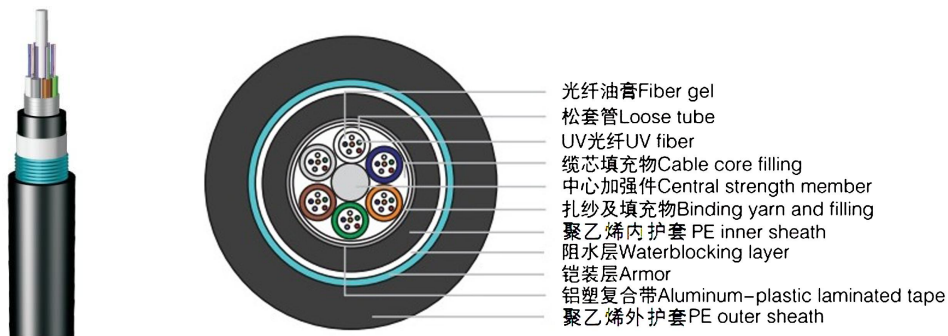


图 1-5 光纤

(1) 双绞线特性。

物理特性：由两根互相绝缘的铜导线（线芯一般为 1mm）并排放在一起，然后用规定的方法以螺旋状的形式绞合起来就构成了双绞线。不同标准的双绞线绞合密度不一样，越采用新标准的双绞线绞合密度越高。

传输特性：双绞线既可以用于传输模拟信号，也可以用于传输数字信号。例如早期的电话系统和目前的电话系统中的用户环路部分都是采用双绞线进行声音的模拟信号传输，而电话系统中的 T1 线路是采用双绞线传输数字信号，总的数据传输速率可达 1.544Mb/s。

连通性：常用于点到点连接，也可用于多点连接。

地理范围：双绞线可以很容易地在 15 公里或更大范围内提供数据传输。例如在 100kb/s 速率下传输距离可达 1km。但是在 10Mb/s 或 100Mb/s 速率下的 10BASE-T 和 100BASE-T 局

域网中，传输距离不能超过 100m。

抗干扰性：在低频传输时抗干扰性高于同轴电缆，而在 10kHz~100kHz 时则低于同轴电缆。

价格：在双绞线、同轴电缆和光纤三种有线介质中，双绞线的价格最便宜。

(2) 同轴电缆特性。

物理特性：同轴电缆也像双绞线一样由一对导体组成，但它们是按“同轴”形式构成线对。最里层是内芯，一般是铜制的，向外依次为绝缘层、屏蔽层，最外层是起保护作用的塑料外套，内芯和屏蔽层构成一对导体。同轴电缆分为基带同轴电缆和宽带同轴电缆两类。

- 基带同轴电缆：阻抗为 50Ω ，采用基带传输，即采用数字信号进行传输，用于构建 LAN。常用的基带同轴电缆又分为粗缆（RG-8 或 RG-11）和细缆（RG-58）两种，都用于直接传输数字信号。
- 宽带同轴电缆：阻抗为 75Ω （RG-59），采用宽带传输，即采用模拟信号进行传输，用于构建有线电视网。

传输特性：基带同轴电缆用于传输数字信号，采用曼彻斯特编码，速率最高可达 10Mb/s；宽带同轴电缆既可以传输模拟信号，又可以传输数字信号。

连通性：可用于点到点连接和多点连接。

地理范围：典型基带同轴电缆的最大距离限制在几 km 内，宽带同轴电缆可达十几 km。但是在 10BASE5 粗缆以太网中，传输距离最大为 500m；在 10BASE2 细缆以太网中，传输距离最大为 185m。

抗干扰性：抗干扰性通常高于双绞线。

价格：高于双绞线，低于光纤。

(3) 光纤特性。

物理特性：数据在玻璃纤维中通过光信号进行传输。光纤可分为单模光纤和多模光纤。

- 多模光纤：允许许多条不同角度入射的光线在一条光纤中传输，即有多条光路。在无中继条件下，传播距离可达几 km，采用 LED 作为光源。
- 单模光纤：光纤直径与光波波长相等，只允许一条光线在一条光纤中直线传输，即只有一条光路。在无中继条件下，传播距离可达几十 km，采用激光作为光源。单模光纤容量大于多模光纤，价格也高于多模光纤。

传输特性：每一根光纤任何时候只能单向传输数字信号。因此，要实现双向通信就必须成对使用。

连通性：用于点到点连接。

地理范围：在 6km~8km 的距离内不用中继器。

抗干扰性：不受外界的电磁干扰或噪声影响。

价格：在双绞线、同轴电缆和光纤三种有线介质中，光纤的价格最高。

光纤与铜缆相比，优点是高带宽、衰减小、不受电磁干扰、细且重量轻、安全性好；缺点是单向传输且价格比较昂贵。

2. 无线传输系统

无线传输系统是以自由空间、电离层或对流层不均匀气团为媒质的传输系统，传输质量不稳定，易受干扰，必须采取抗衰落措施，并进行频率管理和系统间协调。该系统无需实体传输媒质，成本低、建设快、调度灵活，而且可进行定向或全向广播通信。卫星通信系统采用 C

频段载频时不受电离层影响,在非暴雨区可基本视为传输质量稳定的恒参信道。无线传输系统的发展过程系由小容量的短波、特高频接力通信,以至大容量的微波接力通信和卫星通信系统等。

1.2 发送设备与接收设备构成

无线通信系统的构成包括信源、输入变换器、发送设备、信道、接收设备、输出变换器、信宿。其中发送设备和接收设备为无线通信系统的主要设备。

1.2.1 发送设备的基本原理

发送设备的主要作用是将要传送的信息经过处理变换为可以无线发射的高频信号,从而实现无线传输,也就是“调制”。

发送设备包括三个组成部分:高频部分、低频部分和电源部分。

高频部分通常由主振、缓冲、倍频、高频放大、调制与高频功放组成。主振级的作用是产生频率稳定的载频信号,缓冲级是为减弱后级对主振级的影响而设置的。有时为了将主振级的频率提高到所需的数值,缓冲级后要加一级或若干级倍频器。倍频级后加若干级高频放大器,以逐步提高输出信号的功率。调制级将基带信号变换成适合信道传输的频带信号。最后经高频功率放大器进行放大,使输出信号的功率达到额定的发射功率,再经天线辐射出去。

低频部分包括换能器、低频放大及低频功放。换能器把非电量信息变换为基带低频电信号,通过低频放大级逐级放大,使低频功放输出能对高频载频信号进行调制所需的信号功率。

说明:信号的“加载”——调制。

调制:把待传送信号“装载”到高频振荡信号上的过程。

三种信号:调制信号、载波信号和已调信号。

调制的三种方式:调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)。

典型发送设备调幅式无线电广播发射机的组成框图如图 1-6 所示。

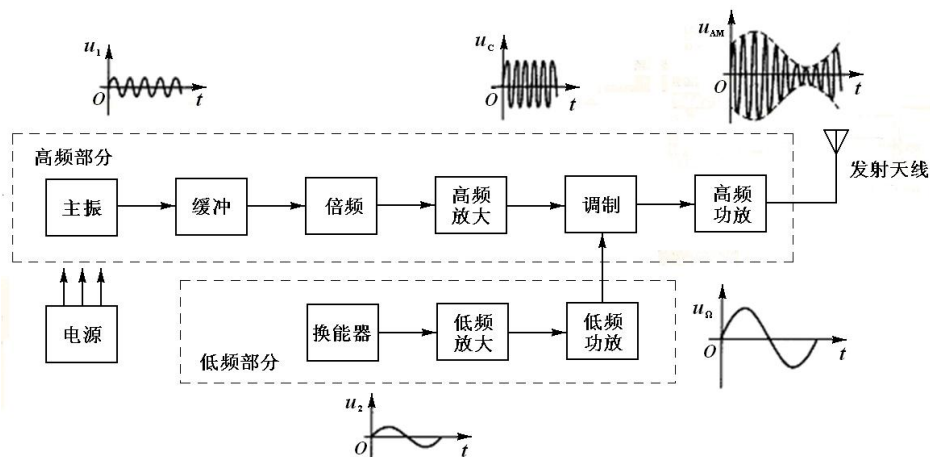


图 1-6 调幅式无线电广播发射机组成框图

1.2.2 发送设备的主要技术指标

(1) 频率范围。

发射机的工作频率即发射机的射频载波频率。具体数值由发射机的用途决定，一般是指一个能够正常工作的频率范围或频段，有以下两方面的要求：

- 要求在波段内的任何一个频率或指定频率上都能工作。
- 要求在整个波段内或所有指定频率上的电性能基本稳定。

(2) 频率的准确度及稳定性。

发射频率的准确度及稳定性基本上是由载波基准频率振荡器决定的。不同应用的无线收发系统有不同的要求。发射频率的准确度和稳定性可以用 Hz 或者频率的百分比来表示。

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。频率准确度越高，通信链路的建立就越快。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。频率稳定度高，一旦建立通信，接收机就不致因频率变化而需实时微调，故可实现不微调的通信，从而提高了通信的可靠性。调幅发射机的频率稳定度一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 数量级，单边带发射机的频率稳定度一般在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 数量级。

(3) 载波的频率捷变。

载波的频率捷变是指载波频率快速改变的能力。对于多频道发射，这是一个重要的技术性能指标。通常利用频率合成器来设置和改变发射频率，在整个发射系统中还需要利用宽带技术以保证频率的改变和调谐之间的同步。

(4) 发射频谱纯度。

频谱纯度指信号源输出的实际频谱与理想频谱的逼近程度。发射机除了产生载波信号及所需要的边带信号外，同时还会产生一些寄生信号。寄生信号通常是载波频率的谐波成分。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。在发射输出中除指定的发射载波频率外，其他谐波频率成分都需要通过滤波消除，以避免干扰。

(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。发射机采用不同的调制方式，对应的发射输出功率的测量方法不同。如全载波 AM（调幅）系统的发射功率是根据载波功率来确定的，调制后输出信号功率大于未调载波功率。而在抑制载波 AM 系统中，采用峰值包络功率（PEP）。FM（调频）系统是一个恒定功率系统，FM 发射通道的额定功率为输出信号的总功率。

对输出功率进行测试时，一定要注意发射通道的占空系数（反映导通和关断时间之间的关系），如许多双向式语音通信系统的发射通道并不是在最大功率下连续工作的，但广播发射机是连续工作的，而且是在最大功率下一天 24 小时不停地运行。

(6) 功率与效率。

功率与效率是发射机的一个非常重要的性能指标。

无线电通信的有效距离及可靠性取决于发射机的发射功率大小。通常发射机输出功率有

三种表示方式,即峰包功率、平均功率、载波功率。峰包功率(PEP)是指正常工作时在调制包络最高点的一个射频周期内馈送到天线上的平均功率,平均功率是指在足够长的时间内馈送到天线上的平均功率,载波功率是指未调制载波射频一周内的平均功率。这几种功率适用于不同的工作种类和调制方式,例如调幅常用载波功率标定,单边带通常用峰包功率或平均功率标定,等幅报和移频报则用载波功率标定。对一部电台而言,其发射机输出功率的大小在很大程度上还受体积、重量等条件的限制。另外,在设计发射机输出功率大小时,必须考虑天线增益、接收机灵敏度等因素。天线增益越高,接收灵敏度越高,接收机保证有相同输出信噪比的情况下所需的发射功率越小。

发射机的总效率(功率效率)是指发射机传送到天线、馈线上的功率与整机输入功率的比值。在大功率发射机或小型移动式发射机中,提高发射机的效率可以减小电源消耗,减小体积,经济意义重大。整机效率主要由末级功放的效率决定,末级一般采用丙类或丁类放大器,用来提高整机效率。固定发射机的效率在5%~30%之间,移动发射机的效率在百分之几到百分之十几之间。

(7) 调制系统的保真度。

由发射机所引起的任何失真(如调制失真、谐波失真和交调失真等)都有可能始终对信号的还原造成不良影响,因为系统的接收机是不可能完全消除这些失真的。

1.2.3 接收设备的基本原理

无线通信的接收过程正好和发射过程相反。在接收端,接收天线将收到的电磁波转换为已调波电流,然后从这些已调波电流中选择出所需的信号进行放大和解调。为了提高灵敏度和选择性,无线通信系统的接收设备目前都采用超外差式接收机。

接收设备的主要作用是从高频信号中还原出要传送的信息,也就是“解调”。

超外差式接收机从天线接收到微弱的高频调幅信号,经输入回路选频后,通过高频放大器放大,送入混频器与本机振荡器所产生的等幅高频信号进行混频,在其输出端得到的波形包络形状与输入的高频信号的波形包络形状相同,但频率由原来的高频变化为中频调幅信号,经中频放大后送到检波器,检出原调制的低频信号,然后再经过低频放大,最后从扬声器还原成原来的声音信号。

混频器的作用是将接收到的不同频率的载波信号变换为固定频率的中频信号。混频器的原理是:用本地振荡器产生的正弦波振荡信号 $u_L(t)$ (其频率为 f_L) 与接收到的有用信号 $u_C(t)$ (其频率为 f_C) 在混频器中混频,得到中频信号 $u_I(t)$ (其频率为 f_I)。通常选取 $f_I = f_L - f_C$ 。这种作用就是所谓的外差作用,也就是超外差式接收机名称的由来。

说明:信号的“卸载”——解调。

解调:从高频已调波信号中“取出”调制信号的过程。

解调的三种方式:①对调幅波的解调——检波;②对调频波的解调——鉴频;③对调相波的解调——鉴相。

典型接收设备超外差调幅收音机的组成框图如图1-7所示。

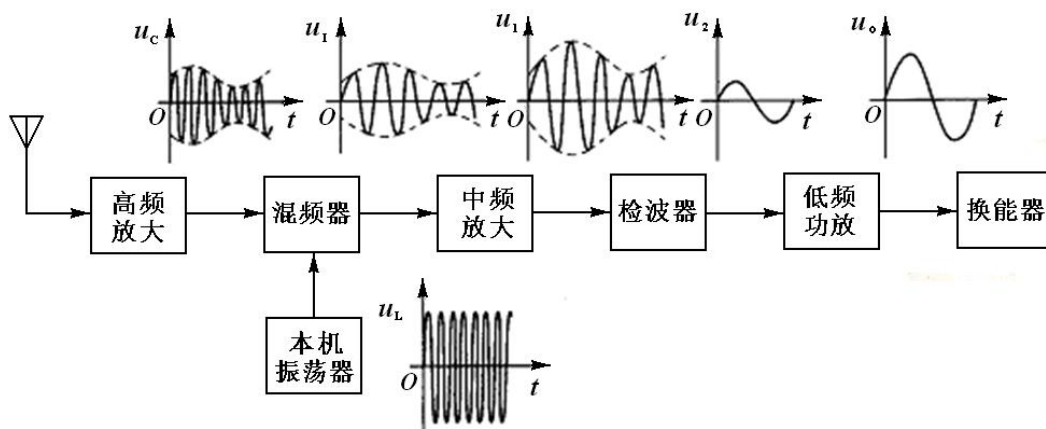


图 1-7 超外差调幅收音机组成框图

1.2.4 接收设备的主要技术指标

(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（射频）范围。当频带较宽时，鉴于调谐元器件动态范围有限以及在宽带内调谐回路阻抗变化较大、调谐不便，且难以保证度盘准确度和频率稳定度，则往往需要划分为几个子波段。

关于接收机频率范围有以下两点要求：

- 接收机能调谐到给定频率范围内的任何一个频率点。
- 在调谐到的任何一个频率点上，接收机的主要技术指标均符合规定要求。

(2) 频率稳定度。

接收机的频率稳定度是指其本振频率的稳定程度。而度盘准确度是指接收机实际工作频率（射频）与度盘刻度相一致的程度，可理解为频率稳定度。

通常，调幅接收机的日稳定度要优于 10^{-4} ，单边带接收机的月稳定度应在 10^{-7} 数量级。

工作频率的稳定和度盘的准确度是实现不寻找、不微调通信的条件之一。为此，可采用高稳定度的频率合成器提供本振信号。

(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（单位通常为 μV ）。灵敏度越高，接收微弱信号的能力就越强。不过，接收机工作种类或工作频率不同，灵敏度也不相同。

接收机应具有选择信号而抑制干扰的能力，因为提高接收机增益虽有利于提高灵敏度，但有用信号和各种噪声均可在接收机天线上生成感应电动势，加上接收机内部噪声，若将其一并放大输出，当接收信号很微弱时，噪声就有可能淹没有用的信号。

对超外差接收机而言，最常见的干扰既有位于信号频率附近的邻近干扰，又有位于中频附近的中频干扰，还有其频率比信号频率高（或低）两倍中频的镜像干扰等。

(4) 选择性。

选择性是指接收机从有用信号和与其相似的各种频率不同的干扰信号中鉴别出有用信号

的能力。相似性是针对干扰与信号的调制规律（如同为等幅波等）而言的。

通常，接收机的选择性由谐振回路及滤波器件实现。干扰不同，选择性的表示方法（谐振曲线、抗拒比和矩形系数等）也不同。其中，谐振曲线是最基本和最常用的表示方法。

谐振曲线可较好地说明对邻近干扰的抑制情况。但谐振曲线过于尖锐，往往会使通频带太窄而造成信号失真，故不能离开通频带来讨论选择性。

(5) 保真度。

保真度是指接收机输出信号波形与原始信号（即射频信号携带的调制信号）相似的程度，与其相对的概念是失真度。保真度越高或失真度越小，接收机输出信号就越自然逼真。

信号失真可分为由非线性器件引起的非线性失真和由线性器件对于不同频率有不同响应而引起的线性失真（即频率失真）两类，线性失真又可分为振幅—频率失真（简称振幅失真）和相位—频率失真（简称相位失真）。

接收图像信号时还需要考虑相位失真。在语音传输时，一般只考虑振幅失真，要求非线性失真系数 $<10\%$ ，在 $300\sim 3000\text{Hz}$ 频率范围内的振幅频率特性不平均度 $<10\text{dB}$ 。

(6) 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，接收机不应产生或接近寄生振荡；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。

通常，接收机对工作稳定性的要求较高，如某型单边带接收机要求在温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $65\%\pm 15\%$ 甚至是 $95\%\pm 3\%$ 的环境下才能正常工作。

1.3 电磁波频段划分

1.3.1 无线电波的概念

无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的射频频段的电磁波。

无线电波是一种电磁波，其传播速度与光速相同，在真空中约为 300000km/s ，且有 $\lambda=c/f$ 。电磁波波谱如图 1-8 所示。

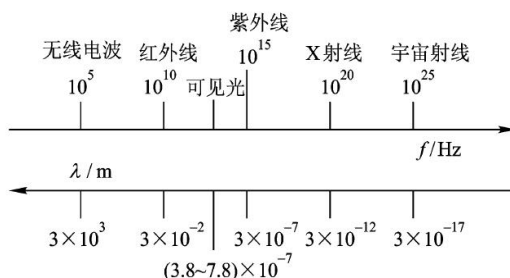


图 1-8 电磁波波谱

波长大于 1m 频率小于 300MHz 的电磁波是无线电波。无线电波是一种能量的传播形式，电场和磁场在空间中是相互垂直的，并都垂直于传播方向。

无线电技术是通过无线电波传播信号的技术。在天文学上，无线电波被称为射电波，简称

射电。无线电技术的原理在于，导体中电流强弱的改变会产生无线电波。利用这一现象，通过调制可将信息加载于无线电波之上。当电波通过空间传播到达受信端，电波引起的电磁场变化又会在导体中产生电流。通过解调将信息从电流变化中提取出来，就达到了信息传递的目的。

1.3.2 无线电波的特性

(1) 时间特性：反映信号随时间变化的快慢。无线电信号可以表示为电压或电流的时间函数，通常用时域波形或数学表达式来描述，如比较简单的信号（正弦波、周期性方波等），用时间特性表示很方便。

(2) 频谱特性：对于较为复杂的信号（话音信号、图像信号等），用频谱法表示较为方便，因为任何信号都可分解为许多不同频率、不同幅度的正弦信号之和。周期性信号，用离散谱表示；非周期性信号，用连续谱表示。

(3) 传播特性：指无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。无线电通信的传输媒质主要是自由空间。由于地球表面与空间层的环境条件不同，因此对不同频率的电磁波的传播特性也不同。不同的信道有不同的传输特性，相同的信道对不同频率的信号传播特性也是不同的。

1.3.3 无线电波频段划分

无线电波是指频率在 3000GHz 以下的，可以不通过导线、人工波导等载体在自由空间辐射的电磁波。

空间无线电波所占用的频率统称为无线电频谱。它是一种特殊的自然资源，是无线电技术发展的基础和前提条件，也是现代社会赖以生存的基本要素之一。

根据国际电信联盟（ITU）制定的《无线电规则》，将不同频率的电磁波划分为若干频段或波段，每个频段用于一个或多个具有相似特性的业务，如表 1-1 所示。

表 1-1 无线电波频段划分

频段名称	频率范围	波段名称	波长范围	符号	主要用途	传输媒介
极低频	3Hz~30Hz	极长波	100~10Mm	ELF		
超低频	30Hz~300Hz	超长波	10~1Mm	SLF		
特低频	0.3kHz~3kHz	特长波	1~0.1Mm	ULF	音频	架空明线（长波）
甚低频	3kHz~30kHz	甚长波	100~10km	VLF	音频电话、长距离导航、时标	架空明线、对称电缆、地球表层（长波）
低频	30kHz~300kHz	长波	10~1km	LF	船舶通信、信标、导航	对称电缆、架空明线、地球表层（长波）
中频	0.3MHz~3MHz	中波	1000~100m	MF	广播、船舶通信、飞行通信	同轴电缆、地球表层（中波）
高频	3MHz~30MHz	短波	100~10m	HF	短波广播、军事通信	同轴电缆、电离表层（短波）

续表

频段名称	频率范围	波段名称	波长范围	符号	主要用途	传输媒介
甚高频	30MHz~300MHz	米波	10~1m	VHF	电视、调频广播、雷达、导航	同轴电缆、空间直线传播(超短波)
特高频	0.3GHz~3GHz	分米波	微波 100~10cm 10~1cm 10~1mm 1~0.1mm	UHF	电视、雷达、移动通信	波导、空间直线传播(分米波)
超高频	3GHz~30GHz	厘米波		SHF	雷达、中继、卫星通信	
极高频	30GHz~300GHz	毫米波		EHF	射电天文、卫星通信、雷达	
至高频	300GHz~3000GHz	丝米波				

1.4 电磁波的传播特性

1.4.1 无线电波的传播方式

无线电波的传播方式包括地波传播、天波传播、空间波传播、对流层散射传播、外球层传播，如图 1-9 所示。

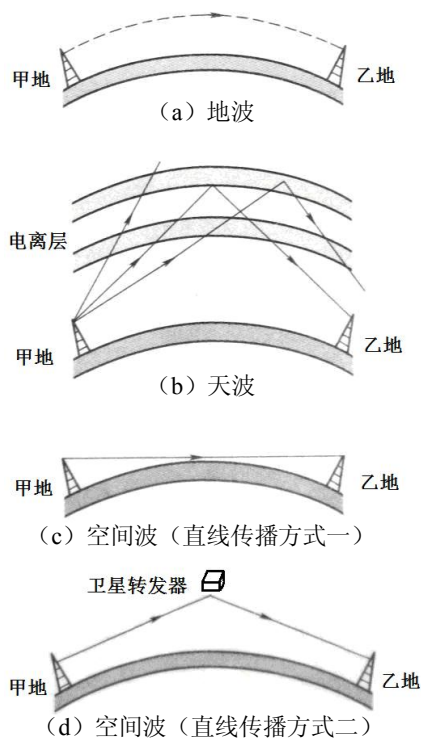


图 1-9 电磁波传播方式

1. 地波传播

1.5MHz 以下的电磁波主要沿地球表面的绕射传播,称为地波。特点是信号较为稳定,但大地不是理想导体,频率越高、传播越远,衰减越严重。地波传播通常用于近距离长波广播、中波调幅广播和电力载波通信,一般不用作远距离通信。

2. 天波传播

1.5~30MHz 的电磁波主要靠天空中电离层的折射和反射传播,称为天波。电离层是由于太阳和星际空间的辐射引起大气层电离形成的,电磁波到达电离层后,一部分能量被吸收,一部分能量被反射和折射回到地面,频率越高,被吸收的能量越小,电磁波穿入电离层越深,当频率超过一定值后,电磁波就会穿透电离层而不再返回地面。特点是传输损耗小、能以较小的功率实现远距离通信或靠地波难以实现的极短距离通信,信号不够稳定,衰落和干扰严重。

3. 空间波传播

30MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播,称为空间波。由于地球表面弯曲,空间波传播距离受限于视距范围,可高架收发天线以增大传播距离。实践证明,当收发两地所架天线高度均为 50m 时,电磁波直线传播距离为 50km。

所以微波通信采用中继方式,而卫星通信则是利用离地面几万公里的卫星作为地面信号的转发器。

4. 对流层散射传播

对流层距地面约 10km,内部既存在规则的片状或层状气流,又存在类似水流中旋涡的不规则不均匀气流,电波通过时会产生反射、折射和散射等,使一部分能量(相当弱)传播到接收端。只有超短波能利用对流层进行远距离散射传播,适用于微波中继难以实现的地区,但因其传播损耗很大需要采用大功率发信机、高灵敏度接收机和高增益天线。

5. 外球层传播

外球层(外层空间)传播是指电磁波由地面发出或返回,经低空大气层和电离层而到达地球外层空间的传播方式。外球层距地面约 900~1200km。外球层传播主要用于宇宙探测、卫星通信等。

1.4.2 无线电波的传播特点

无线电波的传播特点包括多径传播、信号衰落、多普勒频移效应、极化现象等。

1. 多径传播

无线电波传播的机理是多种多样的,发射机天线发出的无线电波通过不同的路径到达接收机,称为多径传播(如图 1-10 所示)。直射、反射、折射、绕射、散射和吸收现象使之被衰减、放慢或使传播路径和相位发生改变。

直射是指电磁波从发射天线发出,经大气或某一介质直接到达接收天线的现象。然而,电磁波不可能在无限大的空间自由传播,在传播过程中往往会遇到性质不同的各种障碍物,从而产生反射、折射、绕射和吸收现象,使之被衰减、放慢或使传播路径和相位发生改变。

反射是指当电波在传播中遇到两种不同介质的光滑界面时,如果界面尺寸比电波波长大得多时,就会产生镜面反射现象。由于大地和大气是不同的介质,所以入射波会在界面上产生反射。反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面等。

折射是指电磁波在介质分界面传播方向偏折而进入另一种介质传播，或在同类介质中由于介质本身的不均匀性，使传播方向改变的现象。电磁波在传播过程中，由于低层大气并非均匀介质，它的温度、湿度和气压都会随时间和空间而发生变化，因此会产生折射和吸收现象。

绕射是指电磁波在传播过程中绕过障碍物到达接收点的现象。绕射使得无线电信号绕地球曲线表面传播，能够传播到阻挡物后面。

散射是指在 VHF、UHF 频段的移动信道中，电波传播除了直射波和地面反射波之外，还需要考虑传播路径中各种障碍物所引起的散射波。散射波产生于粗糙表面、小物体或其他不规则物体。在实际移动通信环境中，接收信号比单独绕射和反射的信号要强，如图 1-11 所示。这是因为当电波遇到粗糙表面时，反射能量由于散布于所有方向，这就给接收机提供了额外的能量。

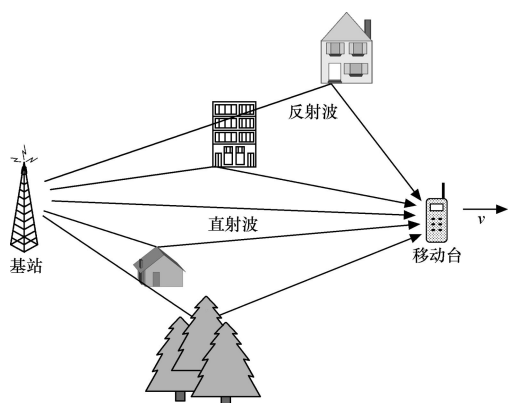


图 1-10 电波的多径传播

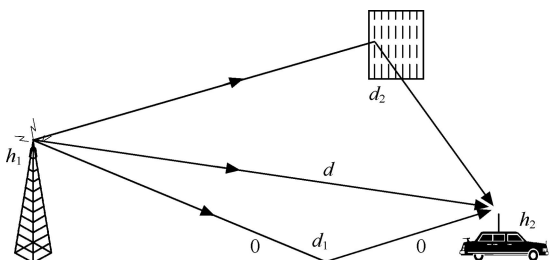


图 1-11 移动信道的传播路径

当无线电波的频率 $f > 30\text{MHz}$ 时，典型的传播路径如图 1-12 所示。

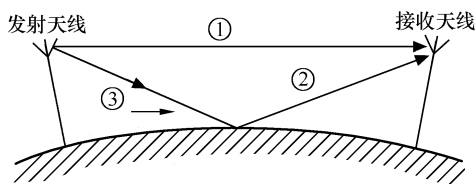


图 1-12 电磁波典型传播路径

沿路径①从发射天线直接到达接收天线的电磁波称为直射波，它是 VHF 和 UHF 频段的主要传播方式；沿路径②的电磁波经过地面反射到达接收机的电波称为地面反射波；沿路径③的电磁波沿地球表面传播的电波称为地表面波，由于地表面波的损耗随频率升高而急剧增大，传播距离迅速减小，因此在 VHF 和 UHF 频段的地表面波的传播可以忽略不计。在蜂窝移动通信系统中，电磁波遇到各种障碍物时会产生反射和散射现象，会对直射波造成干涉，即产生多径衰落现象。影响电波传播的 3 种基本传播机制是反射波、绕射波和散射波。

2. 信号衰落

当前无线通信的频率范围在甚高频和特高频之间。该频段的特点是：传播距离在视距范围内；天线短抗干扰力强；以地表面波、电离层反射波、直射波和散射波等方式传播，受地形地物影响大，导致其传输特性变化剧烈。因此，移动台接收到的电波一般是各种波的叠加，造成接收信号的电场起伏不定，最大可差 $20\sim 30\text{dB}$ ，称为衰落。

3. 多普勒频移效应

由于移动用户在不断地运动,当达到一定速度时,如超音速飞机,固定点接收到的载波频率将随运动速度 v 的不同产生不同的频移,称这种现象为多普勒效应。多普勒效应使接收点的信号场强振幅、相位随时间、地点而不断地变化。

4. 极化现象

无线电波在空间传播时,其电场矢量和磁场矢量的振幅总是维持特定方向并按一定的规律变化,这种现象称为无线电波的极化。无线电波的电场方向称为电波的极化方向,其中电场、磁场跟无线电波的传播方向是相互垂直的。

1.5 通信系统的类型

1.5.1 通信系统的分类

1. 按通信业务分类

通信系统按通信业务(即所传输的信息的物理特征)分类可分为传真通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。

2. 按基带信号的物理特征分类

通信系统按基带信号的物理特征分类分为模拟通信系统和数字通信系统。

信号在时间上是连续变化的,称为模拟信号(如电话);在时间上离散,其幅度取值也是离散的信号称为数字信号(如电报)。模拟信号通过模拟—数字变换(包括采样、量化和编码过程)也可变成数字信号。通信系统中传输的基带信号为模拟信号时,这种系统称为模拟通信系统;传输的基带信号为数字信号的通信系统称为数字通信系统。

模拟通信是指在信道上把模拟信号从信源传送到信宿的一种通信方式。由于导体中存在电阻,信号直接传输的距离不能太远,解决的方法是通过载波来传输模拟信号。载波是指被调制以传输信号的波形,通常为高频振荡的正弦波。这样,把模拟信号调制在载波上传输,则可比直接传输远得多。一般要求正弦波的频率远远高于调制信号的带宽,否则会发生混叠,使传输信号失真。模拟通信系统通常由信源、调制器、信道、解调器、信宿及噪声源组成。模拟通信的优点是直观且容易实现,但保密性差、抗干扰能力弱。由于模拟通信在信道传输的信号频谱比较窄,因此可通过多路复用使信道的利用率提高。模拟信号传输系统中,信号随时间连续变化,必须采用线性调制技术和线性传输系统,单边带调制的已调信号带宽可与原信号相同,用它构成的复用系统频谱利用率较高,适用于频带受限的金属缆线。在无线传输系统中,为克服干扰和衰落,模拟基带信号的二次调制大多采用调频方式。有时为了扩大容量,某些特大容量的模拟微波接力系统也有用调幅方式的。模拟传输系统适用于早期业务量很大的模拟电话网,缺点是接力系统的噪声及信号损伤均有积累。

数字通信是指在信道上把数字信号从信源传送到信宿的一种通信方式。它与模拟通信相比,优点为:抗干扰能力强,没有噪声积累;可以进行远距离传输并能保证质量;能适应各种通信业务要求,便于实现综合处理;传输的二进制数字信号能直接被计算机接收和处理;便于采用大规模集成电路实现,通信设备利于集成化;容易进行加密处理,安全性更容易得到保证。

数字信号传输系统中, 信号参量在等时间间隔内取 $2n$ 或 $2n+1$ 个离散值, 接收时只需取参量与各标称离散值的最小“距离”进行判决, 无需保持信号原状, 因而抗干扰及抗损伤能力强。经过中继器的信号可以逐段再生, 无噪声及损伤的积累, 信号处理可用逻辑电路来实现, 设备简单, 易于集成化, 不仅适用于电报、数据等数字信号的传输, 也适用于数字语音信号以及其他各种数字化模拟信号的传输, 从而为建立包容各种信号的综合业务数字网 (ISDN) 提供了条件。尽管二进制数字化模拟信号的频谱利用率远低于原信号, 但通过采用高效编码技术、高效调制技术和高工作频段的传输媒质仍可在一定程度上提高频谱利用率, 或直接以大带宽承纳大系统容量。数字传输系统的这些优点确定了它在传输系统发展中的特殊优越地位。

通信系统都是在有噪声的环境下工作的。设计模拟通信系统时采用最小均方差准则, 即收信端输出的信号噪声比最大。设计数字通信系统时, 采用最小错误概率准则, 即根据所采用的传输媒介和噪声的统计特性选用最佳调制体制, 设计最佳信号和最佳接收机。数字通信系统模型示意图如图 1-13 所示。

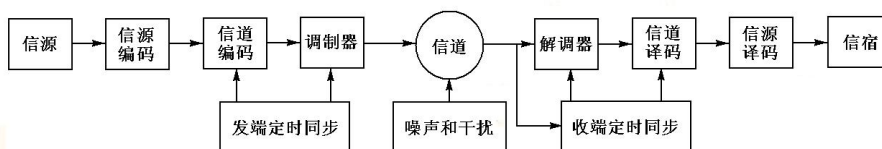


图 1-13 数字通信系统模型示意图

信源编码: 提高通信系统效率, 主要由两部分组成: 一是模/数转换器; 二是压缩编码器, 用来降低信号数码率。

信道编码: 提高通信系统的可靠性。在发送端按一定规则加入冗余码元, 使接收端能发现或纠正错码。

定时同步系统: 产生一系列定时信号, 确保收发端具有一定 (相对不变) 的时间关系。

3. 按传输媒介分类

通信系统按所用传输媒介的不同可分为两类: ①利用金属导体为传输媒介, 如常用的通信线缆等, 这种以线缆为传输媒介的通信系统称为有线通信系统; ②利用无线电波在大气、空间、水或岩、土等传输媒介中传播而进行通信, 这种通信系统称为无线通信系统。光通信系统也有“有线”和“无线”之分, 它们所用的传输媒介分别为光学纤维和大气、空间或水。

有线通信系统: 适合基带传输或频带传输。传输语音信号的电话网、传输数据信号的计算机网、传输视频信号的有线电视网是最常见的有线信道。

平衡电缆: 也称双绞线, 每对信号传输线间的距离比明线小, 而且包扎在绝缘体内。

同轴电缆: 用来构建容量较大的有线信道, 常用的有两种: 一种是外径为 4.4mm 的细同轴电缆; 另一种是外径为 9.5mm 的粗同轴电缆。

光纤信道: 是以光波为载波, 以光导纤维 (光纤) 为传输介质进行通信的通信信道。

无线通信系统: 信息主要是通过自由空间传输, 但必须通过发射机系统、发射天线系统、接收天线系统和接收机系统才能使携带信息的信号正常传输, 从而组成一条无线传输信道。

4. 按信号复用方式分类

多路复用方式即在同一传输途径上同时传输多个信息。多路复用系统可以充分利用通信信道、扩大通信容量和降低通信费用。复用方式主要有 4 种: 空分复用 (SDMA)、频分复用

(FDMA)、时分复用 (TDMA) 和码分复用 (CDMA)。

空分复用：利用不同的空间来实现多路信号的传送，例如有线情况，可利用不同的电路或电缆来区分；无线情况，可依靠天线的指向和发射信号功率的大小来区分。

频分复用：使不同的信号占据不同的频率范围。

时分复用：通过抽样或脉冲调制方法使不同的信号占据不同的时间区间。

码分复用：在同一空间、同一频段、同一时间内，用相互正交的码组携带不同的信号。

在模拟通信系统中，将划分的可用频段分配给各个信息而共用一个共同传输媒质，称为频分多路复用。在数字通信系统中，分配给每个信息一个时隙（短暂的时间段），各路依次轮流占用时隙，称为时分多路复用。完成多路复用功能的设备称为多路复用终端设备，简称终端设备。多路通信系统由末端设备、终端设备、发送设备、接收设备和传输媒介等组成。

5. 按终端设备分类

通信系统按终端设备分类分为电话（包括手机）通信、电报通信、电传通信、传真通信、计算机通信等。

6. 按通信方式分类

通信系统按通信方式分类分为单工通信、半双工通信、全双工通信三种，如图 1-14 所示。

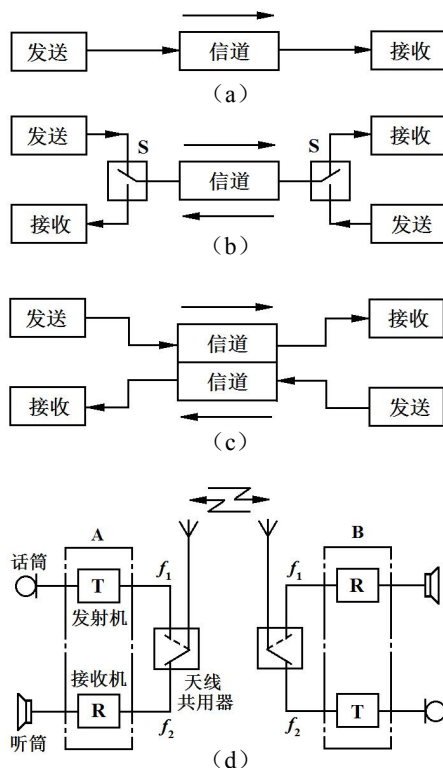


图 1-14 通信方式

数字通信设备采用时分双工制 (TDD)，A 发 B 收，B 发 A 收，采用信道切换装置即电子开关来实现。由于采用数字技术，收发切换速度极快，虽然本质属于单工通信，感觉上却像双工通信。数字手机通信采用此方式。

1.5.2 通信系统的典型应用

1. 有线系统

用于长距离电话通信的载波通信系统是按频率分割进行多路复用的通信系统。它由载波电话终端设备、增音机、传输线路和附属设备等组成。其中载波电话终端设备是把话频信号或其他群信号搬到线路频谱或将对方传输来的线路频谱加以反变换并能适应线路传输要求的设备；增音机能补偿线路传输衰耗及其变化，沿线路每隔一定距离装设一部。

2. 微波系统

是长距离大容量的无线电通信系统，因传输信号占用频带宽，一般工作于微波或超短波段。在这些波段，一般仅在视距范围内具有稳定的传输特性，因而在进行长距离通信时必须采用接力（也称中继）通信方式，即在信号由一个终端站传输到另一个终端站所经过的路由上设立若干个邻接的、转送信号的微波接力站（又称中继站），各站间的空间距离约为 20~50km。接力站又可分为中间站和分转站。微波接力通信系统的终端站所传信号在基带上可与模拟频分多路终端设备或数字时分多路终端设备相连接，前者称为模拟接力通信系统，后者称为数字接力通信系统。由于具有便于加密和传输质量好等优点，数字微波接力通信系统日益受到人们的重视。除上述视距接力通信系统外，利用对流层散射传播的超视距散射通信系统也可通过接力方式作为长距离中容量的通信系统。

3. 卫星系统

在微波通信系统中，若以位于对地静止轨道上的通信卫星为中继转发器，转发各地球站的信号，则构成一个卫星通信系统。卫星通信系统的特点是覆盖面积很大，在卫星天线波束覆盖的大面积范围内可根据需要灵活地组织通信联络，有的还具有一定的变换功能，故已成为国际通信的主要手段，也是许多国家国内通信的重要手段。卫星通信系统主要由通信卫星、地球站、测控系统和相应的终端设备组成。卫星通信系统既可作为一种独立的通信手段（特别适用于对海上、空中的移动通信业务和专用通信网），又可与陆地的通信系统结合、相互补充，构成更完善的传输系统。

用上述载波、微波接力、卫星等通信系统作传输分系统，与交换分系统相结合，可构成传送各种通信业务的通信系统。

4. 电话系统

电话通信的特点是通话双方要求实时对话，因而要在一个相对短暂的时间内在双方之间临时接通一条通路，故电话通信系统应具有传输和交换两种功能。这种系统通常由用户线路、交换中心、局间中继线和干线等组成。电话通信网的交换设备采用电路交换方式，由接续网络（又称交换网络）和控制部分组成。话路接续网络可根据需要临时向用户接通通话用的通路，控制部分是用来完成用户通话建立全过程中的信号处理并控制接续网络。在设计电话通信系统时，主要以接收话音的响度来评定通话质量，在规定发送、接收和全程参考当量后即可进行传输衰耗的分配。另一方面根据话务量和规定的服务等级（即用户未被接通的概率——呼损率）来确定所需机、线设备的能力。

由于移动通信业务的需要日益增长，移动通信得到了迅速的发展。移动通信系统由车载无线电台、无线电中心（又称基地台）和无线交换中心等组成。车载电台通过固定配置的无线

电中心进入无线电交换中心，可完成各移动用户间的通信联络；还可由无线电交换中心与固定电话通信系统中的交换中心（一般为市内电话局）连接，实现移动用户与固定用户间的通话。

5. 电报系统

电报系统是为使电报用户之间互通电报而建立的通信系统。它主要利用电话通路传输电报信号。公众电报通信系统中的电报交换设备采用存储转发交换方式（又称电文交换），即将收到的报文先存入缓冲存储器中，然后转发到去向路由，这样可以提高电路和交换设备的利用率。在设计电报通信系统时，服务质量是以通过系统传输一份报文所用的平均时延来衡量的。对于用户电报通信业务则仍采用电路交换方式，即将双方间的电路接通，然后由用户双方直接通报。

6. 数据系统

数据通信是伴随着信息处理技术的迅速发展而发展起来的。数据通信系统由分布在各点的数据终端和数据传输设备、数据交换设备和通信线路互相连接而成。利用通信线路把分布在不同地点的多个独立的计算机系统连接在一起的网络称为计算机网络，这样可使广大用户共享资源。在数据通信系统中多采用分组交换（或称包交换）方式，这是一种特殊的电文交换方式，在发信端把数据分割成若干长度较短的分组（或称包）然后进行传输，在收信端再加以合并。它的主要优点是可以减少时延和充分利用传输信道。

1.6 通信系统指标

通信系统的好坏主要是通过有效性和可靠性来衡量的。也就是说一个通信系统越高效可靠，显然就越好。但实际上有效性和可靠性是一对矛盾的指标，两者需要一定的折中。有效性指的是信息传输的速率，信息传输的速率越快，有效性越好。但信息传输快了，出错的概率也就越高，信息的传输质量就不能保证，也就是可靠性降低了。就好比汽车在公路上超速行驶，快是快了，但有很大的安全隐患。所以不能撇开可靠性来单纯追求高速度，否则，真的会欲速则不达了。

那么具体是用哪些指标来说明系统的有效性和可靠性的呢？

对于模拟通信系统来说，有效性是用系统的带宽来衡量的，可靠性则是用信噪比来衡量的。如果一路电话占用的带宽是一定，那么系统的总带宽越大就意味着能容纳更多路电话；而当系统的带宽一定时，要想增加系统的容量，则可以通过降低单路电话占用的带宽来实现，因此单路信号所需的带宽越窄说明有效性越好。但降低单路信号的占用带宽后，由于两路信号之间的频带隔离变窄，势必会增加相互间的干扰，即增加噪声，使信号功率与噪声功率的比值降低，从而降低了系统的可靠性。

对于数字通信系统来说，有效性是通过信息传输速率来表示的，可靠性是通过误码率或误信率来体现的。误码率是指接收端收到的错误码元数与总的传输码元数的比值，即表示在传输中出现错误码元的概率。误信率是指接收到的错误比特数与总的传输比特数的比值，即传输中出现错误信息量的概率。

数字信号在信道中传输时，为了保证传输的可靠性，往往要添加纠错编码，纠错编码是要占用传输速率的。当一个信道每秒能传输的总码元数或比特数一定时，如果不要纠错编码，显然每秒传输的信息量比特会多些，效率提高了，但没有了纠错码，可靠性则无法保证。这些

为了提高可靠性而增加的编码也被称为传输开销,原因是传输这些码元或比特的目的是为了检查纠错,而它们是不携带信息的。

在通信系统中,频率是个任何信号都与生具有的特征,即使是数字信号也不例外,传输它们是要占用一定的频率资源的。带宽和数字信号的传输速率是成正比关系的。理想情况下,传输速率除以 2 就是以这个速率传输的数字信号所占用的频带宽度。所以越高速率所占的频带也会越宽,所以高速通信往往也称为“宽带通信”。

思考题与习题

1. 无线通信系统由哪几部分组成,画出其模型框图并说明图中各部分起的作用。
2. 无线通信为什么要用高频信号?“高频”信号指的是什么?
3. 无线通信中为什么要进行调制与解调?
4. 发射机和接收机的主要技术指标有哪些?
5. 画出调幅式无线电广播发射机方框图,并说明高频部分各模块的作用。
6. 示意画出超外差式调幅收音机的原理框图,简要叙述其工作原理。
7. 调制和解调的三种方式分别是什么?
8. 电磁波频段如何划分?各个频段的传播特性和主要应用情况如何?
9. 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?