

# 通信原理习题课

## • 数字调制

■ 某2FSK系统的码元传输速率为  $2 \times 10^6$  Baud，数字信息为0时的频率为  $f_0 = 10\text{MHz}$ ，数字信息为1时的频率为  $f_1 = 14\text{MHz}$ 。解调器输入端信号幅度为  $a = 8\text{mV}$ ，信道加性白高斯噪声的功率密度谱为  $n_0 = 10^{-12} \text{ W/Hz}$ 。试求：

(1) 2FSK信号的频带宽度

(2) 非相干检测时，系统误码率

(3) 相干检测时，系统误码率(近似公式  $\text{erfc}(\sqrt{x}) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x}$ ,  $x \gg 1$ )

# 数字调制

◆[解](1)信号带宽

$$B = |f_1 - f_0| + 2R_B = (4 + 2 \times 2) \times 10^6 = 8 \text{ MHz}$$

接收端带通滤波器带宽为

$$B_1 = 2R_B = 4 \text{ MHz}$$

输入噪声功率

$$\sigma^2 = n_0 B_1 = 10^{-12} \times 4 \times 10^6 = 4 \times 10^{-6} \text{ W}$$

输入信噪比

$$r = \frac{a^2}{2\sigma^2} = \frac{8^2 \times 10^{-6}}{2 \times 4 \times 10^{-6}} = 8$$

(2)非相干检测时，系统误码率

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-r/2} = \frac{1}{2} e^{-4} = 9.16 \times 10^{-3}$$

(3)相干检测时，系统误码率

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-r/2} = 2.58 \times 10^{-3} \quad (\text{or } 2.34 \times 10^{-3})$$

# 数字调制

■ 已知数字信号码元速率为1MBaud，采用2PSK和2DPSK调制传输，载波频率为1MHz，发送功率为1W，信道衰减为30dB，信道噪声功率谱为  $n_0 = 5 \times 10^{-11}$  W/Hz

(1) 若输入信息码为11001001，试分别画出2PSK、2DPSK信号波形

(2) 画出2DPSK相干检测+码反变换的框图

(3) 试分别求 2PSK相干检测、2DPSK相干检测和2DPSK差分相干检测时的误码率。(近似公式  $\text{erfc}(\sqrt{x}) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi x}} e^{-x}$ ,  $x \gg 1$ )

$$4.05 \times 10^{-6}$$

$$8.10 \times 10^{-6}$$

$$2.27 \times 10^{-5}$$

# 数字调制

■ 有一四进制相移键控传输系统，已知其码元速率是4kBaud，设载波频率为4kHz，接收端信号功率为128  $\mu$ W，噪声功率密度谱为  $n_0 = 10^{-9}$  W/Hz。

(1) 设发送的二进制信息为0111000110。按表所示的对应关系画出QPSK和QDPSK信号波形

(2) 计算QPSK调制方式下的误比特率

【解】 (1) 略

(2) 误比特率

$$r = \frac{128 \times 10^{-6}}{10^{-9} \times 2 \times 4 \times 10^3} = 16$$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{r}{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{r}{2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 16}} e^{-\frac{16}{2}} = 3.34 \times 10^{-5}$$

信息码	$\theta_n$	$\Delta\theta_n$
0 0	$0^\circ$	$0^\circ$
0 1	$90^\circ$	$90^\circ$
1 1	$180^\circ$	$180^\circ$
1 0	$270^\circ$	$270^\circ$



# 高级数字调制

---

- 高级数字调制

- 《正交幅度调制》

# 高级数字调制

■ 有一MSK数字传输系统，码元速率为1000Baud，中心载频为3000Hz。设发送序列为+1-1-1-1+1+1-1+1。

- (1) 试计算频率 $f_0$ 和 $f_1$
- (2) 画出此MSK信号波形
- (3) 画出此MSK信号附加相位  $\theta(t)$  路径图

$$f_0 = f_c - f_s/4 = 2750 \text{ Hz}$$

$$f_1 = f_c + f_s/4 = 3250 \text{ Hz}$$



# 高级数字调制

---

- 《正交频分复用OFDM》

# 数字信号最佳接收

- 有两个等概率出现的信号  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$ ，其波形分别如图1所示。
- (1) 试画出最佳接收机框图
  - (2) 接收机输入波形如图2，画出方框图中各点可能的波形
  - (3) 求此二信号的能量  $E_0$ 、 $E_1$  和相关系数  $\rho$
  - (4) 若接收机输入端噪声功率谱为  $n_0/2$ ，求误码率

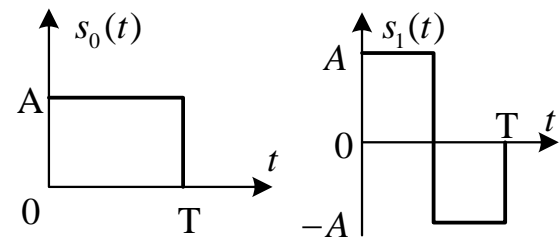


图1

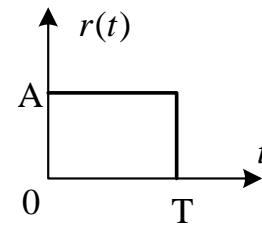


图2



# 数字信号最佳接收

◆[解] (1)略

(2)略

(3)根据  $E = \int_0^T s^2(t)dt$  ,  $E_0 = E_1 = E_b = A^2T$

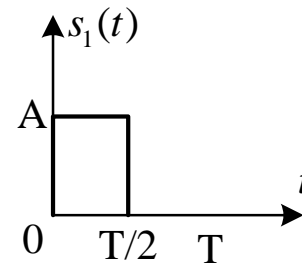
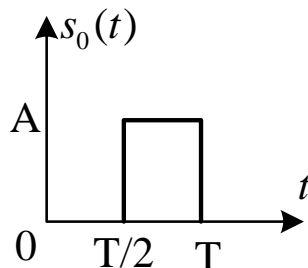
$$\rho = \frac{\int_0^T s_0(t)s_1(t)dt}{\sqrt{E_0E_1}} = 0$$

(4)

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2T}{2n_0}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( A \sqrt{\frac{T}{2n_0}} \right) \end{aligned}$$

# 数字信号最佳接收

■ 设发送信号为 $s_0(t)$ ，如图  
信道噪声功率谱为 $n_0/2$



- (1) 求与此信号匹配的滤波器冲激响应 $h(t)$ ;
- (2) 匹配滤波器输出波形 $s_{o0}(t)$ ;
- (3) 最佳抽样时刻和最大信噪比 $r_o$ ;
- (4) 若发送波形为 $s_1(t)$ ，以上滤波器 $h(t)$ 可否作为匹配滤波器？若可以，求匹配滤波器输出波形 $s_{o1}(t)$ ；使用时与 $s_0(t)$ 有何不同？



# 模拟信号数字化

- 模拟信号数字化

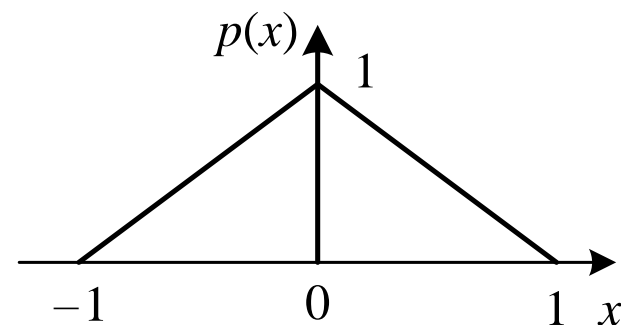
- “抽样”。1kHz单音信号，对其抽样的频率应为多少？若用频率2.5kHz的脉冲对其抽样，画出抽样后的频谱图。

- 若有一模拟信号频带为(7~9)kHz，试求抽样频率。

(4.5)

# 模拟信号数字化

- 已知模拟信号抽样值的概率密度 $p(x)$ 如图所示，若按4电平进行均匀量化，求(1)信号功率；(2)量化噪声功率；(3)量化信噪比。



- 此外，当 $M$ 足够大时，均匀量化噪声功率为 $N_q = \Delta v^2 / 12$
- (均匀分布)信号均匀量化信噪比  $\frac{S}{N_q} = M^2$  或  $20 \lg M$  dB  
如 $M=16$ , 信噪比为256或24.08dB

# 模拟信号数字化

采用13折线A律8位编码，最大量化幅度为4.096V。现有样值0.772V

- (1) 编出其码组(需有过程)
- (2) 计算量化值和量化误差
- (3) 写出其7位幅度码对应的11位线性码

(最小量化间隔为  $\Delta$ ，有一样值为  $386 \Delta$ )

ans: 11011000, 392, 6, 00110001000

sbs: 此外，若样值的归一化值为  $1/3$ ，如何编码？

# 模拟信号数字化

- 现有9路带宽为4 kHz的话音信号，欲对其进行PCM编码、时分复用、二进制传输。设采用64电平量化，复用时加一个同步码时隙。(1)画出帧结构简图，标出帧周期；(2)计算传码率；(3)传输复用后的数字信号，求所需的最小带宽；若采用 $\alpha=0.5$ 的余弦滚降特性传输，求所占带宽。

- 答案(1)图略， $T=125\ \mu\text{s}$ ；(2) $R_b=480\text{kb/s}$ ；(3)240kHz，360kHz

# 模拟信号数字化

■ 有30路话音信号，每路带宽为4kHz，欲对其进行抽样量化编码传输，已知对每样值进行16级量化。编码后每帧中需要2时隙传输同步码和信令码。

- (1) 试画出其帧结构(不考虑复帧)，标出帧周期；
- (2) 采用二进制基带传输，计算它的码速率；
- (3) 若另有16路64kb/s的二进制数据信号欲与其复用传输，计算复用后信号的码速率和码元周期；
- (4) 在原来的1帧中插入了多少个数据信号比特？
- (5) 该数字信号的最小带宽是多少？若采用  $\alpha = 0.5$  的余弦滚降特性传输，其占用带宽多少？

答案(1)略； (2) 1024 kb/s

(3) 2048 kb/s, 0.488  $\mu$ s

(4) 128 bits

(5) 即Nyquist带宽1024 kHz, 余弦滚降1536 kHz

# 差错控制编码

■ 若有一线性分组码的校验矩阵如下

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

求(1)该分组码的码长 $n$ ，信息位长 $k$

(2)生成矩阵 $G$ 。输入信息码1011时，编码是什么？

(3)最小码距 $d_0$ 和纠错个数 $t$

(4)若收端收到码字0101010，计算校正子。是否正确码？(设信道错误不超过纠错能力)



# 差错控制编码

• 【解】 (1)  $n=7$ ,  $k=7-3=4$

• (2)

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

信息码1011的编码为1011010

• (3)  $d_0=3$ ,  $t=1$

• (4)  $s=(0\ 0\ 0)$ , 是正确码



# 差错控制编码

- 某7位循环码生成多项式为  $g(x) = x^3 + x + 1$ , 求
- (1) 该循环码的信息位数  $k$ , 和校验位数  $r$
- (2) 该码的生成矩阵  $G$ , 和相应的典型阵  $G_c$
- (3) 若信息码多项式为  $x^3 + x$ , 编出码字;
- (4) 若收端接收码多项式为  $x^6 + x^4 + x^2$ , 是否正确码(设信道错误不超过纠错能力)?

# 差错控制编码

- 【解】 (1)  $k = n - \sigma^\circ[g(x)] = 7 - 3 = 4$

$$r = \sigma^\circ[g(x)] = 3$$

- (2) 
$$G = \begin{pmatrix} 1011000 \\ 0101100 \\ 0010110 \\ 0001011 \end{pmatrix}; \quad G_c = \begin{pmatrix} 1000101 \\ 0100111 \\ 0010110 \\ 0001011 \end{pmatrix}$$

- (3)  $m(x) = x^3 + x,$

$$x^{7-4}m(x) = x^6 + x^4$$

$$(x^6 + x^4) \bmod (x^3 + x + 1) = x + 1$$

$$c(x) = x^6 + x^4 + x + 1, \text{ i.e. } 1010011$$

- (4)  $(x^6 + x^4 + x^2) \bmod (x^3 + x + 1) = x^2 + x + 1 \neq 0$

是错码

# 差错控制编码

- 某卷积码编码逻辑表达式如下。求

$$c_i^0 = b_i$$

$$c_i^1 = b_i \oplus b_{i-2}$$

$$c_i^2 = b_i \oplus b_{i-1} \oplus b_{i-2}$$

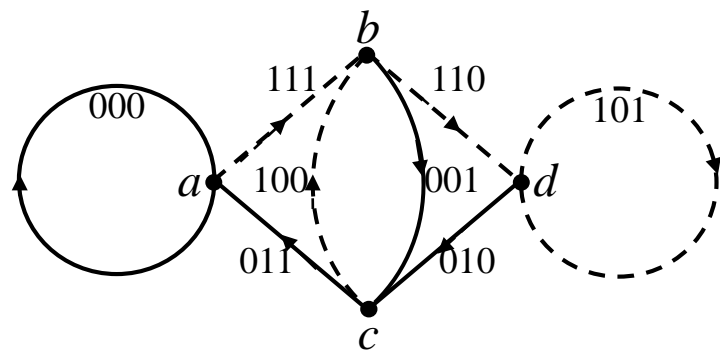
- (1) 该卷积码的参数  $(n, k, m)$ ;
- (2) 编码器方框图;
- (3) 截短生成矩阵和截短校验矩阵;
- (4) 状态转移图;
- (5) 若有信息码 1101, 其编码;
- (6) 若收端接收码为 111 101 000 101, 是否正确码? \*若不是, 用维特比算法纠正之。

- 

- (4) 见右图

$$H_1 = \begin{bmatrix} 11 \\ 101 \\ 00011 \\ 100101 \\ 10000011 \\ 100100101 \end{bmatrix}$$

- (6)s=(0 0 1 1 1 0 0 1), 是错码  
正确码为111 110 010 100



## [维特比译码略]



# 正交编码与伪随机序列

- 有一特征方程  $f(x)=x^3+x+1$ 。画出对应于此特征方程的线性反馈移位寄存器。写出其输出序列。

答：1110010

- 写出与码字+1+1-1-1相正交的码字



# 同步原理

---

- 画出xx法xx同步的方框图，并说明其工作原理(要用表达式)。  
若输入信号波形如图所示，画出方框图中各主要点波形。



# 同步原理

---

- 有一码组为+ + - +, 求该码组的自相关函数并画出函数图。