ch1

- 信息量

  $I=\log_a \frac{1}{P(x)}=-\log_a P(x)$

  - $a=2$，比特 (bit)，简记为 b
  - $a=e$，奈特 (nat)
  - $a=10$，哈特莱 (Hartley)

  $I=R_b\cdot t$

- 平均信息量 / 熵

  $H=\sum_{i=1}^{M} P(x_i)\log_2 \frac{1}{P(x_i)}$ （b/符号）

  M 进制的熵为 $H_{\max}=\log_2 M$

- 码元传输率 / 符号速率

  $R_B=\frac{1}{T_s}$ （baud）

- 信息传输率 / 平均信息速率

  $R_b=R_B\cdot H$ （bps） $=R_B\cdot\log_2 M$

- 误码率

  $P_e=\frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}=\frac{N_e}{N}$

  误信率

  $P_b=\frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}=\frac{I_e}{I_b}$

ch2

- 能量信号与功率信号

  能量：$E=\int_{-\infty}^{\infty}s^2(t)\mathrm{d}t$

  功率：$P=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}s^2(t)\mathrm{d}t$

  - 能量信号：$0<E<\infty, P\to 0$
  - 功率信号：$0<P<\infty, E\to\infty$

- 周期信号频谱

  $s(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}C_n e^{j2\pi nt/T_0}$

  频谱

  $C_n=C(nf_0)=\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2}s(t)e^{-j2\pi nf_0t}\mathrm{d}t$

  $C_{-n}=C_n^*$

- 非周期信号频谱密度

  $S(f)=F[s(t)]=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)e^{-j2\pi ft}\mathrm{d}t$

  $S(f)=\lim_{T_0\to\infty}T_0C_n$

- 能量谱和功率谱

  能量谱密度 $G(f)=|S(f)|^2$

  Parseval 定理 $E=\int_{-\infty}^{\infty}s^2(t)\mathrm{d}t$

  $=\int_{-\infty}^{\infty}|S(f)|^2\mathrm{d}f=2\int_0^{\infty}|S(f)|^2\mathrm{d}f$

  功率谱密度 $P(f)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}|S_T(f)|^2$，$S_T(f)$ 为 $s(t)$ 截短信号 $s_T(t)$ 的傅里叶变换

  周期信号功率谱密度

  $P(f)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}|C_n|^2\delta(f-nf_0)$

  Parseval 定理

  $P=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}s^2(t)\mathrm{d}t=\sum_{n=-\infty}^{\infty}|C_n|^2$

- 确知信号时域分析

  能量信号互相关函数

  $R_{12}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}s_1(t)s_2(t+\tau)\mathrm{d}t$

  能量信号自相关函数

  $R(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)s(t+\tau)\mathrm{d}t$

  功率信号自相关函数

  $R(\tau)=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}s(t)s(t+\tau)\mathrm{d}t$

  - $R(0)=E$ （能量信号）或者 P （功率信号）
  - 能量信号 $R(\tau)=F\left[|S(f)|^2\right]$
  - 功率信号 $R(\tau)=F[P(f)]$

ch3

- 随机过程

  n 维分布函数 $F_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n)$

  $=P[\xi(t_1)\le x_1,\cdots,\xi(t_n)\le x_n]$

  n 维概率密度函数 $f_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n)$

  $=\frac{\partial^n F_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n)}{\partial x_1\cdots\partial x_n}$

  均值 $E[\xi(t)]=\int_{-\infty}^{\infty}xf_1(x,t)\mathrm{d}t=a(t)$

  方差 $D[\xi(t)]=E\left\{[\xi(t)-a(t)]^2\right\}$

  $=E[\xi^2(t)]-[a(t)]^2=\sigma^2(t)$

  相关函数 $R(t_1,t_2)=E[\xi(t_1)\xi(t_2)]$

  $=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}x_1x_2f_2(x_1,x_2;t_1,t_2)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2$

- 平稳随机过程

  狭义平稳：分布 f 与时间奇点无关（一维与 t 无关，二维仅与 $\tau=t_2-t_1$ 有关）

  广义平稳：$a(t)=a, R(t_1,t_1+\tau)=R(\tau)$

  时间平均s值

  - $\overline{a}=\overline{x(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)\mathrm{d}t$
  - $\overline{R(\tau)}=\overline{x(t)x(t+\tau)}$

    $=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)x(t+\tau)\mathrm{d}t$

  各态历经性 $a=\overline{a}, R(\tau)=\overline{R(\tau)}$

  广义平稳→狭义平稳，平稳→各态历经

  自相关函数性质

  - $R(0)=E[\xi^2(t)]$
  - $R(\tau)=R(-\tau)$
  - $R(\infty)=a^2$
  - $R(0)-R(\infty)=\sigma^2$

  维纳-辛钦定理 $P(f)=F[R(\tau)]$

- 高斯随机过程

  一维概率密度 $f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)$

  $\operatorname{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{x}}\int_0^x e^{-t^2}\mathrm{d}t$

  - $\operatorname{erf}(-x)=-\operatorname{erf}(x)$
  - $\operatorname{erfc}(x)=1-\operatorname{erf}(x)$

- 平稳随机过程通过线性系统

  冲激响应为 $h(t)\Leftrightarrow H(\omega)$，输出

  $\xi_0(t)=\xi_i(t)*h(t)=\int_{-\infty}^{\infty}h(\tau)\xi_i(t-\tau)\mathrm{d}\tau$

  - 均值 $E[\xi(t)]=a\longrightarrow a\cdot H(0)$
  - 功率谱密度 $P(f)\longrightarrow|H(f)|^2P(f)$

- 白噪声

  白噪声功率谱密度

  - 双边谱 $P_n(f)=\frac{n_0}{2}(-\infty<f<+\infty)$
  - 单边谱 $P_n(f)=n_0(0<f<+\infty)$

  白噪声自相关函数 $R(\tau)=\frac{n_0}{2}\delta(\tau)$

  带限白噪声

  - 低通白噪声 $P_n(f)=\begin{cases}\frac{n_0}{2} & |f|\le f_H\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$

    $\Leftrightarrow R(\tau)=n_0f_H\frac{\sin 2\pi f_H\tau}{2\pi f_H\tau}$

  - 带通（窄带）白噪声

    $P_n(f)=\begin{cases}\frac{n_0}{2} & f_c-\frac{B}{2}\le|f|\le f_c+\frac{B}{2}\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$

    $\Leftrightarrow R(\tau)=n_0B\frac{\sin\pi B_\tau}{\pi B_\tau\tau}\cos 2\pi f_c\tau$

ch4

- 恒参信道

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

  无失真传输条件

  - $|H(\omega)|=K$ 常数
  - $\varphi(\omega)=\omega t_d$，$t_d$ 为常数

  幅频失真：模拟信号波形失真，信噪比下降；数字信号产生马健串扰，误码率增大

  相频失真：对语音信号影响不大，对视频信号影响大；数字信号码间串扰，误码率增大

- 随参信道

  $A\cos\omega_0t\to V(t)\cos[\omega_0t+\varphi(t)]$

  多径传播造成瑞利型衰落和频率弥散

  减小频率选择性衰落：

  - 信道各路径最大时延差为 τ_m
  - 相关带宽为 $\Delta f=\frac{1}{\tau_m}$
  - 码元宽度至少为 $T_B=(3\sim 5)\tau_m$

- 信道容量

  连续信道的容量

  $C=B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right)=B\log_2\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)$，

  B 为信道带宽，S 为信号功率，n_0 为噪声单边功率谱密度，N 为噪声功率

  当 $B\to\infty$ 时，$C\to 1.44\frac{S}{n_0}$

ch5

- 幅度调制
  - AM

    $s(t)=[A_0+m(t)]\cos\omega_ct$

    $S(\omega)=\pi A_0[\delta(\omega+\omega_c)+\delta(\omega-\omega_c)]$

    $+\frac{1}{2}[M(\omega+\omega_c)+M(\omega-\omega_c)]$

    需要带宽 $B=2f_H$

    平均功率 $P=\frac{A_0^2}{2}+\frac{\overline{m^2(t)}}{2}=P_c+P_s$

    调制效率 $\eta=\frac{P_s}{P}$

    调幅系数 $m=\frac{|m(t)|_{\max}}{A_0}$

  - DSB

    $s(t)=m(t)\cos\omega_ct$

    $S(\omega)=\frac{1}{2}[M(\omega+\omega_c)+M(\omega-\omega_c)]$

  - SSB

    $B=f_H$

- 角度调制

  PM $s(t)=A\cos[\omega_ct+K_pm(t)]$

  FM $s(t)=A\cos[\omega_ct+K_f\int m(t)\mathrm{d}t]$

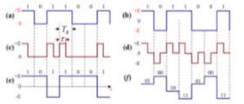
  若 $|K_f\int m(t)\mathrm{d}t|<<\frac{\pi}{6}$ 则为窄带调频，否则为宽带调频

  调频指数 $m_f=\frac{K_fA_m}{\omega_m}=\frac{\Delta f}{f_m}$

  带宽 $B=2(m_f+1)f_m=2(\Delta f+f_m)$，$\Delta f$ 为最大频偏，f_m 为调制频率

ch6

- 数字基带信号



  - 单极性：易产生，低频分量丰富
  - 双极性：无直流分量，抗噪声性能好
  - 单极性归零：其它码型提取同步时钟的过渡码型
  - 双极性归零：双极性+归零的优点
  - 差分：$b_n = a_n \oplus b_{n-1}$ 一边零不变，消除设备初始状态的影响
  - 多电平：高速数据传输系统
- 频谱特性

  $s(t) = u(t)$（交变波，随机信号）$+v(t)$（稳态波，周期性信号）

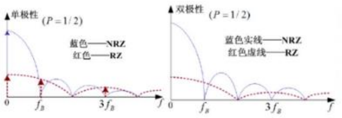
  功率谱密度 $P(f) = P_u(f) + P_v(f)$

  $= f_B P(1-P)|G_1(f) - G_2(f)|^2$

  $+ \sum\limits_{m=-\infty}^{\infty} |f_B[PG_1(mf_B) + (1-P)G_2(mf_B)]|^2$

  $\delta(f - mf_B)$

  其中，$f_B = \frac{1}{T_B}$ 为码元速率，$g_1(t)$ 为 0 马原，概率为 P，$g_2(t)$ 为 1 码元，$G_1(f), G_2(f)$ 为其傅里叶变换



- 基带传输码型

  选码原则

  - 无直流分量，低频分量小
  - 定时信息丰富
  - 高频分量小
  - 不受信源统计特性影响
  - 有自检能力
  - 编码译码简单

  AMI 码：1 以 -1 和 +1 交替出现

  - 无直流分量，低频成分少，三电平，编码译码简单，有自检能力
  - 长连 0 串难以获取定时信息

  HDB_3：4 连 0 用 000V 或 B00V 代替，V极性与前一个非 0 极性相同，相邻 V 极性不同，使用 B 的极性来同时满足以上两个条件

  双相码：0 变 01，1 变 10

  - 二电平，无直流分量，位定时信息丰富，编码译码简单，连码不超过 2 个
  - 带宽比原信码大 1 倍
- 基带传输与码间串扰（ISI）

  无 ISI 条件 $h(kT_B) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$

  其中，k 为第 k 个接收波形，其抽样时刻为 $t = kT_B$

  奈奎斯特准则

  $\sum\limits_i H\left(\omega + \frac{2\pi i}{T_B}\right) = T_B, |\omega| \le \frac{\pi}{T_B}$

  - 理想低通特性

    $h(t) = \text{Sa}(\pi t / T_B)$

    无 ISI 的最高码元速率 $R_B = \frac{1}{T_B} = 2f_N$

    无 ISI 的最高频带利用率

    $\eta = R_b / B = R_B / f_N = 2(\text{Baud/Hz})$
  - 升余弦滚降特性

    滚降系数 $\alpha = f_\Delta / f_N$

    带宽 $B = f_N + f_\Delta = (1+\alpha) f_N$

    最高频带利用率 $\eta = \frac{R_B}{B} = \frac{2}{1+\alpha}$

- 无 ISI 系统抗噪声性能
  - 二进制双极性

    $V_d^* = \frac{\sigma_n^2}{2A} \ln \frac{P(0)}{P(1)}$

    $P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}\sigma_n}\right)$
  - 二进制单极性

    $V_d^* = \frac{A}{2} + \frac{\sigma_n^2}{A} \ln \frac{P(0)}{P(1)}$

    $P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{A}{2\sqrt{2}\sigma_n}\right)$
- 眼图：单眼皮大眼睛
- 均衡

ch7

- 二进制数字调制
  - 2ASK

    $e(t) = s(t)\cos\omega_c t$

    $s(t) = \sum\limits_n a_n g(t - nT_B)$ 为单极性归零信号，T_B 为码元持续时间，$g(t)$ 为高 1 宽 T_B 的矩形脉冲，a_n 为第 n 个符号的电平取值
  - 2FSK

    $e(t) = s_1(t)\cos\omega_1 t + s_2(t)\cos\omega_2 t$

    $= \left[\sum\limits_n a_n g(t - nT_B)\right]\cos\omega_1 t$

    $+ \left[\sum\limits_n \overline{a_n} g(t - nT_B)\right]\cos\omega_2 t$
  - 2PSK

    $e(t) = s(t)\cos\omega_c t$

    $s(t)$ 为双极性不归零信号
  - 2DPSK

    $b_n = a_n \oplus b_{n-1}$

    $\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_{k-1} = \begin{cases} 0 & \text{表示0} \\ \pi & \text{表示1} \end{cases}$
- 频谱和带宽
  - 2ASK/2PSK/2DPSK

    $P(f) = \frac{1}{4}[P_s(f + f_c) + P_s(f - f_c)]$

    $B = 2f_B = 2/T_B$
  - 2FSK

    $P(f) = \frac{1}{4}[P_{s_1}(f + f_1) + P_{s_1}(f - f_1)]$

    $+\frac{1}{4}[P_{s_2}(f + f_2) + P_{s_2}(f - f_2)]$

    $B = |f_2 - f_1| + 2f_B$
- 抗噪声性能

  输入端信噪比 $r = \frac{a^2}{2\sigma_n^2}$，$a$ 为解调器输入端信号幅度，$\sigma_n^2 = n_0 B_{\text{2ASK}} = n_0 \frac{2}{T_B}$ 为解调器输入端噪声功率

类型	相干解调	近似值	非相干解调
2ASK	$P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{4}}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{\pi r}}e^{-r/4}$	$P_e = \frac{1}{2}e^{-r/4}$
2FSK	$P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{2}}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi r}}e^{-r/2}$	$P_e = \frac{1}{2}e^{-r/2}$
2PSK	$P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{r}\right)$	$\frac{1}{2\sqrt{\pi r}}e^{-r}$	
2DPSK	$P_e = \text{erfc}\left(\sqrt{r}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{\pi r}}e^{-r}$	$P_e = \frac{1}{2}e^{-r}$

ch10

- 抽样定理

  模拟信号 $m(t)$ 最高频率小于 f_H，则抽样速率 $f_s \ge 2f_H$
- 量化
  - 均匀量化

    抽样信号取值范围为 $[a, b]$，量化电平数为 M，抽样值为 m_k，量化值为 m_q

    量化间隔 $\Delta v = \frac{b-a}{M}$

    分层电平 $m_i = a + i\Delta v$

    量化电平 $q_i = \frac{m_i + m_{i-1}}{2}$

    量化噪声 $e_q = m_k - m_q$

    信号量噪比

    $\frac{S}{N_q} = \frac{E[m_k^2]}{E\left[(m_k - m_q)^2\right]} = \frac{\int_a^b x^2 f(x)\mathrm{d}x}{\int_a^b (x - m_q)^2 f(x)\mathrm{d}x}$

    其中，$f(x)$ 为输入样值信号的概率密度
  - 非均匀量化

    A 压缩率 $y = \begin{cases} \frac{Ax}{1+\ln A} & 0 < x \le \frac{1}{A} \\ \frac{1+\ln Ax}{1+\ln A} & \frac{1}{A} \le x \le 1 \end{cases}$

    $A = 87.6$
- 编码

  极性码 C_1 正 1 负 0

  段落码 $C_2C_3C_4$

  段内码 $C_5C_6C_7C_8$
- PCM

  抽样速率 $f_s = 2f_H$，每个样值脉冲的二进制编码位数为 N

  比特率 $R_b = B = f_s N = 2f_H N$
- 增量调制 ΔM

  σ 为量化台阶

  最大跟踪斜率 $k = \frac{\sigma}{\Delta t} = \sigma f_s$

ch13

- 载波同步
  - 插入导频法（外同步法）
  - 平方法（自同步法）

    载波的双边带信号 $s(t) = m(t)\cos\omega_c t$

    经过平方律器得到 $e(t) = s^2(t) = \frac{1}{2}m^2(t) + \frac{1}{2}m^2(t)\cos 2\omega_c t$

    将后面一半使用 $2f_c$ 窄带滤波器滤去，实际中常采用锁相环
  - Costas 法（自同步法）

  对 DSB 信号 $m(t)\cos\omega_c t$，提取载波为 $\cos(\omega_c t + \varphi)$，其中 φ 为载波相位误差，解调输出 $m'(t) = \frac{1}{2}m(t)\cos\varphi$，幅值衰减 $\cos\varphi$ 倍，信噪比下降 $\cos^2\varphi$ 倍

  对 2PSK，$P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{E/n_0}\cos\varphi\right)$
- 群同步
  - 集中式插入法

    巴克码

    $R(j) = \sum\limits_{i=1}^{n-j} x_i x_{i+j} = \begin{cases} n & j = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pm 1 & 0 < j < n \\ 0 & j \ge n \end{cases}$
  - 分散式插入法
  - 群同步性能

    漏同步概率 $P_l = 1 - \sum\limits_{r=0}^{m} C_n^r p^r (1-p)^{n-r}$，

    其中 p 为码元错误概率，n 为群同步码组长度，m 为码组允许最大错码数

    假同步概率 $P_f = \frac{\sum\limits_{r=0}^{m} C_n^r}{2^n}$