

通信原理学习提要

第1部分 通信原理公式和内容提纲	1
第一章 绪论	1
1.引言	1
2.通信系统的组成	1
1) 模拟通信系统	1
2) 数字通信系统	1
3.通信分类	1
4.信息及其度量	2
第二章 随机信号分析	2
1.引言	2
2.随机过程	2
1) 随机变量到随机过程的推广	2
2) 随机过程的数学刻画	3
3) 三个常用的统计量：均值、方差、自相关	3
3.平稳的随机过程和各态历经性	3
1) 狭义平稳	3
2) 广义平稳（宽平稳、二阶平稳）	3
3) 时间平均及其引入的统计量	3
4) 各态历经性就是可以用时间平均统计量代替概率平均统计量的随机过程	4
4.平稳随机过程的自相关和功率谱	4
5.高斯随机过程（高斯噪声）	4
1) 窄带高斯噪声	4
2) 理想低通高斯噪声	5
3) 理想宽带（无线宽）高斯噪声	5
6.平稳过程通过确知的线性时不变系统	5
第三章 信道	6
1.引言	6
1) 信道就是传输媒介	6
2) 广义信道和狭义信道	6
2. 信道容量	6
1) 香农公式	6
2) 香农公式揭示带宽和功率（信噪比）可以互换	7
3) 二进制对称信道容量（计算量极大，但是去年考到）	7
3. 无线多径信道	7
第四章 模拟调制系统	8
1.引言	8
1) 调制的目的和意义	8
2) 载波分类	8
3) 调制信号与基带信号	8
4) 模拟调制分类	8
2.线性调制	8

3.非线性调制（角度调制）	9
4.各种模拟调制性能的比较.....	10
5.频分复用.....	10
第五章 数字基带传输系统	10
1. 数字基带传输的基本模型.....	10
2. 常见基带波形.....	11
3. 差分编码和差分波形.....	11
4. 数字信号功率谱.....	11
5. 线路编码.....	12
1) 线路编码的几个要求.....	12
6.码间干扰和无码间干扰的条件.....	12
7.部分响应系统.....	13
1) 内奎斯特第二准则.....	13
2) 预编码的作用.....	13
3) 二进制第一类部分响应（双二进制）	13
4) 二进制第四类部分响应（改进型双二进制）	13
5) 一般部分响应的通式.....	14
8. 无码间干扰只有白噪声条件下的性能分析.....	14
9.时域均衡.....	15
第六章 数字调制系统	15
1. 引言.....	15
2. 二进制数字调制.....	15
3. 多进制调制.....	16
4. MSK 的有关知识点	17
第七章 模拟信号的数字传输(A/D 变换).....	18
1. 引言.....	18
2. 抽样.....	18
1) 三种抽样.....	18
2) 抽样定理.....	18
3) 带通信号的抽样.....	18
3. 量化和编码.....	18
1) 均匀量化及重要公式.....	18
2) 均匀量化的几个重要例子.....	19
4. 非均匀量化编码.....	19
1) 非均匀量化和编码简介.....	19
2) A 律 13 折线量化编码.....	19
5. 时分复用和帧结构.....	19
第八章 数字信号的最佳接收	20
1. 引言.....	20
2. 最大似然率和最大似然比准则和接收机.....	20
3. 几个重要公式.....	20
4. 匹配滤波器.....	20
1) 匹配滤波器的时域表示和频域表示.....	20
2) 匹配滤波器等价于相关器.....	21

3) 一些公式.....	21
4) 最佳接收机与同步相干接收机的性能比较.....	21
5) 最佳接收机系统.....	21
第九章 差错控制编码	21
1. 引言.....	21
2. 几种简单的检错码.....	22
3. 线性分组码的常识.....	22
1) 重要参数和性能.....	22
2) 监督阵和生成阵.....	22
3) 常见的例子.....	22
第十章 同步原理	22
1. 引言.....	22
2. 载波同步.....	23
3. 位同步.....	23
4. 群同步.....	23
1) 常识.....	23
2) PCM30/32 系统的帧结构和同步	23
3) 帧同步码的设计.....	23
第 2 部分模拟试题	24

第 1 部分 通信原理公式和内容提纲

第一章 绪论

1.引言

意义和目的。

2.通信系统的组成

1) 模拟通信系统

什么是模拟信号？模拟信号双连续。

2) 数字通信系统

什么是数字信号？数字信号双离散。介于数字和模拟之间的信号 PAM。

数字通信的优点： 1. 可以中继再生，消除噪声和干扰的积累； 2. 可以实现差错控制； 3. 可以利用数字信号处理技术； 4. 可以方便加密。

缺点： 占用带宽较大。例如模拟话音 4kHz，数字信号 64kb/s。

3.通信分类

1) 按消息特征分

电报、电话、图像、视频

2) 按调制方式

见 P4 表 1-1

3) 按信号特征分：模拟、数字

4) 按传输媒介分：有线、无线

5) 按复用方式分：频分、时分、码分、空分

4.信息及其度量

1) 信息量的定义

$$I = \log_2(1/P) \text{ (bits/s)}$$

2) M 进制信号的信息量、带宽和频带利用率等公式

$$I = \log_2 M, \quad P = 1/M, \quad B_1 = 1/T_s \quad (\text{信号第一零点带宽})$$

$$\text{多进制和二进制的: } T_s = nT_b, \quad M = 2^n, \quad B = 1/2T_s \quad (\text{奈奎斯特带宽})$$

$$\beta = R_B/B = 2(B/\text{Hz}) = 2\log_2 M \text{ (bits/s/Hz)} \quad (\text{采用矩形波形滤波器信道时})$$

3) 平均信息量就是熵

$$H = -\sum_{i=1}^M P_i \log_2 P_i$$

4) 传码率（数码率、码元速率、符号速率）和传信率的关系

$$R_B = \frac{1}{T_s}, \quad R_b = \frac{1}{T_b}, \quad R_b = R_B \log_2 M \text{ (bits/s)}$$

5) 误码率（误符号率）和误信率（误比特率）之间的关系

$$\text{当 } M = 2 \text{ 时: } P_e = P_b$$

$$\text{当 } M > 2 \text{ 时: } P_e > P_b, \quad \text{当采用格雷编码时 } P_b \approx \frac{1}{n} P_e$$

注：误码不一定误信，误信一定误码。故误码率总是大于误信率。

第二章 随机信号分析

1.引言

2.随机过程

1) 随机变量到随机过程的推广

随机变量是随机过程的时间抽样，随机过程是随机变量多了时间的一维推广。

R.V. $a \Rightarrow$ R.P. $a(t)$

样本 \Rightarrow 实现 (realization)

2) 随机过程的数学刻画

一维、二维..... n 维概率分布和概率分布密度 PDF

(见书上定义式)

3) 三个常用的统计量：均值、方差、自相关

$$E[\xi(t)] = a_{\xi}(t) = m_{\xi}(t)$$

$$\sigma_{\xi}^2(t) = D[\xi(t)] = \text{Var}[\xi(t)] = E\{\xi(t) - E[\xi(t)]\}^2$$

$$\sigma_{\xi}^2(t) = E[\xi^2(t)] - \{E[\xi(t)]\}^2$$

$$R_{\xi}(t_1, t_2) = E[\xi(t_1)\xi(t_2)]$$

3. 平稳的随机过程和各态历经性

1) 狭义平稳

所有的统计特性都具有时间平移不变性。

2) 广义平稳 (宽平稳、二阶平稳)

一阶二阶统计特性具有时间平移不变性。通信里平稳基本指此。两个要求：

$$\sigma_{\xi}(t) = \sigma_{\xi}, \quad R_{\xi}(t_1, t_2) = R_{\xi}(t_1 - t_2), \quad \text{且} \quad \sigma_{\xi}^2(t) = \sigma_{\xi}^2$$

3) 时间平均及其引入的统计量

$$\text{时间平均算子: } A(\cdot) \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (\cdot) dt$$

$$\text{时间平均均值: } \bar{a}_{\xi} = A[\xi(t)]$$

$$\text{时间平均方差: } \bar{\sigma}_{\xi}^2 = A\{\xi(t) - A[\xi(t)]\}^2$$

时间平均自相关： $\bar{R}_{\xi}(t_1, t_2) = A[\xi(t_1)\xi(t_2)]$

当时间平均统计量等于统计平均统计量时，就称为各态历过程。

4) 各态历经性就是可以用时间平均统计量代替概率平均统计量的随机过程

$$\bar{a}_{\xi} = a_{\xi}, \quad \bar{\sigma}_{\xi}^2 = \sigma_{\xi}^2, \quad \bar{R}_{\xi}(\tau) = R_{\xi}(\tau)$$

4. 平稳随机过程的自相关和功率谱

1) 二阶统计量的常识（见书）

1. 平均功率（总功率）

$$P_{\xi} = E[\xi^2(t)]$$

2. 直流功率（稳态分量功率）

$$a_{\xi}^2 = \{E[\xi(t)]\}^2$$

3. 交流功率（随机分量功率）

$$\sigma_{\xi}^2 = E[\xi^2(t)] - \{E[\xi(t)]\}^2 = R_{\xi}(0) - a_{\xi}^2$$

2) 功率谱（功率谱就是信号功率在频率域的分布情况）

维纳-辛钦公式

$$P_{\xi}(\omega) = \mathcal{F}[R_{\xi}(\tau)]$$

注： $P_{\xi}(\omega) = P_{\xi}(2\pi f)$ 简记作 $P_{\xi}(f)$ 。

5. 高斯随机过程（高斯噪声）

高斯随机过程的刻画：主要用来对噪声进行建模，称高斯噪声。都具有三个性质：

1. 平稳性；2. 零均值性；3. 加性。

1) 窄带高斯噪声

莱斯（Rice）正交表达式，莱斯包络表达式，同相分量，正交分量，包络过程，相位过程，功率谱示意图，功率，方差。

主要公式和表达式（见书）：

高斯分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\xi(t) = \xi_c(t) \cos \omega_c t - \xi_s(t) \sin \omega_c t = a_\xi(t) \cos(\omega_c t + \phi_\xi(t))$$

$$a_\xi^2 = a_{\xi_c}^2 = a_{\xi_s}^2$$

$$P_{\xi_s}(\omega) = P_{\xi_c}(\omega) = \text{LPF}\left[P_\xi(\omega + \omega_c) + P_\xi(\omega - \omega_c)\right]$$

$\xi(t), \xi_c(t), \xi_s(t)$ 同分布、同功率、不同频谱。

$a_\xi(t), \phi_\xi(t)$ 分别为一维瑞利分布，一维均匀分布。

2) 理想低通高斯噪声

功率谱，方差，带宽，自相关。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_\xi^2}}, \quad a_\xi^2 = n_0 B$$

方差就是总功率，因为无直流功率。

3) 理想宽带（无线宽）高斯噪声

功率谱，自相关，功率无限大，模型的意义。

$a_\xi^2 = \infty$ ，注：功率无限大

$$P_\xi(f) = n_0 / 2$$

注：概率分布和功率分布是两个不相关的概念。

6. 平稳过程通过确知的线性时不变系统

三个表达式及其含义，高斯性不变。

$$1) \quad \xi_o(t) = h(t) * \xi_i(t)$$

$$2) \quad P_{\xi_o}(\omega) = |H(\omega)|^2 P_{\xi_i}(\omega)$$

3) $a_{\xi_0} = H(0)a_{\xi_i}$ ，可见直流的频率为零。

第三章 信道

1.引言

1) 信道就是传输媒介

分为有线信道（明线、电缆、光缆）和无线信道（地波传播信道、短波电离层信道、微波视距中继信道、卫星中继信道、各种散射信道）。

2) 广义信道和狭义信道

广义信道就是信道模型，狭义信道就是物理信道。

调制信道模型（如书图）：恒参信道和随参信道

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

当 $k(t)$ 慢变或不变时：恒参信道；

当 $k(t)$ 快变时：随参信道。

编码信道模型：误码率公式

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

2. 信道容量

1) 香农公式

容量的含义，几个连续信道容量的例子。

$$C = B \log_2(1 + S / N)$$

2) 香农公式揭示带宽和功率（信噪比）可以互换

牺牲带宽换信噪比：扩谱通信，星际通信

牺牲信噪比换带宽：多进制信号

香农公式的提示：C 一定时，带宽和信号功率（信噪比）可以互换。

3) 二进制对称信道容量（计算量极大，但是去年考到）

设发 $x_1=0, x_2=1$ ，收 $y_1=0, y_2=1$ 。

①求信源熵 $H(x) = P(x_1)\log_2 \frac{1}{P(x_1)} + P(x_2)\log_2 \frac{1}{P(x_2)}$

②已知转移概率求后验概率（贝叶斯公式）：

$$P(x_1 | y_1) = \frac{P(x_1)P(y_1 | x_1)}{P(x_1)P(y_1 | x_1) + P(x_2)P(y_1 | x_2)}, \quad P(x_2 | y_1) = 1 - P(x_1 | y_1)$$

$$P(x_2 | y_2) = \frac{P(x_2)P(y_2 | x_2)}{P(x_1)P(y_2 | x_1) + P(x_2)P(y_2 | x_2)}, \quad P(x_1 | y_2) = 1 - P(x_2 | y_2)$$

③已知转移概率求输出概率：

$$P(y_1) = P(x_1)P(y_1 | x_1) + P(x_2)P(y_1 | x_2)$$

$$P(y_2) = 1 - P(y_1)$$

④求条件熵：

$$H(x|y) = -\{P(y_1)[P(x_1|y_1)\log_2 P(x_1|y_1) + P(x_2|y_1)\log_2 P(x_2|y_1)] \\ + P(y_2)[P(x_1|y_2)\log_2 P(x_1|y_2) + P(x_2|y_2)\log_2 P(x_2|y_2)]\}$$

⑤求 BSC 信道容量

$$C = H(x) - H(x|y)$$

3. 无线多径信道

衰落、相干（关）带宽、频率选择衰落信道、相干时间、时间选择衰落信道、平坦衰落信道。

第四章 模拟调制系统

1.引言

1) 调制的目的和意义

1.信道的要求； 2. 天线的要求； 3. FDM 的要求

2) 载波分类

正弦载波、脉冲载波（PAM,PCM,PPM,PDM）

3) 调制信号与基带信号

数字基带和模拟基带信号：模拟基带比较单纯，数字基带复杂。

4) 模拟调制分类

线性调制（AM, DSB, VSB, SSB）和非线性调制（角度调制：PM,AM）

2.线性调制

1) 针对 AM, DSB, VSB, SSB 掌握：发射机框图、接收机框图、时间域表达式、频谱、带宽、波形图（见书）

2) 考试常用的式子

$$s_{AM}(t) = (A + m(t)) \cos \omega_c t, \quad s_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t, \quad s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \omega_c t \mp \frac{1}{2} m(t) \sin \omega_c t$$

$$G_{DSB} = 2, \quad G_{SSB} = 1, \quad G_{VSB} = 1.x$$

$$G_{AM} = \frac{\overline{2m^2(t)}}{A^2 + \overline{m^2(t)}} \quad (\text{相干、非相干解调同})$$

单音调幅：

$$s_{AM}(t) = (A + A_m \cos \omega_m t) \cos \omega_c t = A(1 + \beta_{AM} \cos \omega_m t) \cos \omega_c t$$

调幅指数 $\beta_{AM} = A_m / A$ ，可见调幅指数是一个小于等于 1 的正数。

3) AM 比其它线性调制的优缺点

无论是带宽效率还是功率效率 AM 都是最低，但是 AM 生存最好，因为只有它可以采用包络解调（有门限效应，但是不易察觉）。

3.非线性调制（角度调制）

1) 调频和调相的关系

通过调频可以实现调相，反之亦然。

2) FM 发射机框图、接收机框图、时间域表达式、频谱、带宽、波形图

注：PM 基本不用。

3) 考试常用的式子

$$s_{PM}(t) = A \cos(\omega_c t + k_{PM} m(t))$$

$$s_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + \int_{-\infty}^t k_{FM} m(\tau) d\tau)$$

卡松（Carlson）公式：

$$B_{FM} \approx 2(f_m + \Delta f)$$

$$\text{其中最大频率偏移为 } \Delta\omega = \left| \frac{d\varphi(t)}{dt} \right|_{\max} = k_{FM} |m(t)|_{\max}$$

$$\frac{S_o}{N_o} = \frac{3A^2 k_{FM}^2 \overline{m^2(t)}}{8\pi^2 n_o f_m^3}$$

4) 一些常见的例子。

5) 单音调频（最简单的调频 FM）的常用式子

$$s_{FM}(t) = A \cos(\omega_c t + \beta_{FM} \sin \omega_m t), \text{ 其中调频指数为 } \beta_{FM} = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \text{ (代表了非线性扩谱倍数)}.$$

$$B_{FM} \approx 2(f_m + \Delta f) = 2f_m \left(1 + \frac{\Delta f}{f_m}\right) = 2f_m (1 + \beta_{FM})$$

$$G_{FM} = 3\beta_{FM}^2 (\beta_{FM} + 1)$$

典型的 β_{FM} : $1 \leq \beta_{FM} \leq 10$ 。当 $\beta_{FM} < 1$ 时，称窄带调频。

6) 门限效应

所有非线性（包络）解调都有门限效应，但是 FM 格外突出。这是因为 FM 的制
度增益极高的缘故。

4.各种模拟调制性能的比较

什么是公平的比较环境？

同样的接收信号功率，同样的噪声功率谱密度，同样的基带信号（调制信号）

$$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{DSB} = 2 \left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{DSB} = 2 \cdot \frac{S_i}{n_o \cdot 2f_m} = \frac{S_i}{n_o f_m}$$

$$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{SSB} = \left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{SSB} = \frac{S_i}{n_o f_m}$$

$$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{AM} = \left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{AM} \frac{\overline{2m^2(t)}}{A^2 + \overline{m^2(t)}} = \frac{S_i}{n_o \cdot 2f_m} \cdot \frac{2 \cdot A^2/2}{A^2 + A^2/2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{S_i}{n_o f_m}$$

$$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{FM} = \left(\frac{S_i}{N_i}\right)_{FM} \cdot 3\beta_{FM}^2 (\beta_{FM} + 1) = \frac{S_i}{n_o \cdot 2f_m (\beta_{FM} + 1)} \cdot 3\beta_{FM}^2 (\beta_{FM} + 1) = 1.5\beta_{FM}^2 \cdot \frac{S_i}{n_o f_m}$$

在公平的比较条件下，性能最好的仍然是 FM，对于宽带 FM，调频指数远
大于 1。其次是 DSB 和 SSB 并列第二名，VSB 的性能在 DSB 和 SSB 之间。

5.频分复用

复用的种类，复用和多址的关系。

第五章 数字基带传输系统

1. 数字基带传输的基本模型

三个滤波器：发送、信道、接收

三个滤波器级联合成的滤波器为 $H(f)$ ，称作合成信道滤波器：

$$H(f) = G_T(f)C(f)G_R(f)$$

$$h(t) = g_T(t) * c(t) * g_R(t)$$

接收机的输入数字波形为

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n h(t - nT_s) + n_R(t)$$

其中 $n_R(t) = n(t) * g_R(t)$, $P_{n_R}(f) = \frac{n_o}{2} |G_R(f)|^2$

2. 常见基带波形

归零 RZ 与不归零 NRZ, 占空比和信号带宽, 单极性和双极性

第一零点带宽 (又称为主瓣带宽) 为 $B \approx \frac{1}{\tau}$ (条件是脉冲是矩形的)。

占空比为 $\frac{\tau}{T_s}$

内奎斯特带宽为 $B_N = \frac{1}{2} R_B = \frac{1}{2T_s}$ 。

3. 差分编码和差分波形

双极性信号容易在接收机方发生倒相 (相位识别错误)。为什么差分编码可以防止差错传播?

1) 发“1”过渡 (又称发“1”跳变) 的差分编码。设编码后得到的差分序列为 $\{b_n\}$,

其中 $b_n \in \{0,1\}$, 编码公式:

$$b_n = a_n \oplus a_{n-1} = a_n + a_{n-1} \bmod 2。$$

译码 (解码) 公式可以表示为:

$$a_n = b_n \oplus b_{n-1} = b_n + b_{n-1} \bmod 2$$

4. 数字信号功率谱

连续谱、离散谱: 离散谱在定时 (位同步) 中的作用。

矩形脉冲的功率谱和占空比的关系

二进制双极性等概信号的功率谱为

$$P(f) = \frac{\tau^2}{4T_s} \text{Sa}^2(\pi f \tau) \quad (\text{RZ})$$

$$P(f) = \frac{T_s}{4} \text{Sa}^2(\pi f T_s) \quad (\text{NRZ})$$

二进制等概单极性不归零通断信号的功率谱为

$$P(f) = \frac{\tau^2}{4T_s} \text{Sa}^2(\pi f \tau) + \frac{1}{4} \delta(f), \quad \text{可能还有离散谱位于 } \frac{n}{T_s}。$$

$$P(f) = \frac{T_s}{4} \text{Sa}^2(\pi f T_s) + \frac{1}{4} \delta(f) \quad (\text{NRZ})。$$

5. 线路编码

1) 线路编码的几个要求

对线路码有以下几点要求

6. 码间干扰和无码间干扰的条件

1) 由信道模型得出码间干扰模型

抽样值为

$$\begin{aligned} r(kT_s) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n h(kT_s - nT_s) + n_R(kT_s) \\ &= a_k h(0) + \sum_{n \neq k} a_n h(kT_s - nT_s) + n_R(kT_s) \end{aligned}$$

明显地分为三个部分： $a_k h(0)$ 是第 k 个码元的信号部分， $\sum_{n \neq k} a_n h(kT_s - nT_s)$ 是其它码元对第 k 个码元的干扰，即码间干扰。

2) 时域无码间干扰条件

$$h(kT_s) = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

3) 频域无码间干扰条件（内奎斯特准则）

$$\begin{aligned} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H(\omega - \frac{2\pi n}{T_s}) &= T_s \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} H(f - \frac{n}{T_s}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} H(f - nR_B) = c \end{aligned}$$

4) 信道举例

理想低通信道、滚降低通信道、频带利用率、信号带宽、信道第一零点带宽、内

奎斯特带宽（无码间干扰最小带宽）

7.部分响应系统

1) 内奎斯特第二准则

可以通过编码引入可控的码间干扰，改善信号频谱适应信道；减小时域波形的尾巴，降低接收机对于定时抖动的敏感度；通过相关编码引入的码间干扰在接收端可以通过译码消除；付出的代价是系统的复杂度和信噪比。

2) 预编码的作用

消除差错传播，同时不改变频谱分布。

3) 二进制第一类部分响应（双二进制）

有关公式和框图

预编码方程为：

$$a_n = b_n + b_{n-1} \bmod 2$$

或者写为 $a_n = b_n \oplus b_{n-1}$

$$b_n = a_n \oplus b_{n-1} = a_n - b_{n-1} \bmod 2$$

模 2 加等价于模 2 减，等价于异或。发送的序列是相关编码序列 $\{c_n\}$ ，相关编码方程为

$$c_n = b_n + b_{n-1}$$

在接收机一方，译码公式为

$$a_n = c_n \bmod 2$$

4) 二进制第四类部分响应（改进型双二进制）

预编码方程为：

$$a_n = b_n - b_{n-2} \bmod 2$$

或者写为

$$a_n = b_n \oplus b_{n-2}$$

$$b_n = a_n \oplus b_{n-2} = a_n + b_{n-2} \bmod 2$$

发送的序列是相关编码序列 $\{c_n\}$ ，相关编码方程为

$$c_n = b_n - b_{n-2}$$

译码公式为 $a_n = c_n \bmod 2$ 。

5) 一般部分响应的通式

采用 M 进制序列第四类部分响应，原始的 M 进制信息序列 $\{a_n\}$ ，
 $a_n \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ ，经过一个简单的预编码电路，编称为预编码序列 $\{b_n\}$ ，
 $b_n \in \{0, 1\}$ 。预编码方程为

$$a_n = b_n - b_{n-2} \bmod M$$

或者写为

$$b_n = a_n + b_{n-2} \bmod M$$

序列 $\{b_n\}$ 并不是上信道发送的序列，真正发送的序列是相关编码序列 $\{c_n\}$ ，相关编码方程为

$$c_n = b_n - b_{n-2}$$

译码公式为

$$a_n = c_n \bmod M$$

8. 无码间干扰只有白噪声条件下的性能分析

模拟系统的性能指信噪比，数字系统的性能指误码率。

眼图是最原始判断数字通信系统好坏的方式。

9.时域均衡

1) 模拟信号用频域均衡，数字信号用时域均衡

$$y_n = \sum_{j=-K}^K c_j x_{n-j}, \quad n = -(K+N), \dots, 0, \dots, (K+N)$$

2) 时域均衡器的结构：横向滤波器，FIR 滤波器

3) 均衡的两个基本准则：峰值畸变准则和均方畸变准则

目标准则：

$$y_0 = 1, \quad y_k = 0, \quad \text{当 } -K \leq k \leq K。 \text{超出范围不在掌握中。}$$

均衡器输入端的峰值失真定义为

$$D_0 = \frac{1}{x_0} \sum_{\substack{i=-N \\ i \neq 0}}^N |x_i|$$

而均衡器输出端的峰值失真为

$$D = \frac{1}{y_0} \sum_{\substack{n=-(K+N) \\ n \neq 0}}^{K+N} |y_n| = \sum_{\substack{n=-(K+N) \\ n \neq 0}}^{K+N} \left| \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j x_{n-j} \right|$$

归一化令 $y_0 = 1$ 。

4) 关于横向滤波器系数的计算

例子计算量往往很大。最好准备带矩阵计算的计算器，我用的 CASIO fx-991ES PLUS。

第六章 数字调制系统

1. 引言

什么是数字调制？数字调制的目的和意义。

2. 二进制数字调制

1) 针对 ASK, PSK, DPSK, FSK 掌握：发射机框图、接收机框图、时间域表达式、频谱、带宽、波形图

2) 相干解调和非相干解调各自的优势和劣势

3) 常用的公式总结

基带信号 $m(t)$ 表示为 $m(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s)$ 。

$$x_{2ASK}(t) = m(t) \cos \omega_c t, \quad a_n \in \{0, 1\}, \quad x_{2PSK}(t) = m(t) \cos \omega_c t, \quad a_n \in \{-1, 1\}$$

$$x_{FSK}(t) = \begin{cases} \sum_n \overline{a_n} g(t - nT_s) \cos \omega_1 t \\ \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega_2 t \end{cases} = \overline{m(t)} \cos \omega_1 t + m(t) \cos \omega_2 t$$

$$= 2ASK_1 + 2ASK_2$$

$$B_{2ASK} = B_{2PSK} = 2f_s, \quad B_{2FSK} = 2f_s + |f_1 - f_2|。$$

表二进制数字调制系统的性能比较

调制方式	解调方式	误码率 P_e	近 似 公 式 ($r \gg 1$)
2ASK	相干解调	$\frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{r}/2)$	$\frac{1}{\sqrt{\pi r}} e^{-r/4}$
	非相干解调		$\frac{1}{2} e^{-r/4}$
2FSK	相干解调	$\frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{r}/2)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-r/2}$
	非相干解调	$\frac{1}{2} e^{-r/2}$	
2PSK	相干解调	$\frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{r})$	$\frac{1}{2\sqrt{\pi r}} e^{-r}$
2DPSK	差分相干解调	$\frac{1}{2} e^{-r}$	

3. 多进制调制

1) 为什么要用多进制调制

主要是节省带宽。但 MFSK 并非如此。

2) QPSK 和 OQPSK

3) QAM 的优势

星座图、格雷编码和原理框图、频带利用率等。

表 多进制数字带通系统性能比较

名称	信号第一零点带宽	频谱效率（当信道带宽取信号带宽时）
双极 性相 干 MASK	$B_{MASK} = 2/T_s \text{ (Hz)}$	$\eta_{MASK} = \frac{kf_s}{B_{MASK}}$ $= \frac{k}{2} \text{ (bit/sec/Hz)}$
MFSK	$B_{MFSK} = f_M - f_1 + 2f_s$ 其中 $f_s = \frac{1}{T_s}$	$\eta_{MFSK} = \frac{2k}{4 + n(M-1)}$ (bit/sec/Hz) 其中 $k = \log_2 M$
相干 MPSK	$B_{MPSK} = \frac{2}{T_s}$	$\eta_{MPSK} = \frac{R_b}{B_{MPSK}} = \frac{\log_2 M}{2}$ (bits/s/Hz)

4. MSK 的有关知识点

1) MSK 属于 CPFSK，其常用关系式

两个实际载波： $f_1 = f_c - \frac{1}{4T_s} = f_c - \frac{1}{4}R_B$ 和 $f_2 = f_c + \frac{1}{4T_s} = f_c + \frac{1}{4}R_B$

2) MSK 的波形图和相位图

①相位连续，波形连续；②每一个码元时间里相位线性增加（减小） $\pi/2$ 。

3) MSK 的优点是什么？

时间域的连续意味着频率域功率集中，相位连续是深层次的连续。

第七章 模拟信号的数字传输(A/D 变换)

1. 引言

抽样、量化、编码——译码、LPF 的对应

抽样：时间上初步离散化；量化：电平上初步离散化；编码：时间和电平上进一步离散化。

2. 抽样

1) 三种抽样

理想抽样（冲激抽样）、平顶抽样、曲顶抽样

掌握：框图、波形图、频谱图、抽样率、抽样间隔

2) 抽样定理

最小抽样率 $f_{s\min} = 2f_m$ ，抽样间隔 $T_s = 1/f_s$ ， $\omega_s = 2\pi f_s$ 。

3) 带通信号的抽样

几个常见的公式

3. 量化和编码

1) 均匀量化及重要公式

量化台阶（量化间隔）、量化级（量化电平）、量化误差（量化噪声）、量化信噪比。量化电平个数： $M = 2^n$ （ n 为码组长），量化台阶（间隔） $\Delta V = \frac{2V}{M}$ （ V 称为过载电平）。

$$\text{量化信号功率 } S_q = E(y^2) \approx E(x^2) = \overline{x^2} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx$$

$$\text{量化噪声功率 } N_q = E(x - y)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - y)^2 f(x) dx$$

3) 两种带宽

信号的第一零点带宽，内奎斯特带宽（信道的无码间干扰最小带宽）

第八章 数字信号的最佳接收

1. 引言

2. 最大似然率和最大似然比准则和接收机

相关器、由准则导入相关接收机的结构

$$\left. \begin{aligned} \frac{f(y|s_1)}{f(y|s_2)} &> \frac{P(s_2)}{P(s_1)}, \text{判为 } s_1 \text{ 出现 (判决输出 } x_1) \\ \frac{f(y|s_1)}{f(y|s_2)} &< \frac{P(s_2)}{P(s_1)}, \text{判为 } s_2 \text{ 出现 (判决输出 } x_2) \end{aligned} \right\}$$

上式称为似然比判决准则， $f(y|s_1)$ 称为 s_1 的似然函数， $f(y|s_2)$ 称为 s_2 的似然函数。如果先验等概，则变为

$$\left. \begin{aligned} f(y|s_1) &> f(y|s_2), \text{判为 } s_1 \text{ 出现 (判决输出 } x_1) \\ f(y|s_1) &< f(y|s_2), \text{判为 } s_2 \text{ 出现 (判决输出 } x_2) \end{aligned} \right\}$$

称为最大似然判决准则。

3. 几个重要公式

相关系数、归一化信噪比、误码率、双极性信号、正交信号、通断信号

4. 匹配滤波器

1) 匹配滤波器的时域表示和频域表示

匹配滤波器本质是功率匹配，放在接收机最前端，有高频和低频之分。

2) 匹配滤波器等价于相关器

所有用相关器的接收机都能用匹配滤波器代替

3) 一些公式

等能等概条件下:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}} \right]$$

1) $\rho = -1$ 时, $s_1(t) = -s_2(t)$, 错误概率最小;

2) $\rho = 0$ 时, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 互相正交。

4) 最佳接收机与同步相干接收机的性能比较

	相干接收机	最佳接收机
相干2PSK	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r})$	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right)$
相干2FSK	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r/2})$	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right)$
相干2ASK	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}/2)$	$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4n_0}} \right)$

5) 最佳接收机系统

理想信道下和非理想信道下

第九章 差错控制编码

1. 引言

随机差错和突发差错、码矢量和差错矢量（图形、图案）、编码效率

差错控制方式：FEC、ARQ、HEC

2. 几种简单的检错码

奇偶校验（监督）码、方阵码（抗突发差错）

3. 线性分组码的常识

1) 重要参数和性能

合法码组、非法码组、汉明重量、汉明距离、最小汉明重量、最小汉明距离、纠错能力和检错能力

2) 监督阵和生成阵

码率 $R = \frac{k}{n}$ ，最小汉明距离等于最小汉明重量 $d_{\min} = w_{\min}$ 。

两个公式： $d_{\min} \geq 2t+1$ 和 $d_{\min} \geq e+1$ 。

典型线性分组码

$HA^T = 0$ （监督方程）， $A = mG$ （生成方程）， $H = (P \ I_r)$ ， $G = (I_k \ Q)$ ， $P = Q^T$ ，

$r = n - k$ （监督位数）；

监督阵 $H: r \times n$ ，生成阵 $G: k \times n$ ， $A: 1 \times n$ ， $m: 1 \times k$

$A = (a_{n-1} \ \dots \ a_{n-k} \ \vdots \ a_{r-1} \ \dots \ a_0)$ （码矢量）

3) 常见的例子

生成阵和监督阵的互换、利用校正子纠错、设计纠错码。

第十章 同步原理

1. 引言

载波同步、位同步、群同步的目的。

2. 载波同步

重建载波，用于相干解调。

- 1) 插入导频法
- 2) 直接法

3. 位同步

重建时钟，用于接收机的基础时钟。

- 1) 插入导频法
- 2) 直接法：微分整流滤波法

4. 群同步

1) 常识

起止式同步、连贯式插入法（集中式）、间隔式插入、帧同步码、维持态、捕捉态、前方保护、后方校核、漏同步、同步周期。

2) PCM30/32 系统的帧结构和同步

帧同步码位于偶帧的 TS0 时隙后 7 位：0011011。同步周期为 250 微秒。

3) 帧同步码的设计

巴克码：具有尖锐的局部自相关特性，便于捕捉和识别。

第 2 部分模拟试题

一、选择题（每题 2 分，共 60 分）

- 1、通信双方能同时进行发送和接收的通信工作方式称_____。
A) 单工通信 B) 半双工通信 C) 全双工通信
- 2、信道滚降会导致信号的时域波形“尾巴”衰减_____。
A) 变慢 B) 变快 C) 速度不变
- 3、平稳信号的方差、均值的平方和零时差的自相关分别代表_____。
A) 直流功率、交流功率和平均功率 B) 交流功率、直流功率和平均功率
C) 平均功率、直流功率和交流功率
- 4、明线、同轴电缆和光缆是_____信道。
A) 无线随参 B) 有线恒参 C) 随参
- 5、非线性解调器常常具有的一种现象称为_____。
A) 频率失真 B) 谐波失真 C) 门限效应
- 6、根据连续信道容量香农公式，当信道带宽 $B \rightarrow \infty$ 时，信道容量_____。
A) 趋于 ∞ B) 趋于 0 C) 趋于 $1.44S/n_0$
- 7、OQPSK 与 QPSK 相比功率谱的主瓣包含的功率_____。
A) 更少 B) 更多 C) 一样
- 8、A 律 13 折线量化中最大的和最小的量化间隔相差_____倍。
A) 32 B) 128 C) 64
- 9、信道带宽等于 64QAM 信号主瓣带宽一半，则频带利用率为_____ b/s/Hz。
A) 6 B) 4 C) 3
- 10、单音调频系统的调频指数为 3，则制度增益为_____。
A) 90 B) 36 C) 108
- 11、当均匀量化电平足够多且量化间隔为 10 时，量化噪声功率约为_____。
A) 8.3 B) 5 C) 6.5
- 12、MSK 信号相位的连续性导致信号的频谱分量_____。
A) 集中于主瓣 B) 分散于旁瓣 C) 在主瓣和旁瓣上均匀分布
- 13、均匀量化编码的编码位数每增加 1 位，量化信噪比改善_____分贝。
A) 3 B) 4 C) 6
- 14、“0”、“1”等概出现的双极性信号的功率谱不含_____。
A) 连续谱 B) 离散谱 C) 连续谱和离散谱
- 15、HDB₃ 码中连零数最多有_____个。
A) 3 B) 2 C) 4
- 16、八进制数字信号传码率为 100B，传信率为_____。若传信率不变，改为二进制传输，则传码率为_____。
A) 100b/s, 300B B) 300b/s, 300B C) 200b/s, 200B
- 17、模拟调制的制度增益由小到大的顺序为_____。
A) FM, MSK, SSB B) DSB, SSB, AM C) AM, DSB, FM

- 18、窄带高斯过程加上正弦波，其包络服从_____分布。
A) 均匀 B) 莱斯 C) 瑞利
- 19、A 律 13 折线量化编码含_____位段落码_____位段内码。
A) 11, 8 B) 3, 4 C) 8, 3
- 20、模拟信号的数字化分为三步依次为：____、____和____。
A) 调制，量化，解调 B) 抽样，量化，编码 C) 抽样，编码，传输
- 21、DSB 信号的相干解调用到的是_____同步。
A) 载波 B) 码元 C) 帧
- 22、AM 解调可以采用_____，价格最节省。
A) 相干解调器 B) 鉴频器 C) 包络解调器
- 23、位同步的两种方法是_____法和_____法，其中_____法属于自同步法。
A) 插入导频，直接，插入导频 B) 插入导频，直接，直接
C) 直接，相干，直接
- 24、传码率为 400kB，无码间干扰最小信道带宽为____，频带利用率为____。
A) 100kHz, 2B/Hz B) 200kHz, 2B/Hz C) 150kHz, 2B/Hz
- 25、已知码组的最小汉明距为 6，则最多可检测_____位错，纠正_____位错。
A) 6, 2 B) 5, 2 C) 5, 3
- 26、数字电话的单路话音的抽样率一般为_____kHz，传码率为_____kB。
A) 8, 64 B) 6.4, 64 C) 8, 2048
- 27、奇偶监督码长为 8，则最多可检测_____位错，最小汉明距离为_____。
A) 1, 4 B) 5, 2 C) 1, 2
- 28、样值为-1111 个标准单位，A 律 13 折线编码的极性码为____，段落码为____。
A) 1, 110 B) 1, 100 C) 0, 111
- 29、DPSK 把信息加载_____上，克服了_____现象。
A) 载波，误码 B) 相位差，倒 π C) 相位，差错
- 30、数字电话信号 PDH 一次群传码率为____kB，含_____个时隙。
A) 64, 24 B) 32, 2 C) 2048, 32

二、判断题（20 分）对的打√，错的打×

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
答案										

- 1、模拟和数字通信里的频分复用 FDM 技术在光线通信里常常称为波分复用技术。
- 2、如果信号的带宽大于信道的相干带宽就能克服信道的频率选择性。
- 3、多址通信的方式有码分多址、频分多址、时分多址和空分多址等，GSM 手机属于时分多址。
- 4、线路码中 AMI 码的缺点是不能克服长连零，造成提取定时信息困难。
- 5、残余边带 VSB 信号由于残留了部分边带信号故不能采用相干解调法。
- 6、明线、电缆、光缆和无线视距中继信道都属于恒参信道。
- 7、A 律 13 折线量化编码和 HDB3 码都是信源编码。

- 8、香农公式告诉我们信道带宽和信噪比在一定条件下可以互换。
- 9、载波同步和帧同步都是数字通信特有的同步形式。
- 10、两个正交的余弦载波之间最小载频间距等于传码率。

三、简答题（20 分，每题 4 分）

- 1、试探讨基带系统无码间干扰的条件是什么？写出无码间干扰滚降系统频带利用率的表达式。
- 2、什么是二进制确知信号的最佳判决准则？试画出二进制确知信号最佳接收机的结构。
- 3、针对二进制第四类部分相应，写出预编码、相关编码和译码公式，并画出发送机结构图。
- 4、简述 m 序列特点是什么？根据特征多项式 $f(x)=x^4+x+1$ ，画出 m 序列产生器。
- 5、载波同步是实现相干解调的基础，试论述提取载波同步的平方环法。

四 已知 (5,2) 线性分组码的生成矩阵为 G 。试求 1) 监督矩阵 H ；2) 收到码矢量为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ ，求校正子 S 。问有没有错？若有错请纠正之；3) 求最小汉明距离和纠错能力。

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

五 设所有的基带模拟信号带宽为 5kHz，采用多种（PAM、PCM 和 ΔM ）时分复用方式进行传输。要求各种所发送的脉冲周期都是 2 微秒，且占空比为 50%。

- 1) 如果采用 PAM 方式进行时分复用，试求最大可以传输的信号路数；
- 2) 反过来，如果要求 10 路 PCM 信号进行时分复用，试求 PCM 编码时允许的最大量化级数；
- 3) 如果要求传 20 路 ΔM ，求抽样率；
- 4) 已知该 ΔM 编码的量阶为 0.01V，如果要求不发生斜率过载，问允许的最大基带模拟信号的斜率是多少？

六 已知二进制波形 $s_0(t)$ 与 $s_1(t)$ 为高度为 A 的两种矩形脉冲，码元周期为 T ，且相关系数为 0.5。两种码元以等概率发送，即 $P(s_0)=P(s_1)$ 。信道噪声单边功率密度谱为 n_0 。

- 1) 试设计出 $s_0(t)$ 与 $s_1(t)$ 的波形；
- 1) 试画出此二进制信号的最佳接收机模型；
- 2) 求此二信号的能量 E_0 、 E_1 ；
- 3) 计算误码率。

七 试设计一个广义 A 律 5 折线编译码器，段内有 4 个均匀量化台阶。设最小的量化台阶为 Δ 。

- 1) 试画出该压缩率的折线表示图；
- 2) 已知一个样值(PAM)为 -19Δ ，试求 PCM 码组；
- 3) 试对此 PCM 码组进行译码（加半个段内量化级），并求对应的线性码（包括极性码）。

八 数字序列分别进行 2PSK 和 2DPSK 调制，传码率为 2048kbps，载波频率为 2048kHz。码元与相位 φ 和相位变化 $\Delta\varphi$ 对应关系： $0 \rightarrow 0$ ， $1 \rightarrow \pi$ 。已知输入序列为 101101，（初始参考相位为 0）。收端信号幅度为 10mV，信道双边噪声功率谱为 $n_0/2 = 10^{-12} \text{ W/Hz}$ 。1）分别画出 2PSK 和 2DPSK 已调信号波形；2）若收端对 2DPSK 信号采用相干检测加码变换，画出检测器框图；3）求 2PSK 信号相干检测的误码率；4）求 2DPSK 信号相干检测+码反变换的误码率。

（近似公式 $\text{erfc}(\sqrt{x}) \approx (1/\sqrt{\pi x})e^{-x}$, $x \gg 1$ ）

九 已知数据的传信率为 4800bits/s，并且已知信道的传递函数的模（幅频特性）为

$$|C(f)| = \frac{1}{\sqrt{1+(f/B)^2}}, \quad |f| \leq B$$

其中， $B = 4800 \text{ Hz}$ 。如果要求合成信道为滚降系数为 1 的升余弦滤波器且，接收滤波器和发送滤波器具有同样的幅频特性，试求出它们并作图。

十 已知码的方案是重复发送五次：即 0 编成五个 0，1 编成五个 1。1）试求生成矩阵和监督矩阵；2）给定信息位 1 1 0 1，求码序列；3）求最小汉明距离和纠检错能力，并求编码效率（码率）；4）问该码是否是循环码？如果是，请给出生成多项式，并据此画出移序寄存器实现该编码器的结构图，标出寄存器的内容变化情况。