第四章

思考题

4-1 什么是数字基带信号?

答：由数字终端设备产生的原始信号，一般具有较丰富的低频成分，其最低频率通常会接近于 0，而且最高频率和最低频率之比远大于 1，这样的信号称为数字基带信号。

4-2 数字基带信号的功率谱密度有什么特点？各部分频谱有什么作用?

答：即包括连续谱，也包括离散谱，其中离散谱不总是存在，而连续谱总是存在。连续谱反映信号能量集中的频率范围，可用来确定信号的带宽。离散频谱可用于确定有无位同步信号。

4-3 在传输矩形脉冲时，对传输系统频带有什么要求？为什么？

答：在传输矩形脉冲时，通常把传输系统频带范围限制在 0 到第二或第三零点之间。

因为矩形脉冲信号在第一零点以外，还有相当一部分能量。如果传输系统利用矩形基带信号，把频带范围限制在 0 到第 1 零点之间，则在传输过程中信号会产生较大失真。

4-4 选择传输码型必须具备哪些基本特性？

答：1）无直流分量并且只有很小的低频分量；

2）含有丰富的码元定时信息；

3）主瓣宽度窄，以节省频带资源；

4）适用于各种信源的统计特性；

5）最好具有内在的检错能力；

6）减少误码扩散，应避免传输过程中的单个错码而导致译码输出多个错码。

4-5 什么叫码间串扰？码间串扰会产生什么影响？系统满足无码间串扰的条件是什么？

答：信号通过信道传输，同时受到乘性干扰和加性噪声的影响，其中乘性干扰会引起码元波形的延迟和失真，造成码元间的互相重叠，从而影响正确判决，这就是码间干扰，又称码间串扰。

码间串扰的影响：它会影响本抽样时刻抽样判决值，从而增大了基带传输系统的误码率。

系统无码间串扰的条件：

时域条件： $h(kT_s)=\begin{cases} c & (k\neq 0) \\ 0 & (k=0) \end{cases}$ (k 为整数)；频域条件： $\sum_i H(\omega+\frac{2\pi i}{T_s})=T_s, |\omega|\le \pi/T_s$ 。

4-6 什么是奈奎斯特速率？什么是奈奎斯特带宽？此时的频带利用率有多大?

答：一个带宽为 f_N 的理想低通系统，最高无码间干扰码元速率为 2 f_N，称为奈奎斯特速率；

反过来，若要实现速率为 R_B 的无码间干扰传输，需要的理想低通系统的最小带宽为 $R_B/2$，

称为奈奎斯特带宽。这时系统的频带利用率为 2Bd/Hz，这也是一个极限的频带利用率。

4-7 设信号功率、进制数以及信道的噪声功率谱密度不变，当传输信息速率增大时误码率如何变化？为什么？

答：误码率增加。因为当信号的进制数不变时码速率信息随信息速率的增加而增加。为保持

系统无码间串扰，系统的带宽必须随码速率的增加而增加，收滤波器带宽也必须随之增加。因为信号功率和信道的噪声功率谱密度不变，故收滤波器输出信噪比随收滤波器带宽的增大而减小，从而导致误码率增加。

4-8 设理想低通滤波器的截止频率为 f_N，试讨论码元通过该理想低通滤波器满足无码间串扰的速度。

答：若选码元速度 $R_B=\frac{2f_N}{m}$，那么在第 $k+1$ 码元的抽样判决时刻，第 k 个码元的波形正好出现零点，不会对第 $k+1$ 码元产生串扰，理想低通系统在时域满足无码间干扰条件。

4-9 若要实现速率为 R_B 的无码间干扰传输，需要的理想低通系统的最小带宽为多少？

答：若要实现速率为 R_B 的无码间干扰传输，需要的理想低通系统的最小带宽为 $R_B/2$。

4-10 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？

答：眼图是指用示波器显示用实验手段估计系统性能的图形，因为在传输二进制信号波形时，它很像人的眼睛。

它能说明基带传输系统的性能有：

1） 最佳抽样时刻应是"眼睛"张开最大的时刻；
2） 对定时误差的灵敏度可由眼图的斜边之斜率决定，斜率越陡，对定时误差就越灵敏；
3） 图的阴影区的垂直高度表示信号幅度畸变范围；
4） 图中央的横轴位置应对应判决门限电平；

在抽样时刻上，上下两阴影区的间隔距离之半为噪声的容限（或称噪声边际），即若噪声瞬时值超过这个容限，则就可能发生错误判决。

4-11 简述用示波器观察眼图的两个步骤。

答：1）用示波器测试接收滤波器输出信号；

2）使示波器水平扫描周期等于接收码元的周期。

4-12 为什么要采用部分响应技术，部分响应技术有何优点，需要付出什么代价？

答：采用部分响应技术的目的是为了使通信系统的频带利用率达到理论最大值 2，同时使时域响应衰减快，从而降低对同步定时的要求。

优点即：频带利用率高，时域衰减快可放宽对定时的要求，且系统频率特性不是理想矩形，易于实现。缺点：抗噪声能力下降。

4-13 什么是时域均衡？什么是频域均衡？横向滤波器为什么能实现时域均衡？

答：时域均衡是利用均衡器产生的响应波形去补偿发生畸变的信号波形，以使在抽样时刻最大限度地消除码间干扰，而不去考虑其它时刻的信号波形的畸变

频域均衡是利用幅频特性或相频特性对信道特性进行补偿，使基带系统的总特性满足奈氏准则的要求。

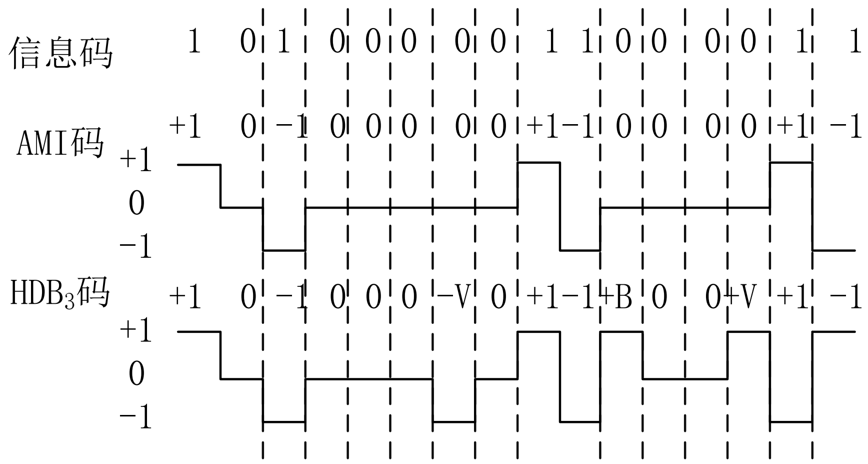
横向滤波器的特性主要取决于各抽头系数 C_i，(i=0，±1，±2，....)。各抽头系数是可

调整的，以适应不同的传输条件。利用它产生的无限多响应波形之和，将接收滤波器输出端有码间干扰的响应波形变换成在抽样时刻上无码间干扰的响应波形。从而实现时域均衡。

习题：

4-1 已知信息代码为 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1，求相应的 AMI 码及 HDB_3码，并分别画出它们的波形图。

解：各波形图如解图 4-1 所示：



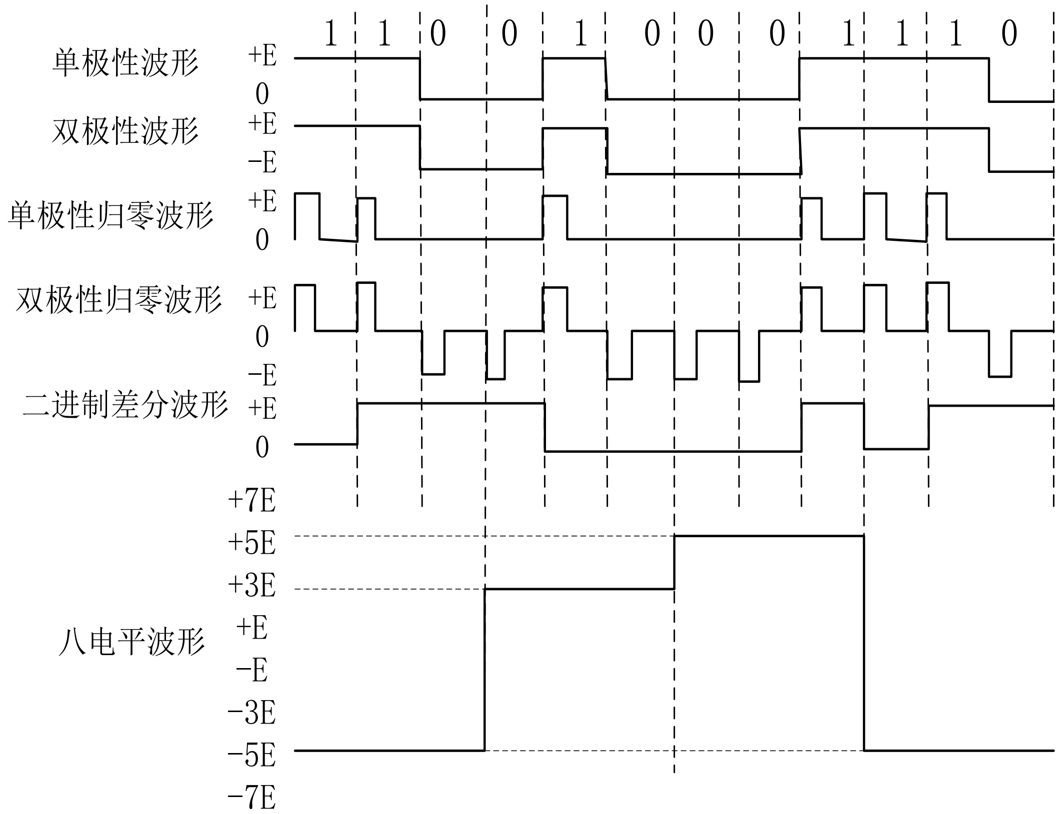
解图 4-1

4-2 已知信息代码为 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1，求相应的 AMI 码、HDB3 码及双相码。

解：信息码：	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
AMI 码：	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
HDB3 码：	+1	0	0	0	+V	-B	0	0	-V	0	+1	-1
双相码：	10	01	01	01	01	01	01	01	01	01	10	10

4-3 **设二进制符号序列为 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0，试以矩形脉冲为例，分别画出相应的单极性码波形、双极性码波形、单极性归零码波形、双极性归零码波形、二进制差分码波形及八电平码波形。**

解：各波形如解图 4-2 所示：

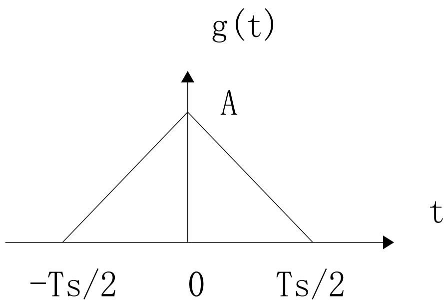


解图 4-2

4-4 设某二进制数字基带信号的基本脉冲为三角形脉冲，如题图 4-1 所示。图中 Ts 为码元间隔，数字信息“1”“0”分别用 g(t)的有无表示，且“1”和“0”出现的概率相等。

(1) 求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 fs=1/Ts 的分量?若能，试计算该分量的功率。



题图 4-1

解：（1） $P=0.5, a_1=1, a_2=0$

$$\mathrm{G(f)}=\frac{ATs}{2}Sa^2\left(\frac{\pi fTs}{2}\right)$$

$$\mathrm{Ps}(f)=f_s\mathrm{P}(1-\mathrm{P})(\mathrm{a}_1-\mathrm{a}_2)^2\mathrm{G}^2(f)+f_s^2\sum_{m=-\infty}^{\infty}|\mathrm{Pa}_1+(1-\mathrm{P})\mathrm{a}_2|^2\,\mathrm{G}^2(\mathrm{m}f_s)\delta\delta f-\mathrm{m}f_s)|$$

$$=\frac{f_s}{4}*\frac{A^2Ts^2}{4}Sa^4(\frac{\pi fTs}{2})+\frac{f_s^2}{4}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\frac{A^2Ts^2}{4}Sa^4(\frac{\pi fTs}{2})\delta(f-mf_s)$$

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

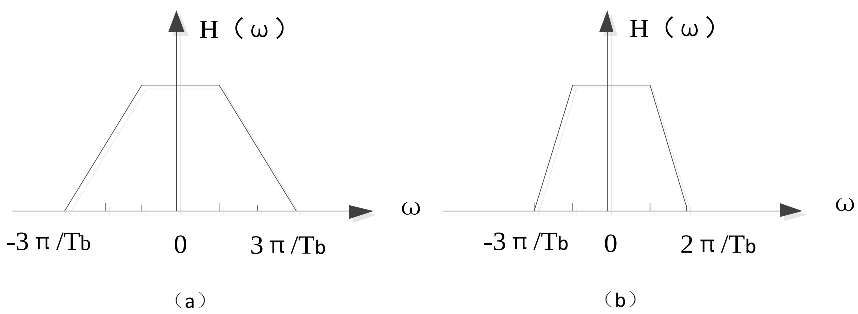
（2）频率 $f_s=1/\mathrm{Ts}$ 离散谱分量为

$$\frac{A^2}{8}Sa(\frac{\pi}{2})\delta(f-f_s)=\frac{2A^2}{\pi^4}\delta(f-f_s)\neq 0$$

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 $f_s=1/\mathrm{Ts}$ 的分量，该分量的功率为

$$S=\frac{2A^2}{\pi}=0.02A^2$$

4-5 设随机二进制脉冲序列码元间隔为 T_b，经过理想抽样以后，送到如题图 4-2 中的几种滤波器，指出哪种会引起码间串扰，哪种不会引起码间串扰，说明理由。



题图 4-2

解：

（a） 在 $\left[-\frac{\pi}{T_b},\frac{\pi}{T_b}\right]$ 区间上，前后码元的 $H(w)$ 叠加为矩形，所以这种滤波器是无码间串扰；

（b） 在 $\left[-\frac{\pi}{T_b},\frac{\pi}{T_b}\right]$ 区间上，前后码元的 $H(w)$ 叠加不为矩形，所以这种滤波器是有码间串扰；

4-6 某基带系统的频率特性是截止频率为 1MHz、幅度为 1 的理想低通滤波器

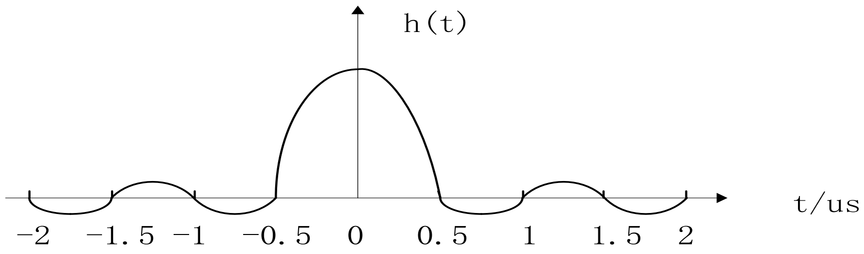
（1）试根据系统无码间串扰的时域条件求此基带系统无码间串扰的码速率；

（2）设此系统传输信息速率为 3Mbps，能否实现无码间串扰。

解：（1）

$$h(t)=2\times10^6 Sa(2\pi\times10^6 t)$$

波形如解图 4-3 图所示。由图可知，当$T_s = 0.5\mu s/k$ (k 为正整数)时无码间串扰，即此系统无码间串扰的码速率为



解图 4-3

(2) 设传输独立等概的 M 进制信号，则

$$R_B = \frac{3}{\log_2^M}(MBd)$$

令

$$\frac{3}{\log_2^M} = \frac{2}{k}$$

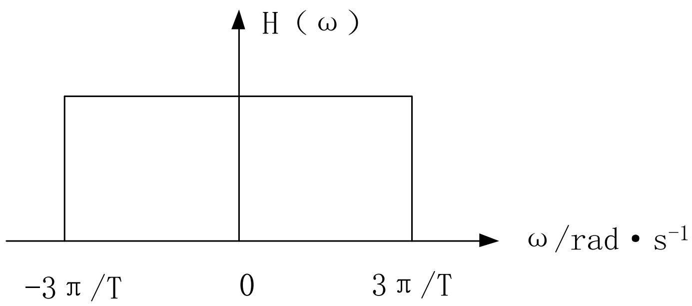
得

得

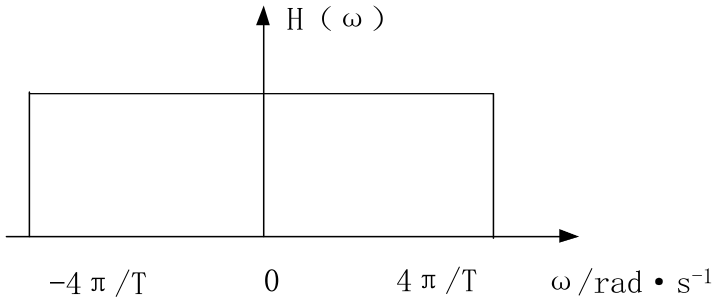
$$M = 8^{\frac{2}{k}} = 8^n \qquad (n=1,2,\cdots)$$

即当采用8^n进制信号时，码速率 $R_B = \frac{1}{n}$ (MBd)，可以满足无码间串扰条件。

4-7 设基带系统的频率特性如题图 4-3 所示。



(a)



(b)

题图 4-3

（1）若以 2/T Bd 速率传输信号，讨论二进制情况下各系统是否可以实现无码间串扰传输；
（2）若以 8/T bit/s 速率传输信息，讨论多进制情况下各系统是否可以实现无码间串扰传输。

解：（1）图（a）为理想矩形，无码间串扰的最大码元速率为$R_B = 3/T > 2/T$，但R_B不是$2/T$的整数倍，故有码间串扰。

图（b）为理想矩形，无码间串扰的最大码元速率为$R_B = 4/T = 2\times 2/T$，故无码间串扰。

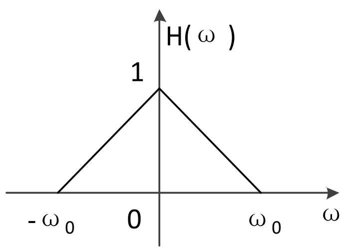
（2）图（a)：当传输的信号为 256 进制时，信号码元速率为 *1/T*，无码间串扰的最大码元速率为$R_B = 3/T$，无码间串扰。

图（b)：当传输的信号为 4 进制时，信号码元速率为 4*/T*，无码间串扰。

4-8 设某基带传输系统具有题图 4-4 所示的三角形传输函数：

(1) 当 $R_B = w_0/\pi$ 时，用奈奎斯特准则验证该系统能否实现无码间串扰传输?

(2) 求该系统接收滤波器输出基本脉冲的时间表达式，并用此来说明(1)中的结论。



题图 4-4

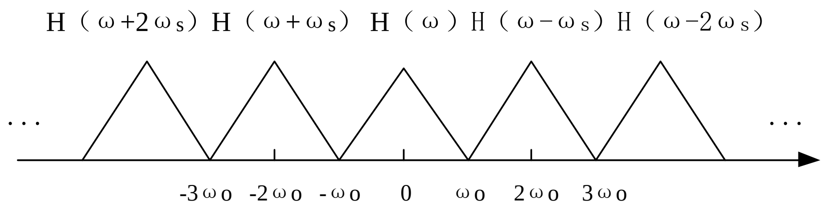
解： (1) 方法一

将$H(w)$在频率轴上以$2w_0$为间隔切开，由于$H(w)$的频率范围为$(-w_0,w_0)$，故切开、平移、迭加后仍为$H(w)$，在$|w| < w_0$范围内$H(w)$不为常数，故系统有码间串扰。

方法二

将$H(w)$向左右平移$2w_0$的整数倍，如下图所示。可见平移后各图不重合，相加

后不为常数，故码速率为w_0/π时有码间串扰。



(2)

$$h(t)=\frac{w_0}{2\pi}Sa^2(\frac{w_0 t}{2})$$

此即为接收滤波器输出基本脉冲时间表达式。

因

$$T_s=\frac{1}{R_B}=\frac{\pi}{w_0}$$

所以

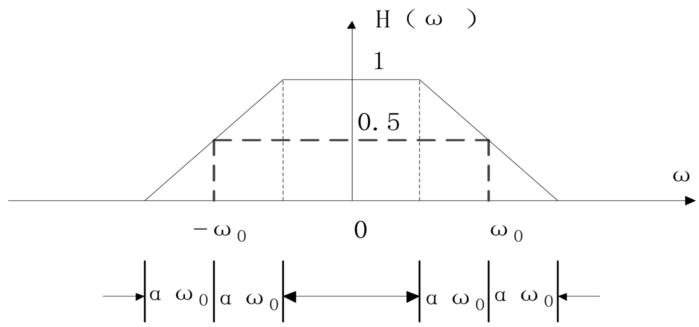
$$h(kT_s)=\frac{w_0}{2\pi}Sa^2(\frac{k\pi}{2})$$

可见 k=0,±1,±3,⋯时，$h(kT_s)\neq 0$，故有码间串扰。

4-9 设某数字基带系统的传输特性$H(\omega)$如题图 4-5 所示。其中α是某个常数（0≤α≤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？



题图 4-5

解:（1）该频率特性的互补对称频率为 f_0, 将 $H(f)$向左平移 $2f_0$ 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

$$R_B=2f_0\text{（Bd）}$$

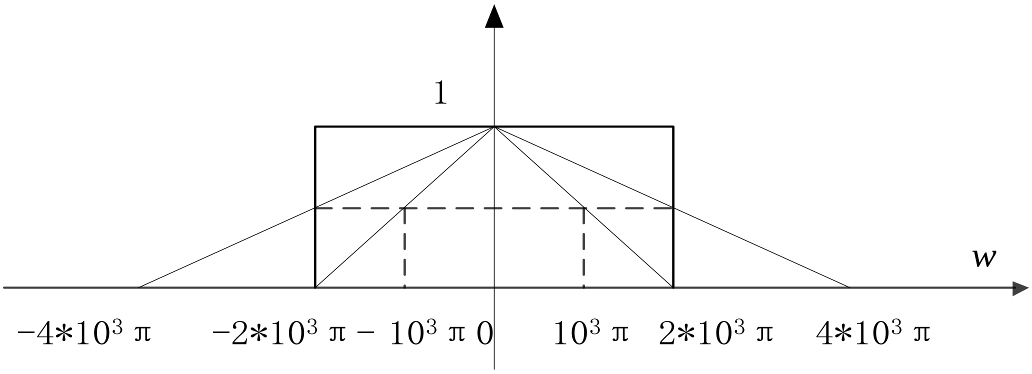
此系统占用信道带宽为

$$B_C=(1+\alpha)f_0$$

所以系统的频带利用率为

$$\eta_B = R_B / B_C == 2/(1+\alpha)\ \text{（Bd/Hz）}$$

4-10 为了传输码元速率 $R_B = 10^3(Baud)$ 的数字基带信号，试问系统采用如题图 4-6 中哪种传输特性较好，并说明其理由。



题图 4-6

根据无码间干扰时系统传输函数 $H(w)$ 应满足的条件分析，图所示的三种传输函数（a）（b）（c）都能满足以 $R_B = 10^3(Baud)$ 的码元速率无码间干扰传输。此时，需要比较三种传输函数在频带利用率、单位冲激响应收敛速度、实现难易程度等方面的特性，从而选出最好的一种传输函数。

1） 传输函数（a）的无码间干扰传输速率 R_B 为

$$R_B = 10^3(Baud)$$

其频带宽度 B 为

$$B = \frac{4\times 10^3 \pi}{2\pi} = 2\times 10^3\,(\text{Hz})$$

系统的频带利用率 η 为

$$\eta = \frac{RB}{B} = \frac{10^3}{2\times 10^3} = 0.5\,Baud/Hz$$

2） 传输函数（b）的无码间干扰传输速率 R_B

$$R_B = 10^3(Baud)$$

其频带宽度 B 为

$$B=\frac{2\times10^{3}\pi}{2\pi}=10^{3}Hz$$

系统的频带利用率η为

$$\eta=\frac{RB}{B}=\frac{10^{3}}{10^{3}}=1Baud/Hz$$

3） 传输函数（c）的无码间干扰传输速率$R_B=10^{3}(Baud)$

其频带宽度 B 为

$$B=\frac{2\times10^{3}\pi}{2\pi}=10^{3}Hz$$

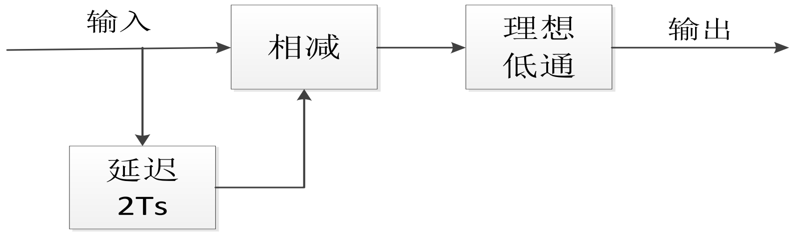
系统的频带利用率 为

$$\eta=\frac{RB}{B}=\frac{10^{3}}{10^{3}}=1Baud/Hz$$

从频带利用率性能方面比较可得：图（b）和（c）的频带利用率为$1Baud/Hz$，大于传输函数（a）的频带利用率。传输函数（b）是理想低通特性，其单位冲激相应$Sa(x)$型，与时间成反比，尾部收敛速度慢且传输函数难于实现。传输函数（c）是三角形特性，其单位冲激相应$Sa^{2}(x)$型，尾部收敛速度快且传输函数易于实现。

因此，选取传输函数（c）较好。

4-11 设一相关编码系统如下图所示。题图 4-7 中，理想低通滤波器的截至频率为$1/2T_s$，通带增益为T_s。试求该系统的单位冲激效应和频率特性。



题图 4-7

图中的理想低通滤波器的传输函数$H'(\omega)$为

$$H'(\omega)=\begin{cases}T_s & |\omega|\le\frac{\pi}{T_s}\\ 0 & other\ \omega\end{cases}$$

其对应的单位冲激相应$h'(t)$为

$$h'(t)=Sa(\frac{\pi}{T_s}t)$$

图中的系统单位冲激相应$h'(t)$为

$$[\delta(t)-\delta(t-2T_s)]*h'(t)=h'(t)-h'(t-2T_s)=Sa(\frac{\pi}{T_s}t)-Sa(\frac{\pi}{T_s}(t-2T_s))$$

系统传输函数$H(\omega)$为

$$H(\omega)=(1-e^{-j2\omega T_s})\bullet H(\omega)=(1-e^{-j2\omega T_s})\bullet Ts\bullet G_{\frac{2\pi}{T_s}}(\omega)$$

其中

$$G_{\frac{2\pi}{T_s}}(\omega)=\begin{cases}Ts & |\omega|\le\frac{\pi}{T_s}\\ 0 & else\ \omega\end{cases}$$

4-12 设有一个三抽头的迫零均衡器，输入信号 $X(t)$ 在各个抽样点的值依次为

$X_{-2}=0, X_{-1}=0.2, X_0=1, X_1=-0.3, X_2=0.1$,其余 $X_k=0$。求三抽头的最佳增益。

解：根据破零均衡器的定义，均衡器输出信号的采样值$Y_{-1}=Y_1=0$。

由公式$y_k=\sum_{i=-1}^{1}C_iX_{k-i}$得

$$Y_{-1}=C_{-1}X_0+C_0X_{-1}+C_1X_{-2}=C_{-1}+0.2C_0=0$$

$$Y_0=C_{-1}X_1+C_0X_0+C_1X_{-1}=-0.3C_{-1}+C_0+0.2C_1$$

$$Y_1=C_{-1}X_2+C_0X_1+C_1X_0=0.1C_{-1}-0.3C_0+C_1=0$$

令$Y_0=1$，得方程组

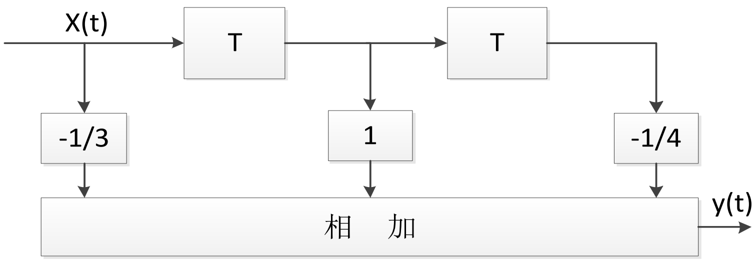
$$\begin{cases}C_{-1}+0.2C_0=0\\ -0.3C_{-1}+C_0+0.2C_1=1\\ 0.1C_{-1}-0.3C_0+C_1=0\end{cases}$$

解此方程组可得

$$C_{-1}=-0.1779\ ,C_0=0.8897\ ,C_1=0.2847$$

此即为三抽头的最佳增益。

4-13 设有一个三抽头的时域均衡器，如题图 4-8 所示 $x(t)$ **在抽样点的值依次为** $x_{-2}=\frac{1}{8}$、$x_{-1}=\frac{1}{3}$、$x_0=1$、$x_1=\frac{1}{4}$、$x_2=\frac{1}{16}$**，在其它抽样点均为 0，试求输入波形** $x(t)$ **峰值的畸变值及均衡器输出波形** $y(t)$ **峰值的畸变值。**



题图 4-8

解：$x(k)$ 的峰值畸变值为 $D_k=\frac{1}{x_0}\sum_{\substack{i=-2\\ i\neq 0}}^{2}\left|x_i\right|^2=\frac{1}{8}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+\frac{1}{16}=\frac{37}{48}$

由公式 $y_k=\sum_{i=-N}^{N}C_iX_{k-i}$

可得

$$y_{-3}=c_{-1}x_{-2}=\frac{1}{3}\times\frac{1}{8}=-\frac{1}{24}$$

$$y_{-2}=c_{-1}x_{-1}+c_0x_{-2}=-\frac{1}{3}\times\frac{1}{3}+1\times\frac{1}{8}=-\frac{1}{72}$$

$$y_{-1}=c_{-1}x_0+c_0x_{-1}+c_1x_{-2}=-\frac{1}{3}\times1+1\times\frac{1}{3}-\frac{1}{4}\times\frac{1}{8}=-\frac{1}{32}$$

$$y_0=c_{-1}x_1+c_0x_0+c_1x_{-1}=-\frac{1}{3}\times\frac{1}{4}+1\times1-\frac{1}{4}\times\frac{1}{3}=\frac{5}{6}$$

$$y_1=c_{-1}x_2+c_0x_1+c_1x_0=-\frac{1}{3}\times\frac{1}{16}+1\times\frac{1}{4}-\frac{1}{4}\times1=-\frac{1}{48}$$

$$y_2=c_0x_2+c_1x_1=1\times\frac{1}{16}-\frac{1}{4}\times\frac{1}{4}=0$$

$$y_3=c_1x_2=-\frac{1}{4}\times\frac{1}{16}=-\frac{1}{64}$$

4-7-2

图（a），理想低通系统的带宽为 3/2T，最高无码间串扰的码元速率为 3/T，当 RB=3/kT 时，无串扰，其中 k 为正整数。现信息速率为 8/T bit/s，设基带信号为 M 进制，位数 N，故码元速率为 8/NT。对比 3/kT 和 8/NT，可以得出，当 N=8，即进制为 M=256 时，可实现无码间串扰传输。

图（4），理想低通系统的带宽为 2/T，最高无码间串扰的码元速率为 4/T，当 RB=4/kT 时，无串扰，其中 k 为正整数。现信息速率为 8/T bit/s，设基带信号为 M 进制，位数 N，故码元速率为 8/NT。对比 4/kT 和 8/NT，可以得出两种情形：当 N=2，即进制为 M=4 时，可实现无码间串扰传输；当 N=4，即进制为 M=16 时，可实现无码间串扰传输。