

## 实验一 数字基带传输系统设计与性能研究

典型的数字通信系统模型如图 1 所示。从消息传输角度看，系统包括两个重要的变换，一是即消息与数字基带信号之间的变换，二是数字基带信号与信道传输信号之间的变换。另一方面，基带信号不经过高频载波调制而直接进行传输，称为基带传输系统。与之对应，把包括高频载波调制与解调过程的传输系统称为频带传输系统。无论是基带传输还是频带传输，基带信号处理是数字通信系统必要的组成部分。因此掌握数字基带传输的基本理论十分重要，在数字通信系统中具有普遍意义。

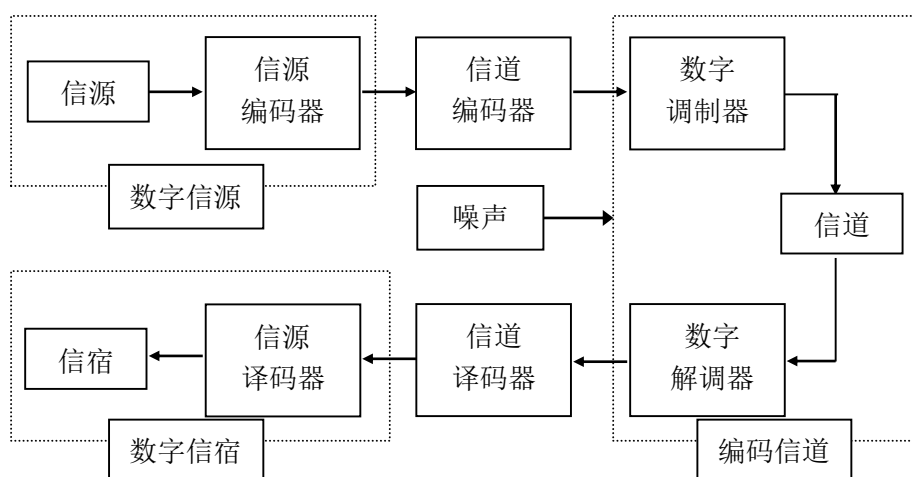


图 1 数字通信系统模型

### 一、实验目的和要求

- 1) 提高独立学习的能力，培养发现问题、解决问题和分析问题的能力；
- 2) 掌握数字滤波器的设计和基带数字传输系统的仿真方法；
- 3) 掌握基带传输系统的基本结构，带限信道下的信号传输过程和分析；
- 4) 掌握码间干扰和匹配滤波器，掌握无码间干扰基带系统的特性；
- 5) 掌握通过观测眼图和星座图判断信号的传输质量的方法；

6) 掌握利用 Matlab 进行通信系统研究的方法，独立完成数字基带传输系统的 Matlab 函数设计、代码编写、调试过程。

7) 学习实验报告的写作、排版方法，掌握报告写作的重点，体现个人工作量和创新性。

8) 综合性实验，有挑战性。禁止抄袭现有的代码，一定要先确定思路后再代码实现。相信自己，一分付出一分收获！没有痛苦就没有收获！遇到困难，不能退缩！有错误不怕，解决错误的过程就是学习过程，犯错误是幸运的事情！坚持独立完成代码！

## 9) 实验进行过程

第一步：深刻理解原理，完成系统子函数的设计，给出子函数功能和输入输出，实现思路。

第二步：编写代码，实现各个子函数，并构造整个基带系统。

第三步：系统调试，学会调试过程，学会检查代码错误的方式和方法。

第四步：整理实验报告，体现个人工作量。

## 二、实验原理

### 1. 带限信道的基带系统模型（连续域分析）

带限信道下的基带系统模型如图 2 所示，有关信号传输过程如下：

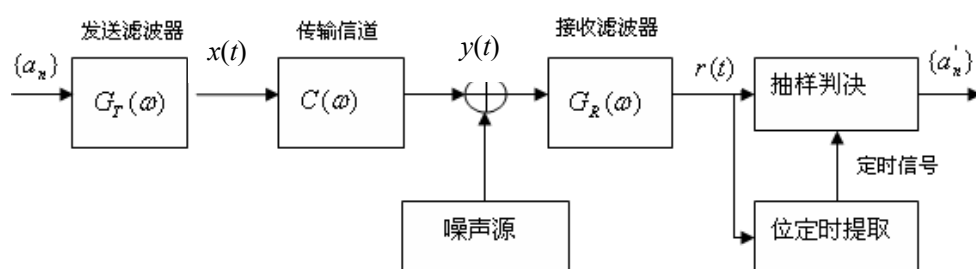


图 2 带限信道下的基带系统模型

✧ 输入二进制符号序列  $\{a_l\}$ ，发送  $L$  个比特。

✧ 发送信号

$$d(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(t - lT_b) \quad , \quad T_b \text{ 为比特周期或二进制码元周期, 每隔一个比特周期}$$

发送一个脉冲信号。

✧ 发送滤波器

设发送滤波器的频率响应为  $G_T(\omega)$  或  $G_T(f)$ ，则滤波器的单位冲激响应为

$$g_T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_T(f) e^{j2\pi ft} df \quad , \quad \text{其中角频率 } \omega = 2\pi f \text{。}$$

✧ 发送滤波器输出信号

$$\begin{aligned} x(t) &= d(t) * g_T(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(t - lT_b) * g_T(t) \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} a_l g_T(t - lT_b) \end{aligned}$$

✧ 信道输出信号或接收滤波器输入信号

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (\text{理想信道 } C(\omega) = 1)$$

✧ 接收滤波器

设频率响应为  $G_R(\omega)$  或  $G_R(f)$ ，则滤波器的单位冲激响应为

$$g_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_R(f) e^{j2\pi ft} df \quad \text{。}$$

✧ 接收滤波器的输出信号

$$\begin{aligned} r(t) &= y(t) * g_R(t) = d(t) * g_T(t) * g_R(t) + n(t) * g_R(t) \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} a_l g(t - lT_b) + n_R(t) \end{aligned}$$

其中  $g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_T(f)G_R(f)e^{j2\pi ft}df$ 。

✧ 如果位同步理想，发送滤波器和接收滤波器的延时分别为  $\tau_1, \tau_2$ ，则理想抽样

时刻为  $l \cdot T_b + \tau_1 + \tau_2$ ， $0 \leq l \leq L-1$ 。

✧ 抽样点数值为  $r(l \cdot T_b + \tau_1 + \tau_2)$ ， $0 \leq l \leq L-1$

✧ 判决为  $\{a'_l\}$

## 2. 升余弦滚降滤波器

升余弦滤波器的频率响应为

$$H_d(f) = \begin{cases} T_c, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T_c} \\ \frac{T_c}{2} \left[ 1 + \cos \frac{\pi T_c}{\alpha} \left( |f| - \frac{1-\alpha}{2T_c} \right) \right], & \frac{1-\alpha}{2T_c} < |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T_c} \\ 0, & |f| > \frac{1+\alpha}{2T_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  称为滚降系数，取值为  $0 < \alpha \leq 1$ ， $T_c$  为表征升余弦滤波器的频率响应的常数。升余弦系统的单位冲激响应为

$$h_d(t) = \frac{\sin \pi t / T_c}{\pi t / T_c} \cdot \frac{\cos \alpha \pi t / T_c}{1 - 4\alpha^2 t^2 / T_c^2} \quad (-\infty < t < \infty) \quad (2)$$

$\alpha = 0$  时，滤波器的带宽为  $\frac{1}{2T_c}$  Hz； $\alpha = 1$  时，带宽为  $\frac{1}{T_c}$  Hz。故滤波器的最高

频率分量为  $f_m = \frac{1}{T_c}$  Hz。实验中，滤波器数字化时，抽样频率为四倍的最高频率，

$f_s = 4f_m$ 。同时，不失一般性，将时间抽样间隔  $T$  和抽样频率  $f_s$  都归一化为 1，

故升余弦系统的参数  $T_c = 4$ 。

升余弦系统的单位冲激响应满足

$$h_d(nT_c) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

在理想信道中，此波形在抽样时刻上无码间干扰。另外，系统的频率特性在

$\left(-\frac{1}{2T_c}, \frac{1}{2T_c}\right)$  内可以叠加成一条直线，系统无码间干扰传输的最小符号间隔为  $T_c$  秒，

或无码间干扰传输的最大符号速率为  $R_{s\max} = \frac{1}{T_c}$  Baud。更进一步，当传输码元速

率满足  $\frac{R_{s\max}}{n} = \frac{1}{nT_c}$ ， $n=1,2,3,\dots$  时，则通过此基带系统后无码间干扰。

### 3. 最佳基带系统

将发送滤波器和接收滤波器联合设计为无码间干扰的基带系统，且具有最佳的抗加性高斯白噪声的性能。要求接收滤波器的频率特性与发送信号频谱共轭匹配。最佳基带系统的总特性是确定的，故最佳基带系统的设计归结为发送滤波器和接收滤波器特性的选择。

设信道特性理想，则有

$$H(f) = G_T(f) \cdot G_R(f), \quad G_R(f) = G_T^*(f) \quad (\text{延时为 } 0)$$

此时，发送滤波器与接收滤波器的幅度响应特性满足

$$|G_T(f)| = |G_R(f)| = |H(f)|^{1/2}$$

**实验中，系统具有线性相位，根据滤波器长度赋予其相位特性。**

如果基带系统采用升余弦系统，则发送滤波器与接收滤波器为平方根升余弦系统。

实验中，基带系统传输特性设计可以采用两种方式，一种是将系统设计成最佳的无码间干扰的系统，即采用匹配滤波器，发送滤波器和接收滤波器对称的系统，发送滤波器和接收滤波器都是升余弦平方根特性；另一种是不采用匹配滤波器方式，**升余弦滚降基带特性完全由发送滤波器实现**，接收滤波器为直通系统。

## 4. 由模拟滤波器设计 FIR 数字滤波器

由 (1)，可知升余弦滤波器（或平方根升余弦滤波器）的最大带宽为  $1/T_c$ 。根据时间抽样定理，可知时域抽样频率至少为  $2/T_c$ ，即一个比特周期内的抽样点数为至少为 2。设实验中一个比特周期内的抽样点数为  $A$ ， $A \geq 2$ 。实验中将时间抽样间隔  $T$  归一化为 1，即抽样频率也为 1， $f_s = 1$ ，而  $T_c = 4$ 。如  $A = 4$ ，则比特周期  $T_b = AT = 4T$ 。改变  $A$  的取值可以改变系统传输时的信息传输速率。时间抽样后，系统的频率特性是以  $f_s$  为周期的，折叠频率为  $f_s/2 = 2/T_c$ 。

由式 (1)、(2) 给出的滤波器的单位冲激响应是非因果的无限长的，关于原点偶对称。为满足因果性，可将有限长的非因果的单位冲激响应波形向右移位，移位数值为  $\tau = \frac{N-1}{2}$ ，滤波器具有线性相位， $N$  为 FIR 滤波器的长度。

根据理想滤波器的单位冲激响应或频率响应，可以采用窗函数法或频率抽样法，设计因果稳定的滤波器。

对理想滤波器的单位冲激响应进行时间抽样，截短、向右移位，加窗后，得到实际的因果的数字滤波器的单位冲激响应，表示为

$$h(nT) = h_d(t)|_{t=nT} \cdot w(n) \quad (0 \leq n \leq N-1)$$

其中  $w(n)$  为窗函数。不同的窗函数的形状得到的数字滤波器的过渡带宽度与阻带衰减不同。

对给定的理想滤波器的频率响应进行频率抽样，离散傅里叶反变换后向右移位，得到实际的数字滤波器的单位冲激响应。（由于计算机的精度，IDFT 后为复数，取模变为实数。）

实验中，窗函数的长度和频率抽样点数设定为滤波器的长度。

## 5. 基带传输系统（离散域分析）

✧ 输入符号序列  $\{a_l\}$

✧ 发送信号

$T_b = AT$ ，比特周期，二进制码元周期， $A$  为一个比特周期的抽样点数。

$$d(nT) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(nT - l \cdot AT) \quad (3)$$

✧ 发送滤波器

滤波器的频率响应的样值为  $G_T(k\Delta f)$ ，或单位冲激响应为

$$g_T(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} G_T(k\Delta f) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

✧ 发送滤波器输出

$$\begin{aligned} x(nT) &= d(nT) * g_T(nT) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \delta(nT - l \cdot AT) * g_T(nT) \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} a_l g_T(nT - l \cdot AT) \end{aligned} \quad (5)$$

✧ 信道输出信号或接收滤波器输入信号

$$y(nT) = x(nT) + n(nT) \quad (6)$$

✧ 接收滤波器

频率响应为  $G_R(k\Delta f)$ ，单位冲激响应为

$$g_R(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} G_R(k\Delta f) \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (7)$$

✧ 接收滤波器的输出信号

$$\begin{aligned} r(nT) &= y(nT) * g_R(nT) = d(nT) * g_T(nT) * g_R(nT) + n(nT) * g_R(nT) \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} a_l g(nT - l \cdot AT) + n_R(nT) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $g(nT) = g_T(nT) * g_R(nT)$ 。

- ✧ 如果位同步理想, 发送滤波器和接收滤波器的延时分别为  $n_1, n_2$ , 则抽样时刻为  $l \cdot AT + (n_1 + n_2)T, 0 \leq l \leq L-1$ .
- ✧ 抽样点数值为  $r(lAT + (n_1 + n_2)T), 0 \leq l \leq L-1$ .
- ✧ 判决为  $\{a'_l\}$

### 三、回答实验预习问题

- 1、什么是调制? 调制在通信系统中的作用和功能是什么?
- 2、对正弦波载波, 有几种调制方式? 写出常用的调制方式的名称和英文缩写。
- 3、画出基带传输系统的框图, 说明各个模块的功能作用。
- 4、画出包括基带处理和同步的完整的 BPSK 通信系统的组成框图。
- 5、什么是码间干扰? 什么是噪声干扰? 如何克服这两种干扰?
- 6、什么是匹配滤波器? 作用是什么?
- 7、什么是最佳基带系统? 其发送滤波器和接收滤波器有何关系? 写出发送滤波器或接收滤波器的幅度响应特性的公式。
- 8、实验系统中的“匹配滤波器”方式和“非匹配滤波器”方式有什么区别? 两种方式下, 发送滤波器输出信号、接收滤波器输出信号有何相同和不同之处?
- 9、什么是无码间干扰的基带系统? 其传输函数和单位冲激响应有何特点?
- 10、对基带传输系统, Nyquist 带宽和 Nyquist 速率的定义是什么? 基带系统的最大频带利用率是多少? 对 BPSK 调制系统, 最大频带利用率是多少?
- 11、对具有滚降特性的基带系统, 滚降因子的作用是什么? 频带利用率是多少?
- 12、什么是伪随机序列? 伪随机序列的特点是什么? 在通信系统中的作用是什么?
- 13、写出窗函数法设计升余弦滤波器的实现步骤和具体思路。



- 14、写出频率抽样法设计平方根升余弦滤波器的实现步骤和具体思路。
- 15、理解数字基带系统信号传输过程,进行子函数的初步设计,给出子函数功能,并给出主函数的设计思路。

## 四、实验内容

### (一) 发送滤波器与接收滤波器设计

不调用滤波器设计函数,自己编写程序,分别采用窗函数法(选用 Blackman 窗)和频率抽样法,设计线性相位的数字 FIR 发送滤波器与接收滤波器。**将设计的滤波器的单位冲激响应数据存储到数组或文件中,以备调用。**

#### 1、滤波器设计的有关参数

$T = 1s$ ,  $f_s = 1Hz$ ,  $T_c = 4$ ,  $N = 35, 45, 55$ 。滚降系数可变。

- 2、窗函数法设计非匹配形式的基带系统的发送滤波器(升余弦滚降滤波器)
- 3、频率抽样法设计匹配形式的基带系统的发送滤波器(平方根升余弦滤波器)
- 4、回答问题

- 1) 计算并画出两种发送滤波器的时域单位冲激响应波形、归一化的幅频特性和增益图形(用 dB 表示)。滤波器的群延时是多少?
- 2) 改变滤波器长度、滚降系数,滤波器的第一零点带宽和第一旁瓣衰减(或阻带的最小衰减)指标有何变化?列表并作图说明。
- 3) 根据 1) 2), 改变滚降系数,从时域和频域进行对比分析,总结两种发送滤波器的特点。

### (二) 二进制数字基带系统设计和实现

根据离散域基带系统模型,按照模块化设计的思想,编写程序,设计无码间

干扰的二进制数字基带传输系统。要求要传输的二进制比特个数、比特速率  $R_b$  (可用与抽样间隔  $T$  的关系表示或用每周期抽样点个数  $A$  表示)、信噪比  $SNR$ 、滚降系数  $\alpha$  是可变的。

1、根据系统功能要求,设计子函数的输入和输出参数,完成子函数设计和调试。

**注意: 子函数命名用英文表示。**有关内容描述如下:

#### 1) 双极性二进制信源生成

生成一个 0、1 等概率分布的二进制信源序列(伪随机序列)。可用 MATLAB 中的 rand 函数生成一组 0~1 之间均匀分布的随机序列,如产生的随机数在(0, 0.5) 区间内,则为-1;如果在 (0.5, 1) 区间内,则为 1。

#### 2) 发送信号生成

根据 (3) 式,设计发送信号生成子函数,能画出信号波形。

#### 3) 发送滤波器输出信号生成和计算每比特平均能量 $E_b$

根据 (5) 式,完成计算发送滤波器输出信号子函数,可以选择匹配滤波器模式和非匹配滤波器模式,能画出信号波形。

#### 4) 给定信噪比 $SNR(dB)$ , 计算高斯噪声标准方差,并生成高斯噪声序列。

由发送滤波器输出信号的总能量,根据发送比特个数,计算出发送信号的平均比特能量为  $E_b$ 。设高斯白噪声信号的单边功率谱密度为  $N_0$ , 则信噪比为

$$SNR = 10 \cdot \log_{10}(E_b / N_0) \text{ dB}。$$

给定信噪比,噪声的单边功率谱密度和高斯噪声的标准方差为

$$N_0 = \frac{E_b}{10^{SNR/10}}, \quad \sigma = \sqrt{N_0/2}$$

根据标准方差，调用有关函数生成高斯噪声序列。

#### 5) AWGN 信道输出子函数

将一定标准方差的噪声序列，叠加到发送滤波器的输出信号上。注意噪声功率（方差）与信噪比的关系。（不能调用 awgn.）

#### 6) 接收滤波器输出信号生成

根据（8）式，计算接收滤波器输出信号，可以选择匹配滤波器模式和直通模式。

#### 7) 抽样判决点信号生成

根据滤波器输出信号的延时，确定第一个抽样点的时间位置。位同步理想情况下，对接收滤波器输出信号进行抽样，得到抽样判决点信号。

#### 8) 判决

#### 9) 画眼图子函数

根据眼图的显示原理，完成信号眼图显示子函数，每屏信号显示 4 个码元周期。

根据每屏显示的信号点数，将整个信号分段。在同一图中把每段信号分别画图，合成的图形构成此信号的眼图信号。

#### 10) 误比特率计算子函数

比较信源信息序列与接收的判决后的信号，计算误比特个数和误比特率。

### (三) 二进制数字基带系统仿真和性能测试

给定要传输的二进制比特个数、比特速率  $R_b$ 、信噪比  $SNR$ 、滚降系数  $\alpha$ ，合理调用设计的子函数，构建非匹配模式和匹配模式的数字基带传输系统，**用一个主函数实现**。对图形进行分析时，可以利用全部或部分数据，分析整体和细节特征。

1、 假设加性噪声不存在，传输 1000 个二进制比特，比特速率  $R_b = 1/T_c$ ，比特间隔为  $T_b = 4T$ ，基带系统不采用匹配滤波器。根据接收滤波器的输出信号的眼图，判断有无码间干扰。**从理论方面解释实验现象。注意考虑滤波器的延时，将不准确的数值抛弃，选取有效的信号来画眼图。同时注意确定第一个抽样点的位置，抽样后进行判决，计算误比特个数和误比特率。**

2、 假设加性噪声不存在，传输 1000 个二进制比特，基带系统不采用匹配滤波器，比特间隔为  $T_b = 3T$ ， $T_b = 5T$ ， $T_b = 8T$ 。根据接收滤波器的输出信号波形的眼图，判断有无码间干扰。**从理论方面解释实验现象。**抽样后进行判决，计算误比特个数和误比特率。

3、 传输 1000 个二进制比特，比特速率  $R_b = 1/T_c$ ，信噪比分别取 1dB、5dB、10dB、20dB 时，基带系统分别为匹配滤波器形式和非匹配滤波器形式、滚降系数为 0.35，得到相应的恢复数字信息序列。

注意：基带系统分别为匹配滤波器形式和非匹配滤波器形式时，对接收滤波器输出信号进行抽样时，抽样时刻是否相同？调用 matlab 的星座图函数画出接收抽样判决点信号的星座图。根据星座图的坐标取值，判断噪声对信号的影响程度和信号的传输质量。讨论信噪比、是否采用匹配滤波器对系统信息传输质量的影响。

响。画图时可以采用不同的颜色进行区分对比。从理论方面解释实验现象。

## 五、实验报告要求

- 1、用自己的语言，简要描述基带系统各组成部分的原理（**禁止抄袭实验讲义**），编程实现各模块，关键代码注释，给出子函数的输入输出变量含义。
- 2、分析实验结果，总结概括，写出完整的实验报告，包括算法实现流程、数据、图表、分析和结论，编程过程中遇到的问题和解决方案，实验收获。注意实验报告概念清晰、结构合理、层次分明、语句通顺、版式规范。
- 3、**画图时注意标注坐标轴的含义和单位。仿真图形清晰**，每个图形要编号并加以说明。具体说明此图形对应的具体参数配置是什么。**报告中给出的图形和文字需要具有充分的信息量，简单精炼。**
- 4、实验报告进行排版，排版注意：字体大小、行距、段落间隔、图表编号说明。同时，**设计好各级标题，自动生成目录，要求实验报告长度不能超过 20 页。**排版时，代码精简，图形可灵活排列，一行多图。
- 5 **报告重点描述：**1) **编程实现原理、思路，用公式和流程图等表示；**2) **理论联系实际，对实验结果进行理论分析，找到有关的理论依据。**
- 6 实验报告需要**体现个人独特性的工作**，报告雷同者一律不合格。
- 7 建议实验报告内容包括：
  - 1) 数字基带传输系统基本原理，给出有关基本概念和术语；
  - 2) 发送滤波器设计和性能研究；
  - 3) 基带系统软件设计，给出子函数设计和实现思路、关键代码；
  - 4) 基带系统性能研究，仿真结果和分析；
  - 5) 问题、解决方案和收获。

8、纸质版一份和电子版，邮箱：mapiming@qq.com。