



通信原理

武汉理工大学 信息工程学院



第1章 绪论

1.1 通信的历史回顾

1.2 通信系统的组成

1.3 信道

1.4 噪声

1.5 无线频谱管理及通信频带划分

1.6 通信系统的性能指标

1.1 通信的历史回顾

通信:

人们通过某种媒介进行信息传递。

早期远距离通信的基本方式:

直接依靠人的视觉与听觉，如古代的烽火狼烟、击鼓鸣号、飞鸽传信、驿马邮递等。

电通信:

19世纪中叶以后，随着电磁波地发现，电信号作为了新的信息载体，人类通信领域也因此产生了根本性的变革，开始了通信的新时代。



1.1 通信的历史回顾

1837年，莫尔斯发明**电报**。

1864年，麦克斯韦预言了**电磁波**的存在。

1876年，贝尔发明了世界上第一台**电话机**。

1887年，赫兹发现了**电磁波**的存在。

1901年，马可尼实现了横跨大西洋的**无线电通讯**。

1918年，阿姆斯特朗发明了超外差式接收机。

1933年发明**频率调制技术**。

1928年，奈奎斯特提出了奈奎斯特准则和**奈奎斯特抽样定理**。



1.1 通信的历史回顾

1937年，里弗斯发明**PCM**。

1943年，诺斯提出**匹配滤波器**原理。

1946年，第一台**电子数字计算机**面世。

1948年，贝尔实验室发明了**晶体管**。

1958年，美国宇航局发射世界上第一颗**通信卫星**。

中国的试验通信卫星于**1984年4月8日**发射。

1958年，罗伯特·诺伊斯（英特尔创始人之一）发明了**集成电路**。

1960年，贝尔实验室制造出第一台**激光器**。

1970年代，**大规模集成电路**。



1.1 通信的历史回顾

1970年，法国成功开通了**数字程控交换系统**。

1970年，美国康宁公司研制成功**石英光纤**。

1976年，美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用**光纤通信系统**的现场试验。

1980年代，出现了**超大规模集成电路**、互联网。

1983年，美国研制出**TCP/IP协议**。

1986年，美国国家科学基金会建立了**NSFnet广域网**。

1991年，**GSM**移动通信系统投入商业运行。

1994年，**中国**与美国**NSFnet**直接互联。

1995年，第一个**CDMA**商用系统在美国运行。



1.1 通信的历史回顾

21世纪的通信**发展趋势**:

宽带化、智能化、个人化和综合化。

向用户提供大容量、高速率的通信业务。

满足用户任何时间、任何地点向任何人通过声音、数据、图像、视频等方式相互交换信息的要求。

5W: **Whoever** (任何人)

Wherever (任何地点)

Whenever (任何时间)

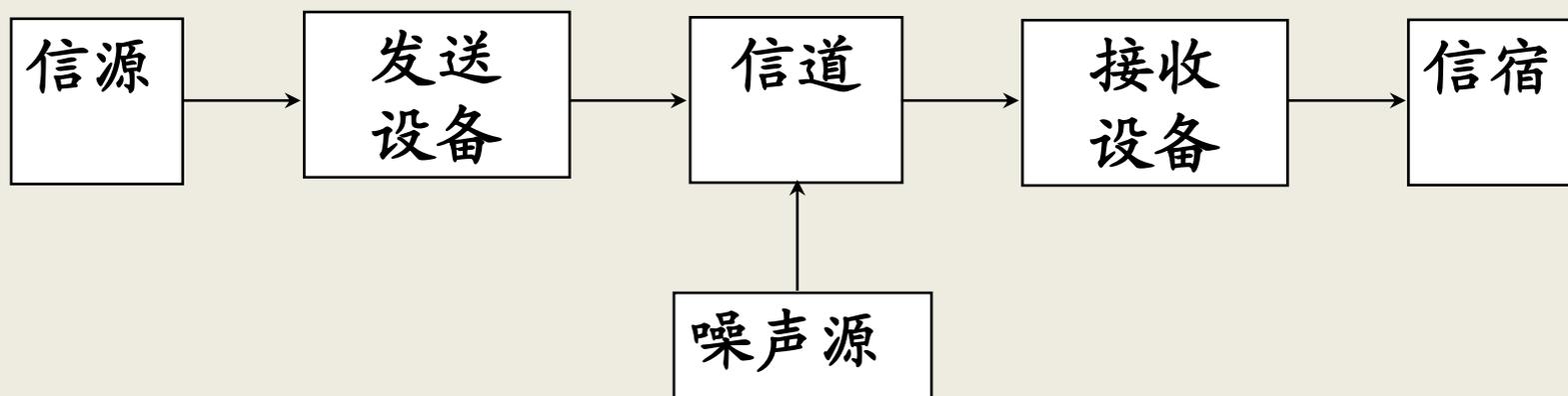
Whomever (任何对象)

Whatever (采用任何方式)

1.2 通信系统的组成

最基本的通信系统模型：

单路、单向、点对点形式，包括信源、发送设备、信道、接收设备、信宿以及噪声源。的通信网。





1.2 通信系统的组成

通信系统的**工作方式**:

- ①单工 (Simplex), 单向通信, 如广播;
- ②准双工 (Half-duplex), 如步话机;
- ③全双工 (Duplex), 双向通信, 如固定电话和移动电话。

广播通信是点到多点的形式。

电话通信是一个多点到多点的通信网。



1.2 通信系统的组成

通信系统传输的**消息类型**:

连续（模拟）消息或离散（数字）消息。

通信系统:

模拟通信系统或数字通信系统。

模拟通信系统:

发送设备主要包含调制器。

接收设备主要包括解调器。

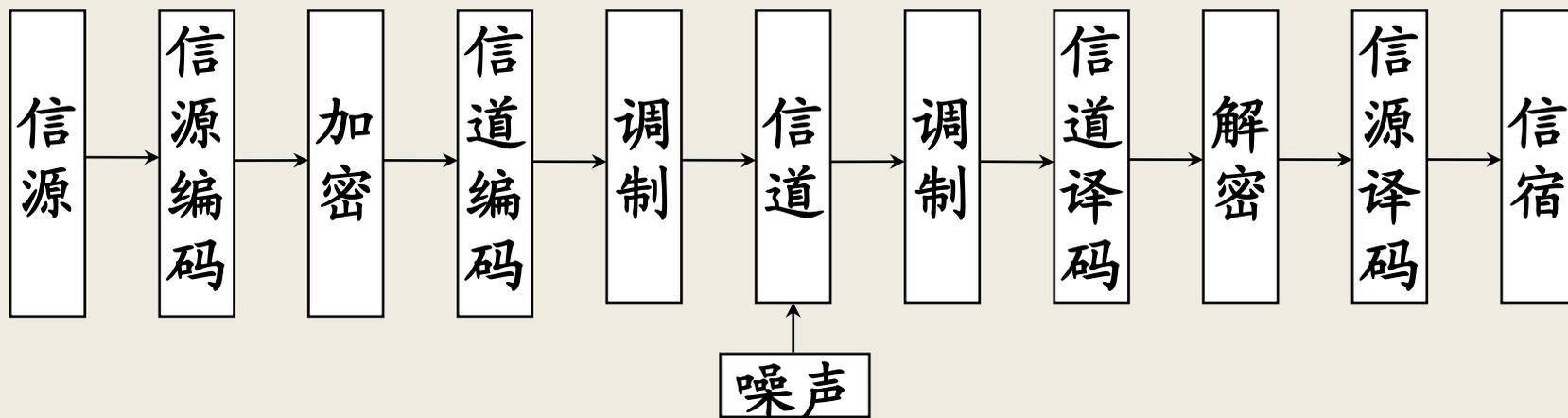
载波同步系统也是必要和重要的部分。

1.2 通信系统的组成

数字通信系统:

发送设备和接收设备中包含信源编解码、信道编解码，以及保密编解码。

为保证系统正常工作，载波同步、码元同步和帧同步也是必不可少的。



1.2 通信系统的组成

数字通信系统的主要特点：

- 1) 抗干扰能力强，噪声不积累。
- 2) 可采用信道纠错编码技术，提高通信可靠性。
- 3) 便于处理、变换和存储。
- 4) 易于大规模集成。
- 5) 易于加密处理，保密性好。
- 6) 相比模拟通信系统，占用更多的带宽。
- 7) 需要更复杂的同步系统。

1.3.1 信道的分类

信道：用于在发送端和接收端之间传输信号的通道。

按照信号的**传输媒质**，信道可分为：

有线信道和无线信道。

按照信道的**特性**，可分为：

恒参信道和随参信道。

按照信道的**模型**，又可分为：

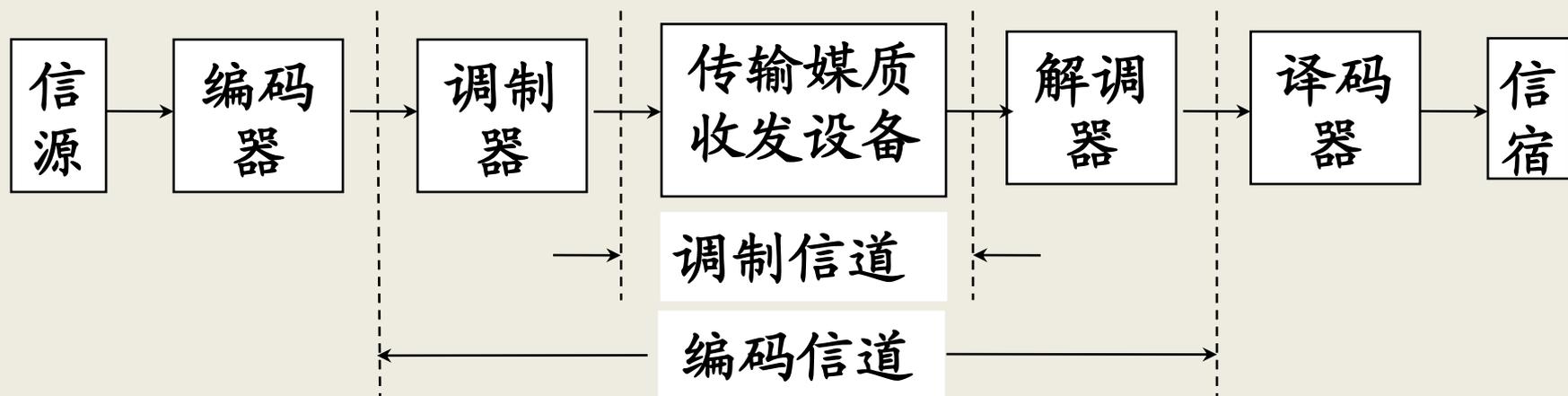
调制信道和编码信道。

1.3.1 信道的分类

若信道仅指传输媒质，称为**狭义信道**。

若将传输媒质和其它通信设备一起看成信道，称为**广义信道**。

对应于模拟和数字通信系统，广义信道又分别称为**调制信道**和**编码信道**。



1.3.2 常用信道

调制信道：用信道输入输出之间的关系式表示。

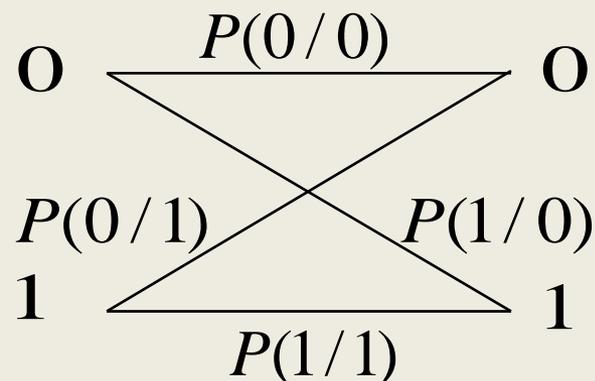
$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t)$$

$e_i(t)$ 信道输入； $e_o(t)$ 信道输出；

$n(t)$ 信道噪声； $k(t)$ 信道特性。

编码信道：

$$[P]_{Y|X} = \begin{bmatrix} P(0/0) & P(1/0) \\ P(0/1) & P(1/1) \end{bmatrix}$$





1.3.2 常用信道

常用通信方式：固定电话、电视、广播、微波通信、卫星通信、移动通信。

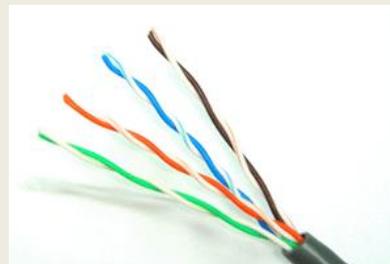
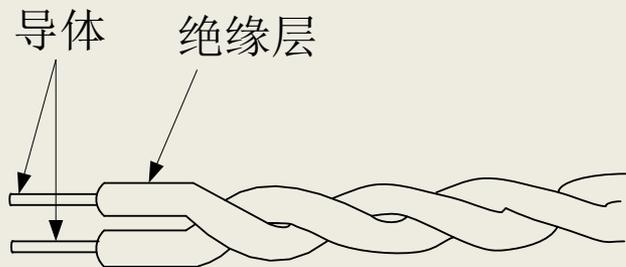
常用信道：对称电缆、同轴电缆、光纤、无线广播信道、微波中继、卫星中继、无线移动信道等。

有线信道、无线信道中的微波中继和卫星中继是**恒参**的，其它无线信道是**随参**的。



1.3.2 常用信道

1. 对称信道

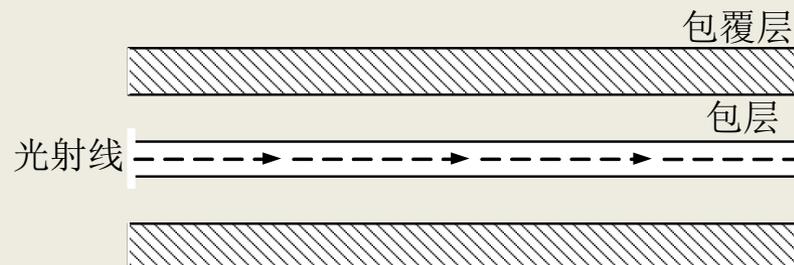
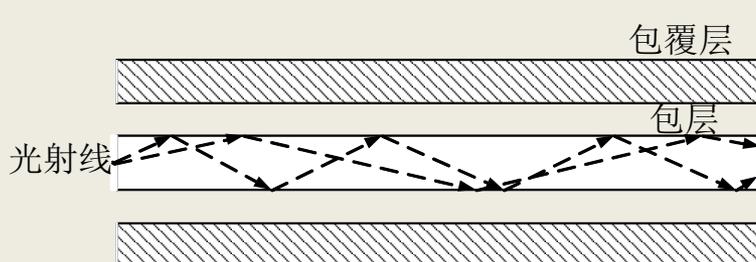
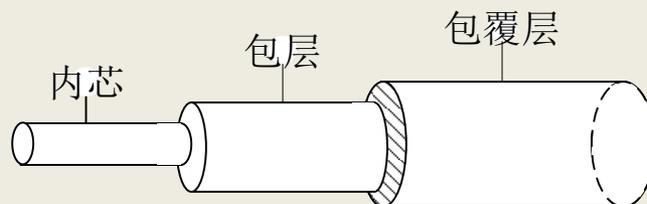


2. 同轴电缆



1.3.2 常用信道

3. 光纤



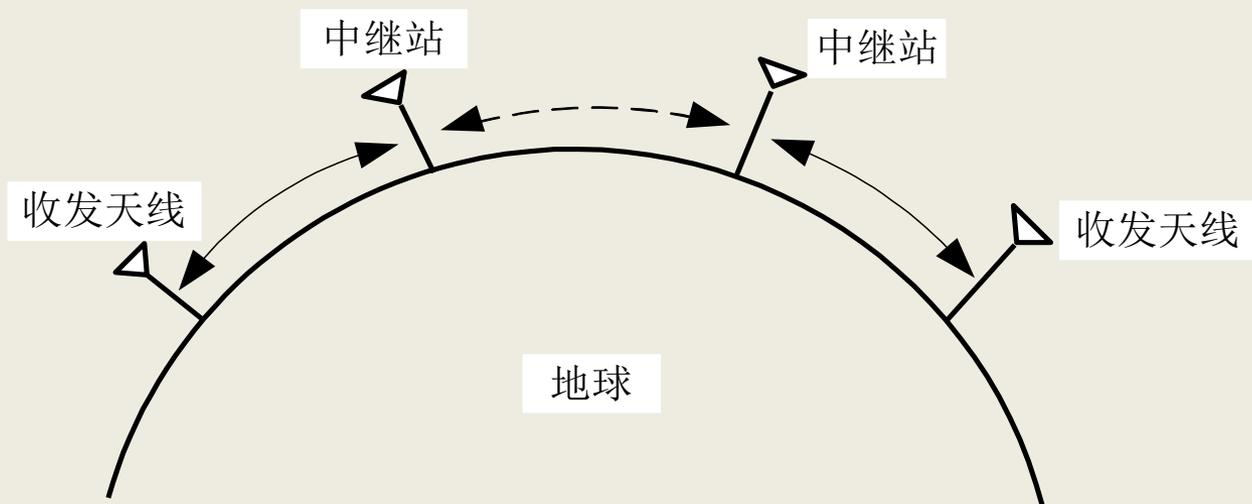
4. 无线电广播信道

无线电广播信道处于几百千赫兹至几百兆赫兹。按波长主要有中波（AM调幅广播）、短波和超短波（FM调频广播）。



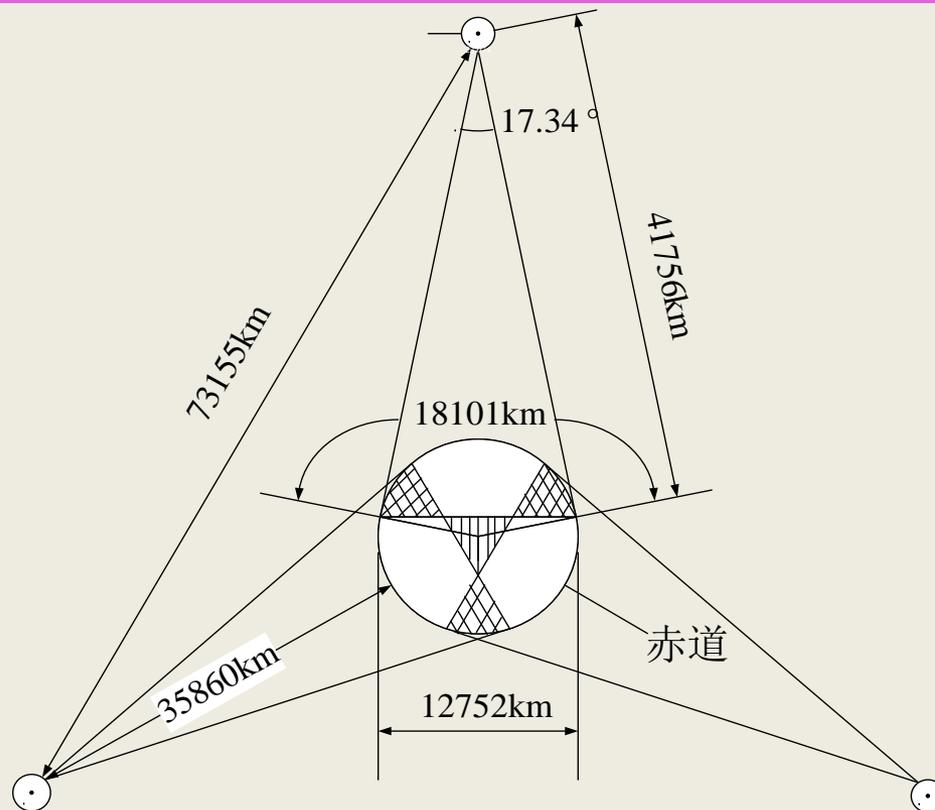
1.3.2 常用信道

5. 微波中继信道



1.3.2 常用信道

6. 卫星中继信道



7. 无线移动信道

无线移动信道通常工作在几百兆赫兹至几吉赫兹，通过基站实现不同电话用户之间的通信。



1.3.3 恒参信道对信号传输的影响

恒参信道可以看成是一个**线性时不变网络**。

$$H(\omega) = |H(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

$H(\omega)$ 是网络传递函数。

$|H(\omega)|$ 是幅频特性。 $\varphi(\omega)$ 是相频特性。

信号通过线性系统不失真的条件：

$$H(\omega) = Ke^{-j\omega t_d}$$

其中， K 是衰减常数， t_d 是信道时延。

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

随参信道主要分为：

电离层反射、电离层散射、对流层散射、流星余迹散射、移动通信信道等。

随参信道的**共同特点**：

- 1) 信道幅频特性随时间改变；
- 2) 信道相频特性随时间改变；
- 3) **多径传播**。其中多径传播对信号传输的影响最大，这种影响又称为**多径效应**，多径效应会带来信号的衰落现象和频率弥散。

衰落是指信道对接收信号振幅的影响，有快衰落、慢衰落和频率选择性衰落。

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

设信道输入为单频正弦波 $A \cos \omega_c t$ ，振幅 A 为常数，接收信号 $R(t)$ 是经 n 条路径传输的信号之和。

$$R(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \omega_c [t - \tau_i(t)] = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos [\omega_c t + \varphi_i(t)]$$

$\mu_i(t)$ — 第 i 条路径接收信号的振幅（随机过程）

$\tau_i(t)$ — 第 i 条路径接收信号的时延（随机过程）

$\varphi_i(t)$ — 第 i 条路径接收信号的相位（随机过程）

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

变换上式为

$$\begin{aligned} R(t) &= \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \varphi_i(t) \cos \omega_c t - \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \sin \varphi_i(t) \sin \omega_c t \\ &= X_c(t) \cos \omega_c t - X_s(t) \sin \omega_c t \\ &= V(t) \cos[\omega_c t + \varphi(t)] \end{aligned}$$

$X_c(t)$ — 正交分量 (高斯随机过程)

$X_s(t)$ — 同相分量 (高斯随机过程)

$\varphi(t)$ — 随机相位 (随机过程, 均匀分布)

$V(t)$ — 随机包络 (随机过程, 瑞利分布)

$R(t)$ — 窄带高斯过程

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

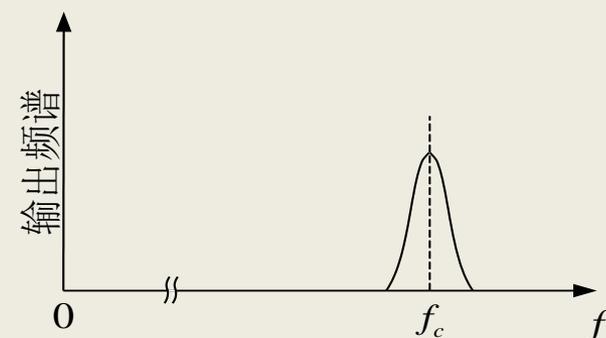
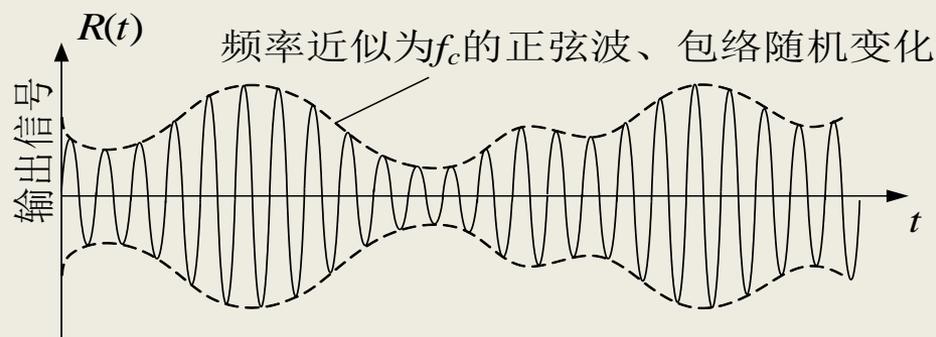
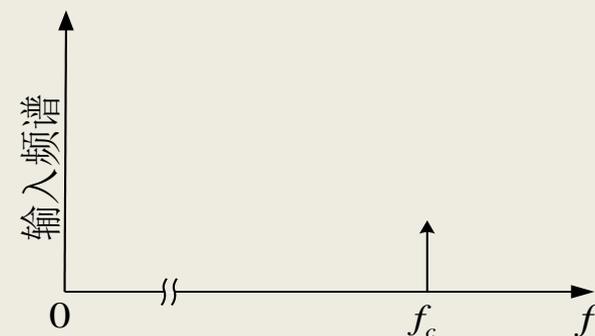
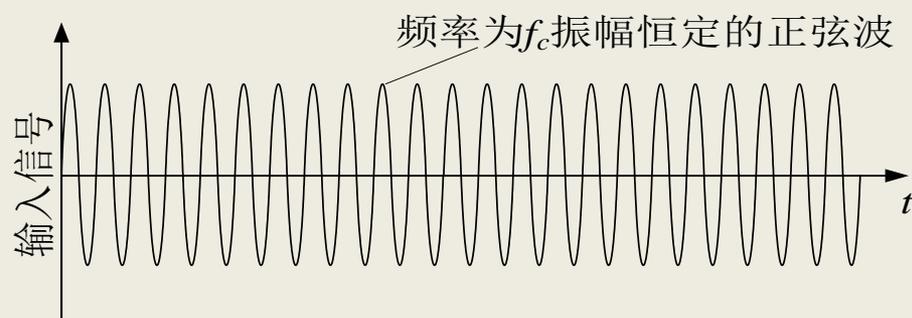
由于接收信号振幅 $V(t)$ 是随机变化，且服从瑞利分布，又称为**瑞利衰落**。

衰落的周期常能和数字信号码元周期相比较，因此称为**快衰落**。

慢衰落是指由于季节、气候、时间不同，而引起的信号衰落现象，这种衰落的周期通常为若干小时或若干天。

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

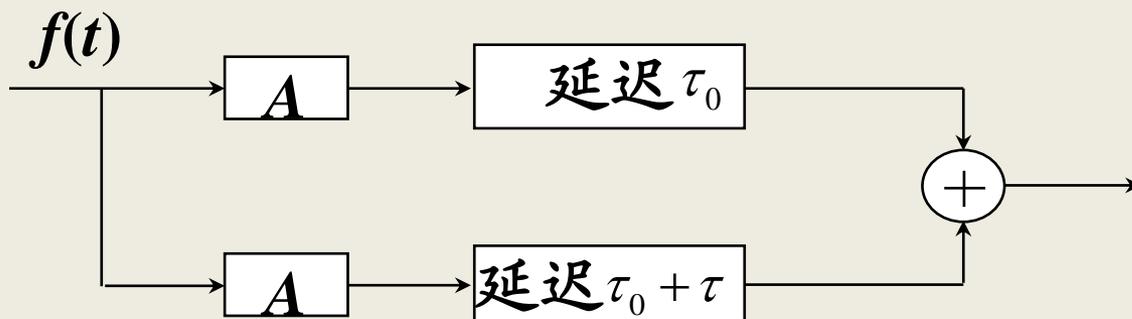
多径效应对输出信号产生的影响如图：



输出频谱由单一频率产生了**弥散现象**。

1.3.4 随参信道对信号传输的影响

频率选择性衰落是指在特定的频率下存在的衰落现象，以两条路径为例解释如下。



设 $f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$

则 $Af(t - \tau_0) \Leftrightarrow AF(\omega)e^{-j\omega\tau_0}$

$Af(t - \tau_0 - \tau) \Leftrightarrow AF(\omega)e^{-j\omega(\tau_0 + \tau)}$

$Af(t - \tau_0) + Af(t - \tau_0 - \tau) \Leftrightarrow AF(\omega)e^{-j\omega\tau_0} (1 + e^{-j\omega\tau})$



1.3.4 随参信道对信号传输的影响

两径系统传输特性为

$$H(\omega) = \frac{AF(\omega)e^{-j\omega\tau_0}(1+e^{-j\omega\tau})}{F(\omega)} = Ae^{-j\omega\tau_0}(1+e^{-j\omega\tau})$$

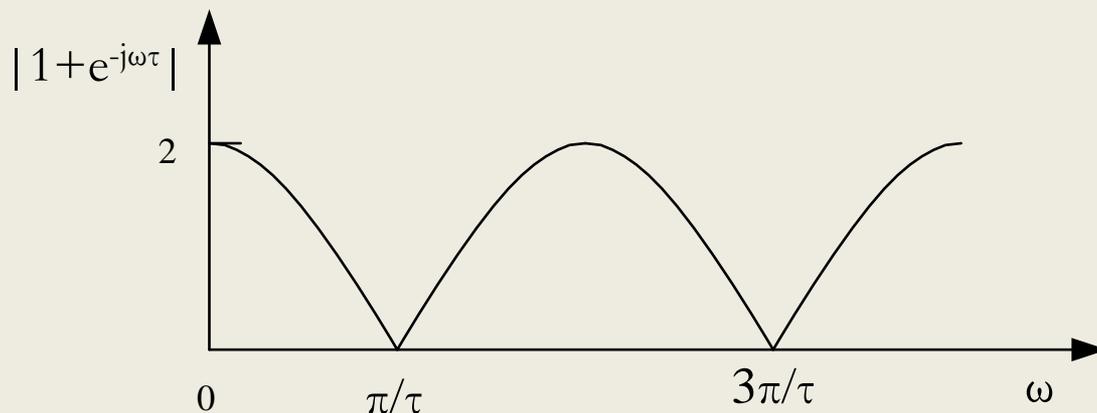
A —常数； $e^{-j\omega\tau_0}$ —模为1。

两径系统对接收信号幅度的影响只需考虑因子
($1+e^{-j\omega\tau}$)。



1.3.4 随参信道对信号传输的影响

$|1 + e^{-j\omega\tau}| = 2 \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right|$ ，当 $\omega = \frac{n}{\tau}, \frac{3n}{\tau}, \dots$ 时，接收信号衰减为0。



设最大时延为 τ_m ，多径信道的**相关带宽** $\Delta f = 1/\tau_m$ 。
当信号带宽 $B > \Delta f$ ，接收信号有严重选择性衰落。
应保证 $B < \Delta f$ ，接收信号有可能时强时弱。



1.4 噪声

1.4.1 噪声来源

噪声是指在接收机中出现的任何不需要的电压或电流信号。

噪声会引起模拟信号的失真，或数字信号的误码，从而**降低通信系统的可靠性**。

噪声既来源于人为活动又来自于自然现象。

人为活动：各类工业或生活电气设备的开关等。

自然噪声：既来自宏观世界，也来自微观世界。

宏观世界是指在自然界中的各种电磁波的辐射现象。

微观世界是指由于通信设备中电子元器件内部粒子运动而产生的热噪声和散弹噪声等。

1.4.2 噪声分类

按照噪声对信号的作用方式，主要分为加性噪声和乘性噪声。

加性噪声是叠加在信号上，大多数噪声属于加性噪声。

乘性噪声主要来自信道对信号的影响，当信道特性不理想时，需要通过 对信道特性的补偿 （又称为均衡）去改善。

按照噪声的性质，可分为**脉冲噪声**、**单频噪声**和**起伏噪声**三类。



1.4.3 高斯白噪声

白噪声：功率谱密度为常数的噪声。

起伏噪声特性：

统计特性服从高斯分布，且均值为0，一维高斯分布又称为正态分布；

功率谱密度在很宽的范围内为常数，近似为白噪声。

因此，起伏噪声又称为**高斯白噪声**，术语既表达了统计特性，又表达了频谱特性。



1.5 无线频谱管理及通信频带划分

无线电波已承担着越来越多的通信业务，这些业务都离不开**无线电频率资源**。

无线电频率资源如同土地、能源等自然资源，都是极为重要的**国家资源**，同样存在着**利用开发和**管理保护****的问题。

无线电频率资源**特性**：

1) 有限性； 2) 排它性； 3) 复用性； 4) 非耗竭性； 5) 固有的传播特性； 6) 易污染性。



1.5 无线频谱管理及通信频带划分

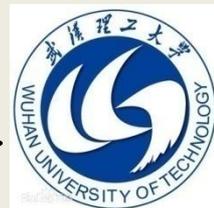
为了更科学地管理和利用无线电频率资源，国际电信联盟无线电委员会（**ITU-R**）的《**无线电规则**》对频谱分配进行了具体规划。

国际电信联盟将世界划分为**三个区域**，其中第一区主要包括欧洲和非洲国家，第二区主要包括美洲国家，第三区主要包括亚洲国家。**中国位于第三区**。

1.5 无线频谱管理及通信频带划分

表1-1 部分无线电频率划分表之一

频段 (kHz)	主要用途
0~160	水上移动, 水上无线电导航, 无线电导航
160~526.5	航空无线电导航, 水上无线电导航, 水上移动
526.5~1 606.5	广播, 航空无线电导航
1 606.5~1 800	无线电定位, 无线电导航
1 800~2 190.5	业余, 无线电导航, 无线电定位, 水上移动, 移动遇险
2 190.5~2 495	水上移动, 无线电定位, 广播
2 495~12230	航空移动, 广播, 业余, 水上移动, 标准频率和时间信号
12 230~13 600	水上移动, 航空移动, 射电天文, 广播, 陆地移动
13 600~15 010	广播, 业余, 标准频率和时间信号
15 010~17 900	航空移动, 广播, 水上移动
17 900~19 680	航空移动, 业余, 广播
19 680~21 924	水上移动, 标准频率和时间信号, 业余, 广播
21 924~24 990	水上移动, 航空移动, 陆地移动, 业余



1.5 无线频谱管理及通信频带划分

当前通信的发展已进入移动互联网时代，日益增长的无线数据需求将引起**频谱资源危机**。

有报告称，到2015年，我国移动通信频率总需求接近1000MHz，目前已划分用于IMT系统（国际移动通信系统）的频率共547MHz，中国将出现420MHz的频谱缺口。

据工业和信息化部预计，我国未来公众移动通信系统**总的频谱需求**将至少为1400MHz。



1.5 无线频谱管理及通信频带划分

在**应对频谱危机**方面，一方面利用过时技术的空闲频谱资源，另一方面通过新技术提高频谱效率。

在众多提升频谱效率的新技术中，最受关注的是**认知无线电技术**。

认知无线电技术的基本出发点是：在已授权频段未用或只有很少的通信业务的情况下，具有认知功能的无线通信设备可以按照某种“伺机”的方式工作在已授权的频段内。



1.6 通信系统的性能指标

通信系统的性能：有效性、可靠性、适应性、经济性、保密性、标准性、维修性、工艺性等。

其中有效性和可靠性是两个最重要的性能指标。

有效性指信息传输的速度，或传输信息所占用的频率资源。

可靠性指信息传输的质量，即接收信息的准确程度。

有效性和可靠性常常是矛盾的，对于实际通信系统，需要在两个指标之间寻求平衡。

模拟和数字通信系统有效性和可靠性的具体指标也是不同的。

1.6.1 模拟通信系统性能

模拟通信系统的有效性用信号所占用的**带宽**来衡量。

模拟通信系统的可靠性用解调器输出信噪功率比表示，简称**信噪比**。通常信噪比的单位取分贝（dB）。

$$\text{信噪比} = 10 \lg \frac{S_i}{N_i}$$

一般无线电通信要求信噪比大于26dB；电视节目信噪比一般在54dB以上。



1.6.2 数字通信系统性能

数字通信系统的**有效性**用码元速率、信息速率或频带利用率表示。

- 1) **码元速率**: 定义为每秒传送的码元数量, 单位为波特 (Baud, 简称B)。
- 2) **信息速率**: 定义为每秒传送的信息量。

当二进制数字信源各码元等概出现时, 每个码元所携带的信息量如下式, 单位为比特 (bit, 简称b) :

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 M$$



1.6.2 数字通信系统性能

3) 频带利用率 η :

频带利用率又称频谱利用率，定义为单位频带内的码元速率或信息速率，单位为B/Hz或b/sHz。

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{B/Hz})$$

或

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/sHz})$$



1.6.2 数字通信系统性能

数字通信系统的**可靠性**用误码率或误信率表示。

1) **码误率** P_e

误码率定义为接收信号中错误码元出现的概率。

$$P_e = \lim_{n_B \rightarrow \infty} \frac{n_{eB}}{n_B}$$

n_B — 为传输的总码元数。

n_{eB} — 为错误码元数。

对于二进制通信

$$P_e = P(0)P(1/0) + P(1)P(0/1)$$

1.6.2 数字通信系统性能

3) 误信率

误信率定义为接收信息中错误比特出现的概率。

$$P_b = \lim_{n_b \rightarrow \infty} \frac{n_{eb}}{n_b}$$

n_b — 传输的总比特。

n_{eb} — 为错误信息比特。

对于二进制通信, $P_e = P_b$ 。

对于多进制通信, $M > 2$, 一个码元所含信息量为 $\log_2 M$ 比特, 当错一个码元时, 多比特的信息量不一定全部错误, 因此 $P_b < P_e$ 。