第五章　基带数字信号的表示和传输

思考题

5-1　数字基带传输系统的基本结构如何？
5-2　数字基带信号有哪些常见的形式？它们各有什么特点？它们的时域表示式如何？
5-3　数字基带信号的功率谱有什么特点？它的带宽主要取决于什么？
5-4　什么是 HDB_3 码、差分双相码和 AMI 码？有哪些主要特点？
5-5　什么是码间干扰？它是如何产生的？对通信质量有什么影响？
5-6　为了消除码间干扰，基带传输系统的传输函数应满足什么条件？
5-7　某数字基带信号的码元间隔为 T_s，传送它的基带传输系统的传输函数 $H(\omega)$ 如图 5-7 所示。试问这时有无码间干扰？为什么？

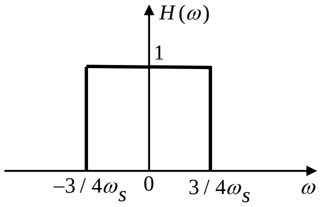

图 5-7 基带传输系统的传输函数

5-8　什么是部分响应波形？什么是部分响应系统？
5-9　在二进制数字基带传输系统中，有哪两种误码？它们各在什么情况下发生？
5-10　什么是最佳判决门限电平？
5-11　当 $P(1)=P(0)=1/2$ 时，对于传送单极性基带波形和双极性基带波形的最佳判决门限电平各为多少？为什么？
5-12　无码间干扰时，单极性 NRZ 码基带传输系统的误码率取决于什么？怎样才能降低系统的误码率？AMI 码又怎样？
5-13　什么是眼图？由眼图模型可以说明基带传输系统的哪些性能？
5-14　什么是频域均衡？什么是时域均衡？横向滤波器为什么能实现时域均衡？
5-15　时域均衡器的均衡效果是如何衡量的？什么是峰值畸变准则？什么是均方畸变准则？

习题

5-1 设某二进制数字基带信号的基本脉冲为三角形脉冲，如图 T5-1 所示。图中 T_s 为码元间隔，数字信息“1”和“0”分别用 $g(t)$ 的有无表示，且“1”和“0”出现的概率相等。

（1） 该数字基带信号的功率谱密度；

（2） 能否用滤波法从该数字基带信号中提取码元同步所需的频率 $f_s=1/T_s$ 的分量？若能，试计算该分量的功率。

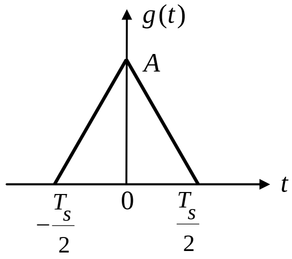

图 T5-1 三角形脉冲

5-2 设基带传输系统的频率特性如图 T5-2 所示，若要求以 $2/T_s Bd$ 的速率进行数据传输，试验证图中各 $H(\omega)$ 是否满足消除抽样点上码间干扰的条件？

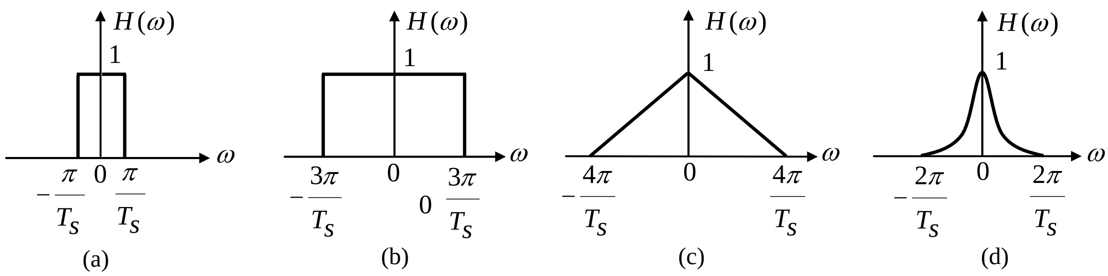

图 T5-2 基带传输系统的频率特性

5-3 为了传送码元速率 $R_B=10^3 Bd$ 的数字基带信号，试问系统采用图 T5-3 中所画的哪一种传输特性较好？并简要说明其理由。

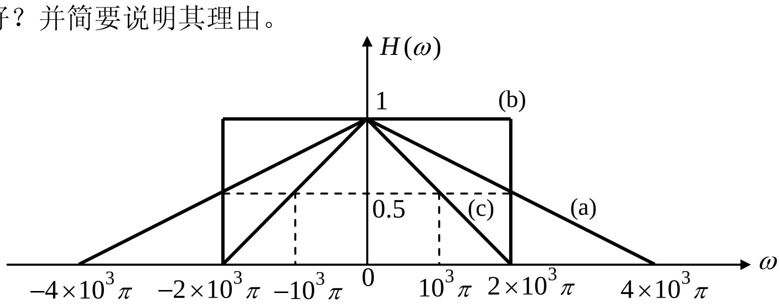

图 T5-3 数字基带信号的传输特性

5-4 设某数字基带系统的传输特性 $H(\omega)$ 如图 T5-4 所示。其中 α 为某个常数 $(0 \le \alpha \le 1)$。

（1） 试检验该系统能否实现无码间干扰传输？

（2） 该系统的最大码元传输速率为多少？这时的系统频带利用率为多少？

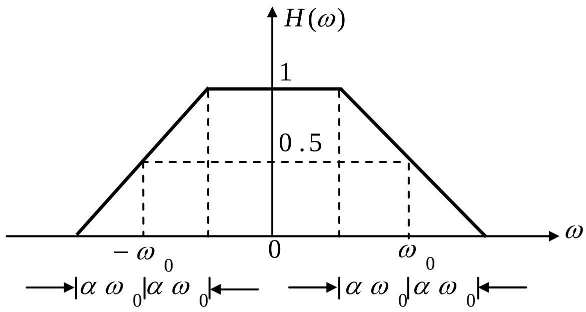

图 T5-4 数字基带系统的传输特性

5-5 设一相关编码系统如图 T5-5 所示。图中，理想低通滤波器的截止频率为 $1/(2T_s)$，通带增益为 T_s：

（1） 该系统的单位冲激响应和频率特性；

（2） 若输入数据为二进制的，则相关编码电平数为何值？若输入数据为四进制的，则相关编码电平数为何值？

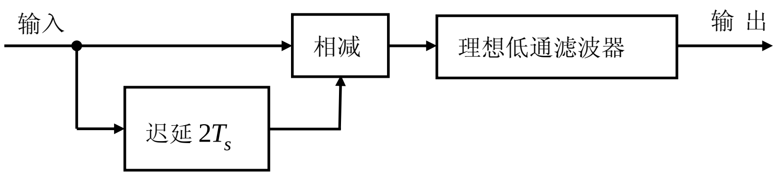

图 T5-5 相关编码系统

5-6 设有一个三抽头的时域均衡器，如图 T5-6 所示。$x(t)$ 在各抽样点的值依次为 $x_{-2}=1/8, x_{-1}=1/3, x_0=1, x_1=1/4, x_2=1/16$（在其它抽样点均为零）。试求输入波形 $x(t)$ 峰值的畸变值及时域均衡器输出波形 $y(t)$ 的峰值畸变值。

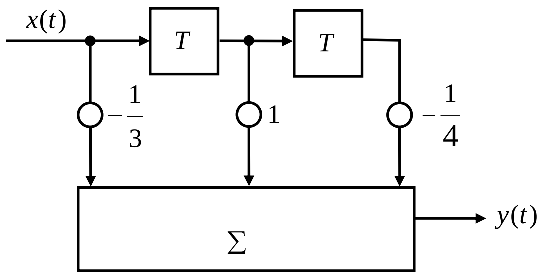

图 T5-6 三抽头的时域均衡器

部分习题参考答案

5-1 思路：将底部宽度为τ、高度为1的三角形时域函数表示为$\Delta_\tau(t)$，傅氏变换对为

$$\Delta_\tau(t)\leftrightarrow\frac{\tau}{2}\left[Sa(\frac{\omega\tau}{4})\right]^2=\frac{\tau}{2}\left[\frac{\sin\omega\tau/4}{\omega\tau/4}\right]^2 \qquad \text{(公式 J5-1(a))}$$

据此式可求得本题中$g(t)$所对应的$G(f)$，即可求解。

解：（1）$P=0.5,\qquad a_1=1,\qquad a_2=0$ (公式 J5-1(b))

$$G(f)=\frac{AT_s}{2}Sa^2(\frac{\pi fT_s}{2}) \qquad \text{(公式 J5-1(c))}$$

$$P_s(f)=f_sP(1-P)(a_1-a_2)^2G^2(f)+f_s^2\sum_{m=-\infty}^{\infty}\left|Pa_1+(1-P)a_2\right|^2G(mf_s)\delta(f-mf_s)$$

$$=\frac{f_s}{4}\cdot\frac{A^2T_s^2}{4}Sa^4(\frac{\pi fT_s}{2})\delta(f-mf_s)$$

$$=\frac{A^2T_s}{16}Sa^2(\frac{\pi fT_2}{2})+\frac{A^2}{16}\sum_{m=-\infty}^{\infty}Sa^4(\frac{m\pi}{2})\delta(f-mf_s)$$

(公式 J5-1(d))

（2）率$f_s=1/T_s$离散谱分量为

$$\frac{A^2}{8}Sa^4(\frac{\pi}{2})\delta(f-f_s)=\frac{2A^2}{\pi^4}\delta(f-f_s)\neq 0 \qquad \text{(公式 J5-1(e))}$$

所以可以用滤波法从该数字基带信号中提取码元同步所需要的频率$f_s=1/T_s$的分量，该分量的功率为

$$S=2A^2/\pi^4=0.02A^2 \qquad \text{(公式 J5-1(f))}$$

5-2 思路：图 T5-2(a)和图 T5-2(b)都是理想低通系统，其频带利用率都是$2Bd/Hz$，可据此求出它们的无码间串扰的最大码速率，若此最大码速率是题中码速率的整数倍，则无码间串扰。对于图 T5-2(c)和图 T5-2(d)，可以用奈圭斯特准则分析，也可以先求出他们的冲激响应再由时域条件来分析。显然当已知频率特性时，用奈圭斯特准则分析较为简单。

解：(a)系统带宽为$1/(2T_s)$，无码间串扰的最大码速率为$1/T_s$，实际码速率$2/T_s$大于$1/T_s$，故此系统有码间串扰。

(b)系统带宽为$3/(2T_s)$，无码间串扰的最大码速率为$3/T_s$，最大码速率与实际码速率之比为1.5，故此系统有码间串扰。

（c）将$H(\omega)$向左右平移$4\pi/T_s$，得图 J5-2(a)。由图 T5-2(c)可知，$H(\omega)$在$2\pi/T_s$和

$-2\pi/T_s$ 两个频率的两边是互补对称的，所以在 $(-2\pi/T_s, 2\pi/T_s)$ 范围内将平移后的频率特性图相加，结果为常数1，由于 $\sum_{n=-\infty}^{\infty} H(\omega+n\omega_s)$ 具有周期性，故在整个频率轴上进行平移、相加处理后也为常数1，所以此系统无码间串扰。

（d）将 $H(\omega)$ 向左右平移 $4\pi/T_s$ 的整数倍得图 J5-2(b)。显然不能满足奈圭斯特准则。

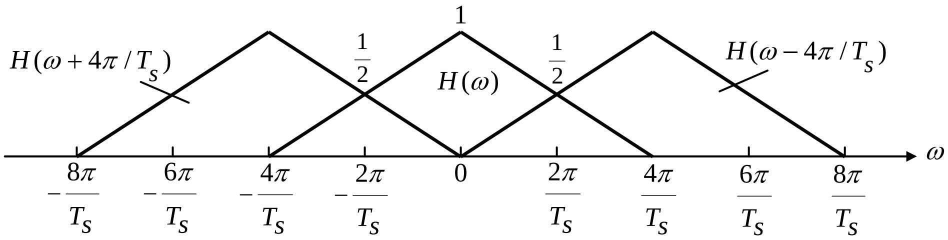

图 J5-2(a)

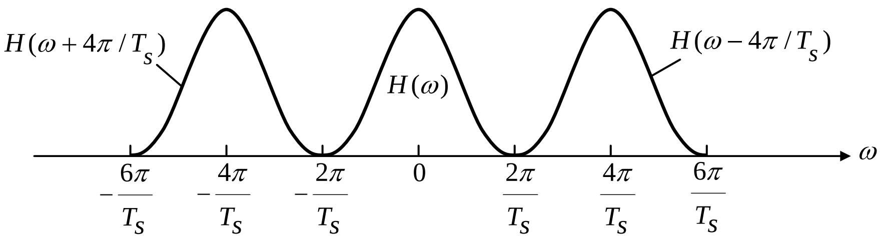

图 J5-2(b)

5-3 思路: 可从码间串扰性能，频带利用率，时域收敛速率以及可实现性等四个方面进行比较，从而确定选择哪一种传输特性。

解:（1）码间串扰性能

(a)因等效矩形带宽 $W=10^3 Hz$，故 $R_{B\max}=2\times10^3 Bd, R_{B\max}=2R_B$，无码间串扰。

(b) $R_{B\max}=2\times10^3 Bd$，无码间串扰。

(c)因等效矩形带宽 $W=500Hz$，故 $R_{B\max}=10^3 Bd=R_B$，无码间串扰。

（2）频带利用率

(a),(b),(c)三种传输特性所占用的信道带宽分别为 $2\times10^3 Hz$、10^3Hz、10^3Hz，所以它们的频带利用率分别为 0.5Bd/ H_Z,1 Bd/ H_Z, 1 Bd/ H_Z。

（3）时域收敛速率

(a)和(c)的传输特性为三角形，其冲击响应为 $\text{Sa}^2(x)$ 型，与 t^2 成反比；(b)的传输特性为矩形，其冲击响应为 $Sa(x)$ 型，与 t 成反比。可见(a),(c)的时域收敛速率快，可以放宽对位

定时信号抖动的要求。

（4） 可实现性

(b)为理想矩形，难于实现；(a),(c)较易于实现。

综上所述，选择传输特性(c)较好。

5-4 解：（1）该频率特性的互补对称频率为 f_0，将 $H(f)$ 向左右平移 $2f_0$ 的整数倍再相加后在整个频率轴上为常数1，所以该系统可以实现无串扰传输。

（2）互补对称频率的2倍即为无码间串扰的最大码速率，即

$$R_B = 2f_0 \qquad (Bd)$$ (公式 J5-4(a))

此系统占用信道带宽为

$$B_c = (1+\alpha)f_0$$ (公式 J5-4(b))

所以系统的频带利用率为

$$\eta_B = \frac{R_B}{B_C} = \frac{2}{1+\alpha} \qquad (Bd/Hz)$$ (公式 J5-4(c))

5-5 解：（1）理想低通虑波器的冲激响应为

$$h'(t) = T_s \bullet \frac{1}{T_s} Sa(\pi t/T_s) = Sa(\pi t/T_s)$$ (公式 J5-5(a))

故此系统的冲激响应为

$$h(t) = h'(t) - h'(t-2T_s) = Sa(\pi t/T_s) - Sa\left[\pi(t-2T_s)/T_s\right]$$ (公式 J5-5(b))

理想低通滤波器的频率特性为

$$H'(f) = \begin{cases} T_s, & |f| \le 1/2T_s \\ 0, & 其它 \end{cases}$$ (公式 J5-5(c))

故此系统的频率特性为

$$H(f) = (1-e^{-2j\omega T_s})H'(f) = 2\sin\omega T_s(\sin\omega T_s + j\cos\omega T_s)H'(f) = |H(f)|e^{j\varphi(f)}$$

(公式 J5-5(d))

其中 $$|H(f)| = \begin{cases} 2T_s \sin 2\pi f T_s, & |f| \le 1/(2T_s) \\ 0, & 其它 \end{cases}$$ (公式 J5-5(e))

（2）若输入数据为二进制，则相关编码电平数为3；若输入数据为四进制，则相关编码电平数为7。

5-6 解：$x(t)$ 的峰值畸变值为

$$D_x = \frac{1}{x_0}\sum_{\substack{i=-2 \\ i\neq 0}}^{2}|x_i| = \frac{1}{8}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+\frac{1}{16} = \frac{37}{48}$$ (公式 J5-6(a))

由公式 $y_k = \sum_{i=-1}^{1} c_i x_{k-i}$ 得

$$y_{-3} = c_{-1}x_{-2} = -\frac{1}{3}\times\frac{1}{8} = -\frac{1}{24}$$ (公式 J5-6(b))

$$y_{-2} = c_{-1}x_{-1} + c_0 x_{-2} = -\frac{1}{3}\times\frac{1}{3} + 1\times\frac{1}{8} = \frac{1}{72}$$ (公式 J5-6(c))

$$y_{-1} = c_{-1}x_0 + c_0 x_{-1} + c_1 x_{-2} = -\frac{1}{3}\times 1 + 1\times\frac{1}{3} + (-\frac{1}{4})\times\frac{1}{8} = -\frac{1}{32}$$ (公式 J5-6(d))

$$y_0 = c_{-1}x_1 + c_0 x_0 + c_1 x_{-1} = -\frac{1}{3}\times\frac{1}{4} + 1\times 1 + (-\frac{1}{4})\times\frac{1}{3} = \frac{5}{6}$$ (公式 J5-6(e))

$$y_1 = c_{-1}x_2 + c_0 x_1 + c_1 x_0 = -\frac{1}{3}\times\frac{1}{16} + 1\times\frac{1}{4} + (-\frac{1}{4})\times 1 = -\frac{1}{48}$$ (公式 J5-6(f))

$$y_2 = c_0 x_2 + c_1 x_1 = 1\times\frac{1}{16} + (-\frac{1}{4})\times\frac{1}{4} = 0$$ (公式 J5-6(g))

$$y_3 = c_1 x_2 = -\frac{1}{4}\times\frac{1}{16} = -\frac{1}{64}$$ (公式 J5-6(h))

其它 y_k 均为零。

$y(t)$ 的峰值畸变值为

$$D_y = \frac{1}{y_0}\sum_{\substack{i=-3 \\ i\neq 0}}^{3}|y_k| = \frac{6}{5}\left(\frac{1}{24}+\frac{1}{72}+\frac{1}{32}+\frac{1}{48}+\frac{1}{64}\right) = \frac{71}{480}$$ (公式 J5-6(i))