



# 通信原理 实验报告

实验名称 BPSK 数字通带传输系统仿真

姓 名 卢泽熙

学 号 3220102478

实验日期 December 23, 2024

指导老师 陈惠芳

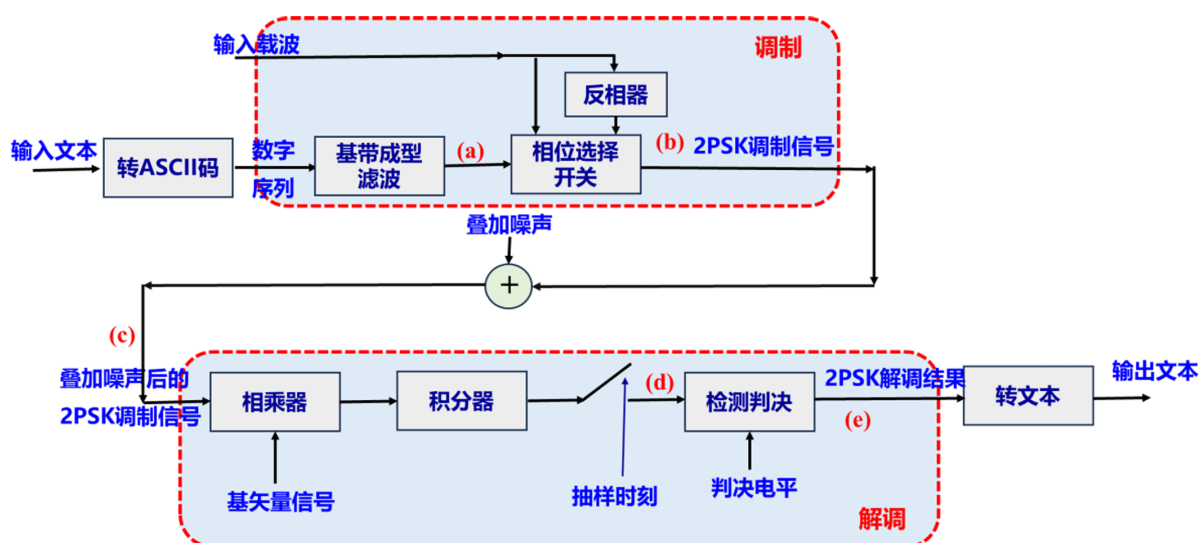
## 1 实验要求

构建基于 BPSK 的数字通带传输系统，发送端采用升余弦成型滤波 ( $\alpha=0.25$ )，考虑加性高斯白噪声信道条件下，接收端采用相干解调，采用 MATLAB 仿真实现该数字通带传输系统：

- (1). 已知输入序列 **011101000111**，码元速率为 50bps，调制载波为 5kHz 正弦信号。当接收信噪比为  $-5dB$ ,  $5dB$  时，画出 BPSK 调制解调框图标识位置 (a), (b), (c), (d), (e) 波形；
- (2). 发送下述文本，给出接收信噪比为  $-10dB$ ,  $-5dB$ ,  $0dB$ ,  $5dB$ ,  $10dB$  的解调输出结果。

Although individual definitions of communication vary, those definitions often include some of the same essential elements. Seven important components of the communication process include participants, symbols, encoding, decoding, channels, feedback, and noise.

BPSK 调制解调系统框图如下所示：



## 2 实验原理

### 2.1 升余弦成型滤波

升余弦滤波器是一种经常用于数位调变的脉冲整形滤波器，它能够最大限度地减少符号间干扰 (ISI)。升余弦滤波器频率响应如下：

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

滚降因子 ( $\alpha \in [0, 1]$ ) 是升余弦滤波器的关键参数，用于控制滤波器的过渡带宽。滚降因子决定了滤波器主瓣之外频谱衰减的缓急程度。当  $\alpha = 0$  时，滤波器退化为理想矩形滤波器，频谱完全集中但难以实现；当  $\alpha = 1$  时，滤波器的过渡带最宽，频谱逐渐平滑衰减。滚降因子的大小直接影响信号带宽和码间干扰 (ISI) 的权衡：较小的  $\alpha$  提供更窄的带宽，但容易引入 ISI；较大的  $\alpha$  提供更好的抗干扰能力，但占用更多带宽。

下图是具有不同  $\alpha$  值的升余弦成型滤波器：

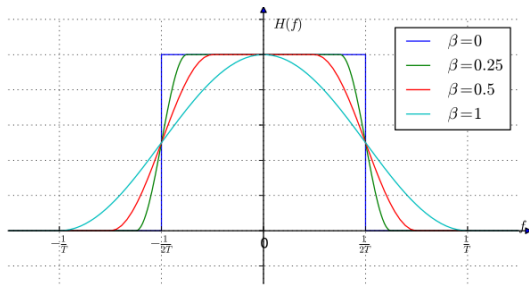


Figure 1: 频谱特性

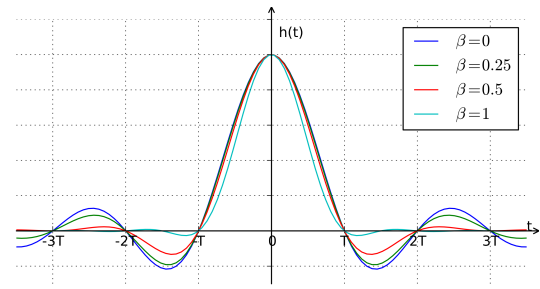


Figure 2: 时域信号

## 2.2 BPSK 调制解调

BPSK (Binary Phase Shift Keying, 二进制相移键控) 是一种简单而高效的数字调制方式，通过改变载波信号的相位来表示数字数据的 0 和 1。BPSK 信号的时域表达式为：

$$s_{BPSK} = A \cos(\omega_c t + \varphi_n)$$

式中， $\varphi_n$  表示第  $n$  个符号的绝对相位，即

$$\varphi_n = \begin{cases} 0, & \text{send "0"} \\ \pi, & \text{send "1"} \end{cases}$$

对于 A 类 BPSK 调制, 已调信号可写成

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t + \varphi_k) g_T(t - kT), \quad \varphi_k = \{0, \pi\}$$

在一个符号间隔  $(0, T)$  中考虑信号码元:

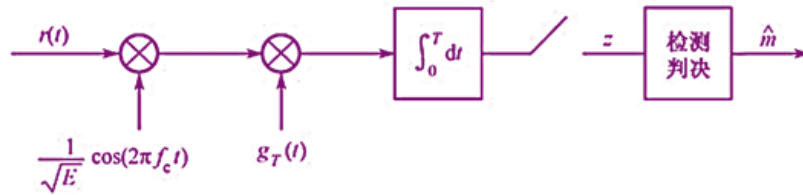
$$s_0(t) = -g_T(t) \cos(2\pi f_c t), \quad \text{发送 "0"}$$

$$s_1(t) = g_T(t) \cos(2\pi f_c t), \quad \text{发送 "1"}$$

这是一个一维调制, 其基矢量信号为

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{E}} g_T(t) \cos(2\pi f_c t)$$

根据基矢量信号, 可以画出 BPSK 的解调接收框图, 如下图所示:



### 2.3 误码率计算

误码率 (BER) 是信号被误判的概率, 对于 BPSK, 误码率的表达式为:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

- $Q(x)$ :  $Q$  函数, 表示标准正态分布的右尾概率;
- $E_b$ : 每比特的能量;
- $N_0$ : 噪声功率谱密度。

在高信噪比 (SNR) 条件下, BER 可以近似为:

$$P_e \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}}$$

### 3 仿真流程：任务一

#### 3.1 基本参数设定

首先根据题目条件设定基本参数。采样频率  $F_s$  设置需要遵循奈奎斯特定理，为了提高仿真精度，确保波形连续性和信号解调精确性，将其设置为 10 倍载波频率。MATLAB 代码如下：

```
1 Rb = 50;           % 码元速率 (bps)
2 Tb = 1/Rb;        % 码元周期 (s)
3 Fc = 5e3;         % 载波频率 (Hz)
4 Fs = 10*Fc;       % 采样频率 (Hz)
5 alpha = 0.25;     % 滚降因子
6 SNR = [-5, 5];    % 信噪比 (dB)
7 data = [0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 1]; % 输入数字序列
8 N = length(data); % 输入数字序列长度
9 t = 0:1/Fs:N*Tb-1/Fs; % 时间域
```

#### 3.2 生成基带信号

该部分实现数字序列到基带信号的转换，即将输入数字序列中 0 和 1 映射为 -1 和 1，这种转换是为了实现后续的 BPSK 调制。实现代码如下：

```
1 baseband = kron(2*data-1, ones(1, Fs*Tb));
```

baseband 是生成的时间连续的基带信号向量。

#### 3.3 基带成型滤波

将生成的基带信号进行基带成型滤波（升余弦滤波器），以限制信号的带宽，提高频谱利用率，并减少符号间干扰（ISI）。升余弦滤波器滚降系数  $\alpha = 0.25$ ，实现代码如下：

```
1 span = 10;
2 rrcFilter = rcosdesign(alpha, span, Fs*Tb, 'sqrt');
3 baseband_filtered = conv(baseband, rrcFilter, 'same');
```

处理后的信号 `baseband_filtered` 是一个经过滤波优化的基带信号，其长度与原信号一致。该信号经过根升余弦滤波器处理后，适合进一步的调制和传输步骤。

### 3.4 BPSK 调制

将基带信号搬移到高频频段，便于信号在无线信道或其他物理介质中传输。BPSK 调制后，信号的时域表达式可表示为：

$$s(t) = \begin{cases} \cos(2\pi F_c t), & \text{基带信号为“1”时} \\ -\cos(2\pi F_c t), & \text{基带信号为“0”时} \end{cases}$$

信号的频谱中心位于载波频率  $F_c$  处，带宽由基带信号的带宽和成型滤波器的滚降因子  $\alpha$  决定。

```
1 carrier = cos(2*pi*Fc*t);  
2 bpsk_signal = baseband_filtered .* carrier;
```

### 3.5 叠加噪声

在数字通信系统的仿真中，噪声是一个不可忽视的因素。通过在传输信号中叠加加性高斯白噪声 (AWGN)，可以模拟真实信道中信号的传输环境。

```
1 rx_signal = awgn(bpsk_signal, SNR(k), 'measured');
```

`measured` 表示 MATLAB 自动测量输入信号的功率，并据此调整噪声功率以满足指定的信噪比。加入噪声后的信号 `rx_signal` 是模拟接收端接收到的信号，表示为  $r(t) = s(t) + n(t)$ 。在仿真中，不同信噪比下的 `rx_signal` 可用于分析系统的抗噪性能。

### 3.6 BPSK 解调

#### 3.6.1 接收滤波

根据 BPSK 接收机框图，接收滤波主要包括两个部分：

- (1). 与基函数  $\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{E}} g_T(t) \cos(2\pi f_c t)$  相乘；
- (2). 通过积分器积分。

实现代码如下所示，其中 trapz 使用梯形法对符号的时间范围内的信号进行数值积分：

```
1 demod_signal = rx_signal .* cos(2*pi*Fc*t);
2 demod_signal = conv(demod_signal, rrcFilter, 'same');
3 num_symbols = length(data);
4 demodulated = zeros(1, num_symbols);
5 for i = 1:num_symbols
6     start_idx = (i-1)*Fs*Tb + 1;
7     end_idx = i*Fs*Tb;
8     demodulated(i) = trapz(t(start_idx:end_idx), demod_signal(start_idx:end_idx
9     ));
10 end
```

### 3.6.2 门限判决

比较检测结果的符号，其中正值对应比特 1，负值对应比特 0，最终得到通过数字通带传输后的数字序列。实现代码如下：

```
1 received_bits = demodulated > 0;
```

## 4 仿真流程：任务二

任务二需要传输的文本：

```
1 text = 'Although individual definitions of communication vary, those
        definitions often include some of the same essential elements. Seven
        important components of the communication process include participants,
        symbols, encoding, decoding, channels, feedback, and noise.'
```

### 4.1 ACSII 码转换

文本需要转换为 ASCII 码值，并进一步将 ASCII 码表示为二进制序列，才能供后续的 BPSK 数字通带传输使用。实现代码如下：

```
1 % 输入文本转为ASCII码
2 ascii_data = double(text);
3 binary_data = dec2bin(ascii_data, 8)';
4 binary_data = binary_data(:)' - '0';
```

- 文本输入：将输入的英文文本通过 MATLAB 中的 `double` 函数转换为 ASCII 码。每个字符都会被转换为对应的整数值，形成一个数值数组 `ascii_data`。
- 二进制转换：利用 MATLAB 中的 `dec2bin` 函数，将每个 ASCII 码值转换为对应的 8 位二进制字符串。
- 二进制序列展开：通过转置和线性化操作，将二维二进制矩阵展开为行向量，同时将字符型的二进制表示转换为数字型（0 和 1 组成的向量）

这一步的输出是一个包含输入文本所有二进制比特的行向量 `binary_data`，其长度为文本字符数的 8 倍，用于后续的 BPSK 调制。实现代码如下所示：

## 4.2 BPSK 的数字通带传输

数字序列传输过程与任务一相同，此处不再赘述。

## 4.3 文本转换

在 BPSK 传输和解调完成后，需要将接收的二进制比特重新转换为可读文本。代码如下：

```
1 % 译码为ASCII文本
2 received_binary = reshape(received_bits, 8, []).';
3 received_ascii = char(bin2dec(num2str(received_binary))');
```

接收端二进制序列 `received_bits` 按每 8 位分组，使用 MATLAB 中的 `bin2dec` 函数将每组 8 位二进制数转换为 ASCII 码值，再通过 `char` 函数将 ASCII 码值转换为字符，重构原始文本。

## 4.4 误码计算

统计转化后文本的误码率、误符号率，定量分析 BPSK 传输在不同信噪比下的性能表现：



```
1 % 计算误码率
2 [num_bit_errors, ber] = biterr(binary_data, received_bits);
3 total_bits = length(binary_data);
4 % 按字符（码元）统计误码
5 original_ascii = reshape(binary_data, 8, []).';
6 decoded_ascii = reshape(received_bits, 8, []).';
7 num_code_errors = sum(~all(original_ascii == decoded_ascii, 2));
8 total_codes = size(original_ascii, 1);
```

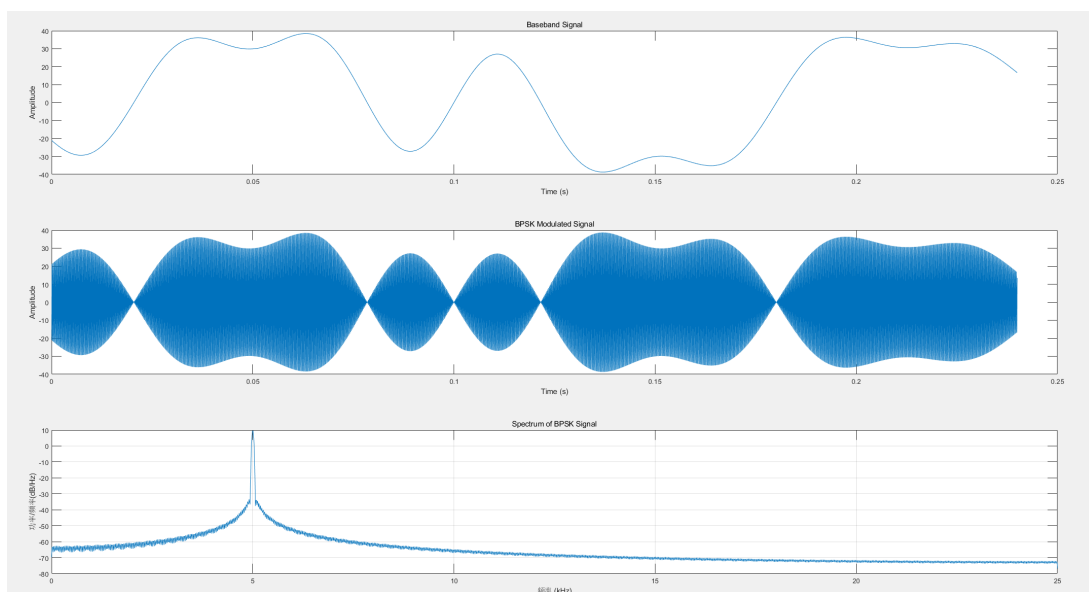
**误码率计算：**使用 `biterr` 函数比较发射端与接收端的二进制比特序列，统计错误比特的数量 `num_bit_errors` 和误码率 `ber`；

**字符级别误码统计：**按字符（8 位一组）分组比较发射端与接收端的二进制比特矩阵，统计解码错误的字符数量 `num_code_errors`，并计算总字符数 `total_codes`。

## 5 实验结果

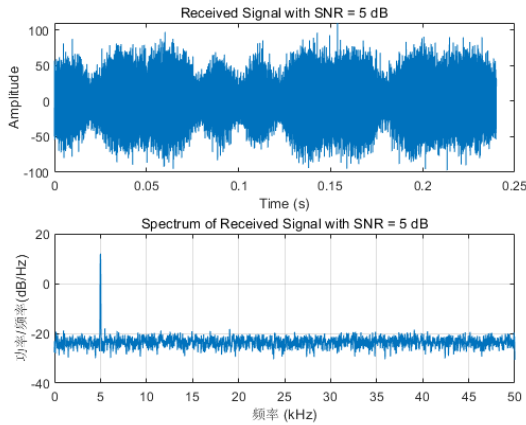
### 5.1 (a)(b) 点波形

基带滤波后信号、BPSK 调制后的信号及其频谱如下图所示：

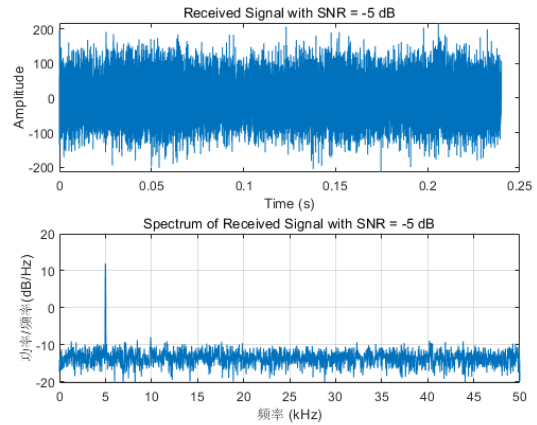


## 5.2 (c) 点波形

不同信噪比下 (c) 点波形如下所示：



SND=5dB

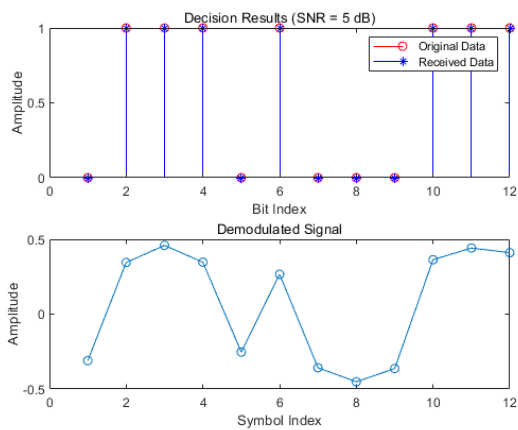


SND=-5dB

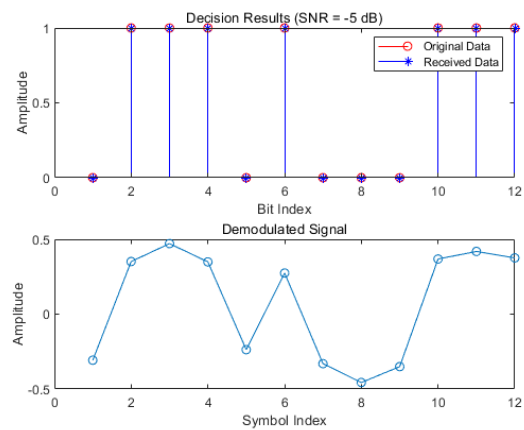
信噪比较小时，信号时域波形明显受到噪声影响，难以分辨；但频谱波形受影响较小。由图可得，频谱在 5kHz 处有明显尖峰，这是叠加载波导致的。

## 5.3 (d)(e) 点波形

(d)(e) 点波形如下所示，其中上图代表 (e) 点波形，下图代表 (b) 点波形：



SND=5dB



SND=-5dB

Decision Results 根据 Demodulated Signal 的正负输出数字序列，根据图片结果，信噪比为 -5dB、5dB 时设计的数字通信系统均能无误码接收数字序列。

## 5.4 文本解调输出结果

实验中不同信噪比文本解调结果输出如下：

```
>> TEXT
SNR = -10 dB
Decoded Text:
Although individual definitions of communication vary, those definitions often
Total Bits: 2088, Bit Errors: 0, Bit Error Rate (BER): 0
Total Codes: 261, Code Errors: 0
SNR = -5 dB
Decoded Text:
Although individual definitions of communication vary, those definitions often
Total Bits: 2088, Bit Errors: 0, Bit Error Rate (BER): 0
Total Codes: 261, Code Errors: 0
SNR = 0 dB
Decoded Text:
Although individual definitions of communication vary, those definitions often
Total Bits: 2088, Bit Errors: 0, Bit Error Rate (BER): 0
Total Codes: 261, Code Errors: 0
SNR = 5 dB
Decoded Text:
Although individual definitions of communication vary, those definitions often
Total Bits: 2088, Bit Errors: 0, Bit Error Rate (BER): 0
Total Codes: 261, Code Errors: 0
SNR = 10 dB
Decoded Text:
Although individual definitions of communication vary, those definitions often
Total Bits: 2088, Bit Errors: 0, Bit Error Rate (BER): 0
Total Codes: 261, Code Errors: 0
```

根据输出结果可知，各信噪比条件下解调文本均能实现完全精确传输。进一步实验表明，当信噪比降低至 -20dB 时开始出现误码：

```
SNR = -20 dB
Decoded Text:
Althoggh indivdital definitions of communicapion vary, thoóe definitions oftgn incluae some
Total Bits: 2088, Bit Errors: 10, Bit Error Rate (BER): 0.0047893
Total Codes: 261, Code Errors: 9
```

综上所述，该数字通信系统设计总体符合要求，在信噪比不是特别小时均能准确传输信号。

## 6 实验总结

通过本次实验，我成功构建并仿真了基于 BPSK 的数字通带传输系统，验证了其在不同信噪比条件下的传输性能与抗干扰能力。实验过程涵盖了从基带信号生成、成型滤波、BPSK 调制到解调以及最终的信号还原和误码率分析的完整流程，充分体现了数字通信系统的基本设计思想和实现方法。本实验以任务为导向，将通信系统分为多个功能模块（如基带信号生成、调制、信道加噪、解调等），通过逐步实现和验证，全面理解了数字通信系统的构成及其作用；通过对基带信号的升余弦成型滤波处理，减少了码间干扰 (ISI)，改善了频谱利用率，同时对滚降因子  $\alpha$  的选择与滤波器性能之间的权衡有了更直观的认识；此外，通过 MATLAB 实现了完整的仿真流程，掌握了关键函数（如 `awgn`、`rcosdesign`、`conv` 等）的应用，以及对实验数据的处理和可视化分析方法，为后续复杂系统的设计与仿真奠定了坚实的基础。