

# 《通信与网络》实验七

## 基带波形实验

清华大学 电子工程系

通信与网络课程组

2022年12月

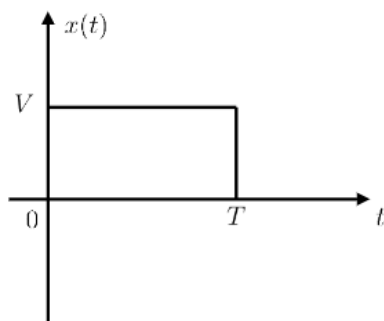
# 目录

- 基带波形重点回顾
- 实验内容和流程

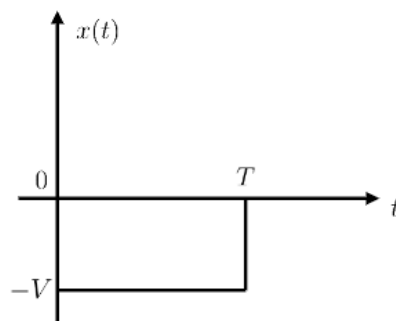
# 一、基帶波形重點回顧

# 基带传输

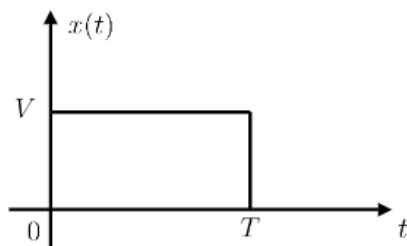
- 为了传输“电平”符号，用物理波形承载
  - 脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation, PAM)
  - 一种最简单的波形：矩形脉冲



表示“0”：能量  $V^2T$

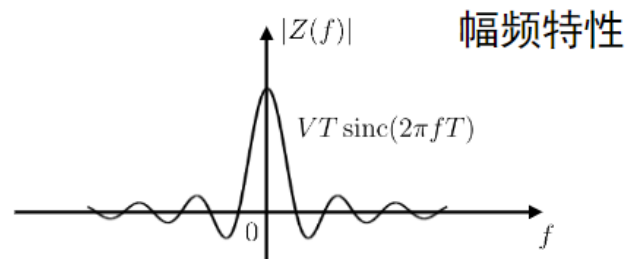


表示“1”：能量  $V^2T$



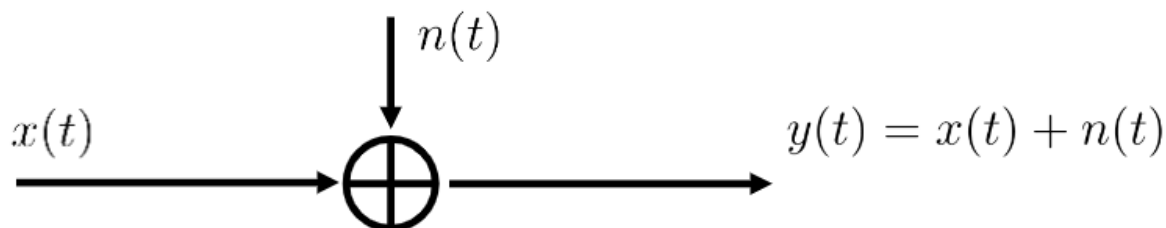
时域有限

傅立叶变换  
 $\mathcal{F}$



频域无限

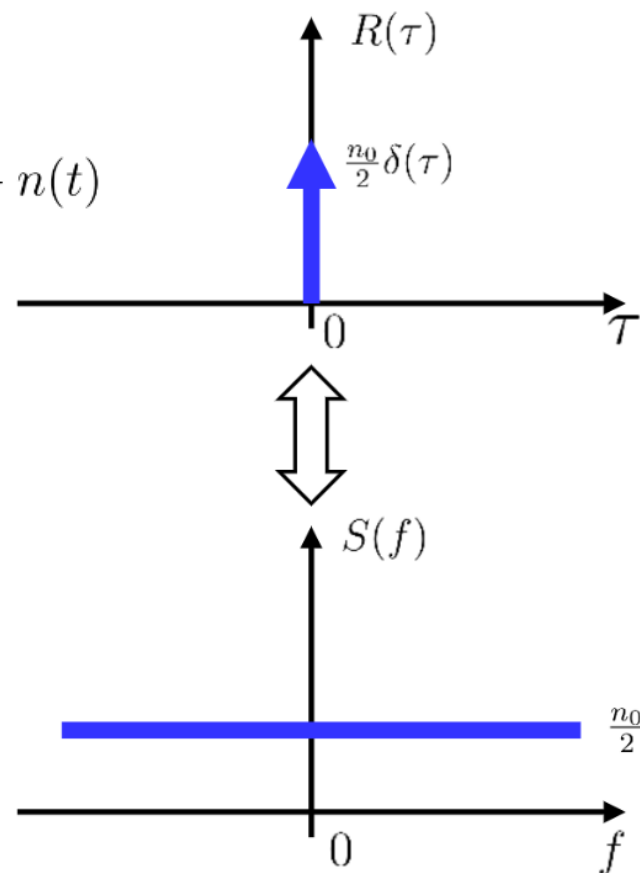
# 加性高斯噪声信道



- 若直接采样：
  - 方差  $\sigma^2 = R(0) = \frac{n_0}{2} \delta(0) \rightarrow \infty$

- 对应Simulink仿真（离散时间）

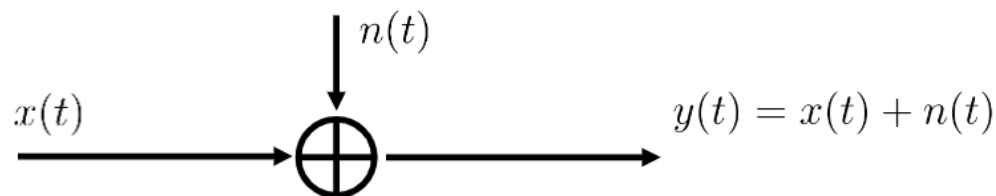
- 方差  $\sigma^2 = n_0 \cdot \frac{f_s}{2}$
- 与信号采样率成正比



$n_0$ : 单边功率谱密度

$\frac{n_0}{2}$ : 双边功率谱密度

## 两种信噪比



- 在Simulink中，AWGN模块采用两种信噪比

- 一种最直观的信噪比是信号功率 $E(x^2(t)) = E_s R_s$ 除以接收的噪声功率 $E(n^2(t)) = \sigma_n^2$ ，即我们前两次实验所使用的信噪比。

- 另一种信噪比是 $E_s/n_0$ ，其转换关系如下：

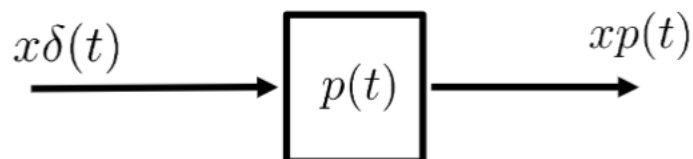
$$\frac{S}{N} = \frac{E_s R_s}{\sigma_n^2} = \frac{E_s}{n_0} \frac{2R_s}{f_s}$$

即与符号率 $R_s$ 和信号采样率 $f_s$ 的比值相关。在给定符号率下，信号的采样率越高，噪声方差越大。

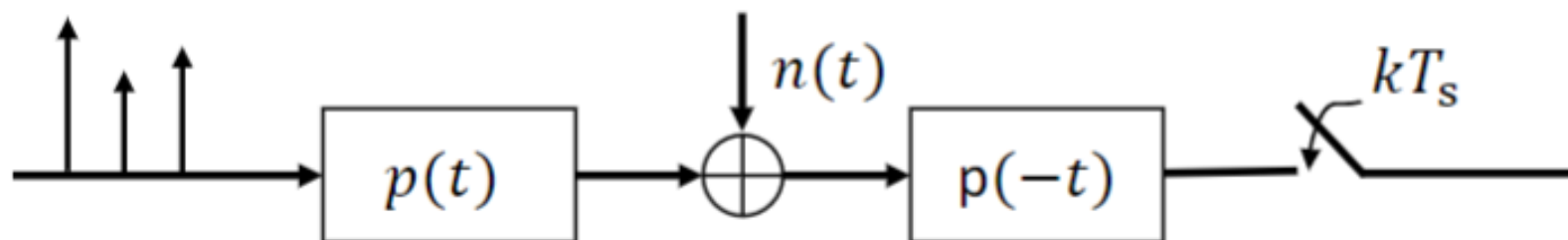
- 实际上，对于不同的采样率采用“软判决”是等价的

# 匹配滤波

- 发射机：用电平的冲激串卷积（调制）脉冲成型滤波器

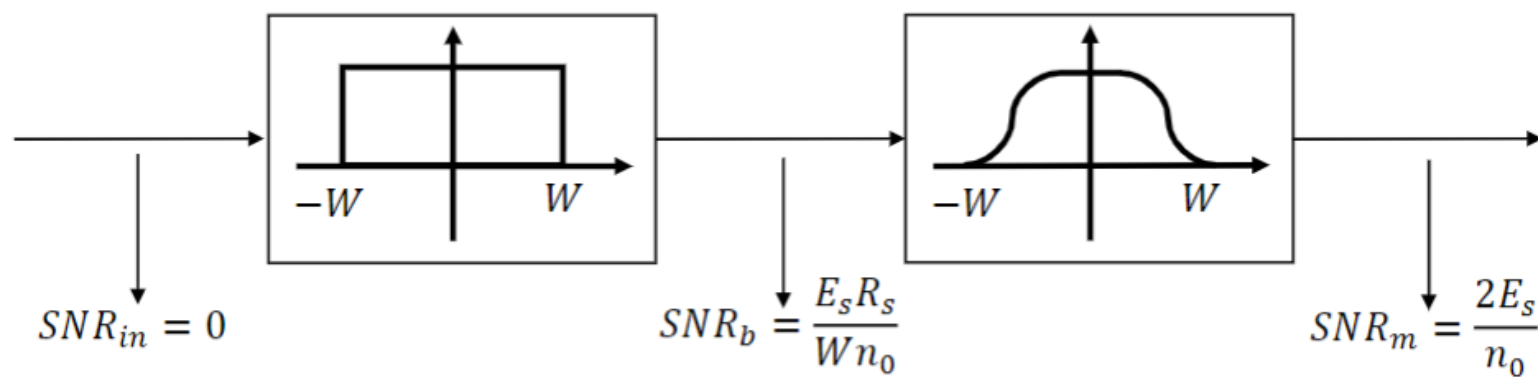


- 接收机：匹配滤波 + 采样 + 判决
  - 匹配滤波：用冲激响应  $p(-t)$  的滤波器滤波



# 匹配滤波后信噪比

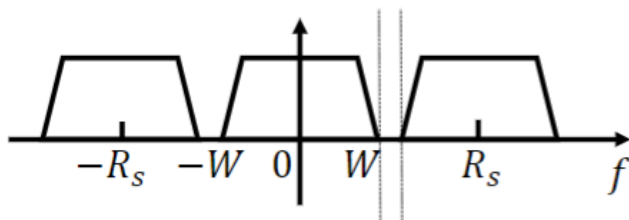
- 经过匹配滤波+采样后得到电平序列，此处信噪比为 $2E_s/n_0$ ，故误符号率与基带波形设计无关。
  - 例如二元双极性符号的误符号率为 $Q(\sqrt{2E_s/n_0})$
  - 但基带波形的设计实际会影响频谱效率 $\eta = R_b/W$



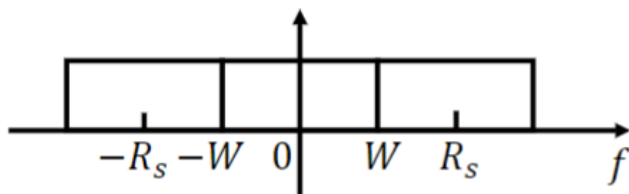


# 码间串扰

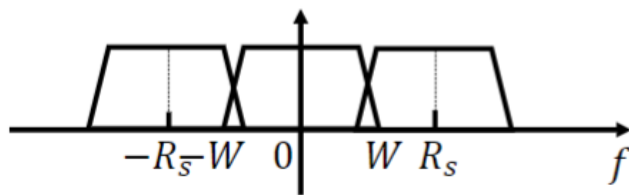
- 根据Nyquist准则，为了满足无码间串扰条件：
  - 给定符号率 $R_s$ 下最少使用带宽 $W = R_s/2$ ，此时脉冲波形的频域为理想低通，但理论上不可实现只能近似



$$W < R_s/2$$



$$W = R_s/2$$

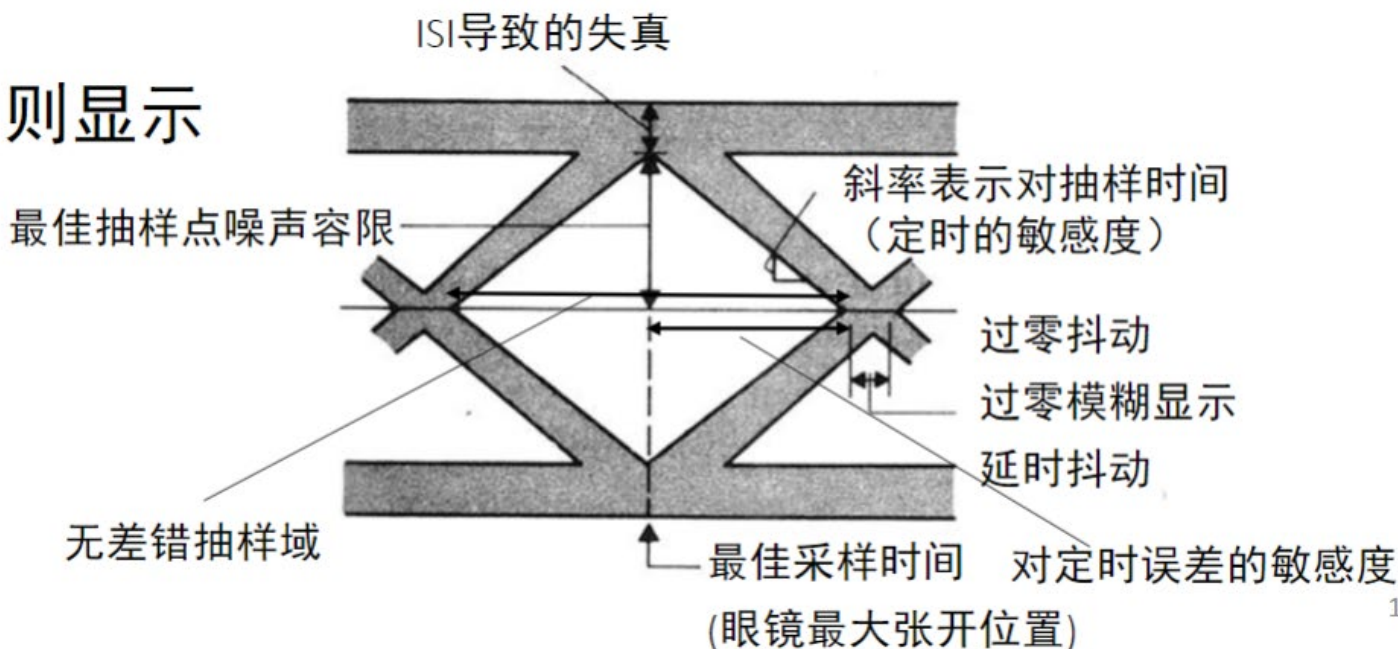


$$W > R_s/2$$

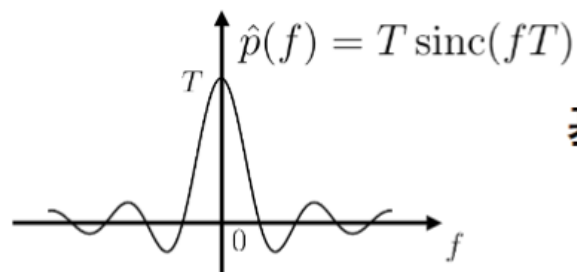
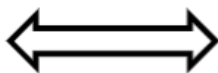
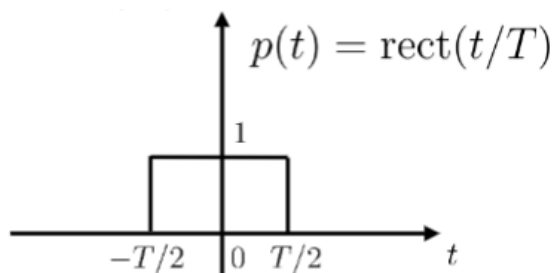
# 眼图

- 眼图：将接收处匹配滤波后的信号反复叠加
  - 眼图能体现码间串扰，若存在码间串扰，则在匹配滤波后的采样点（眼睛张开最大点）的取值更广，从而降低噪声容限，使得抗噪声性能下降。

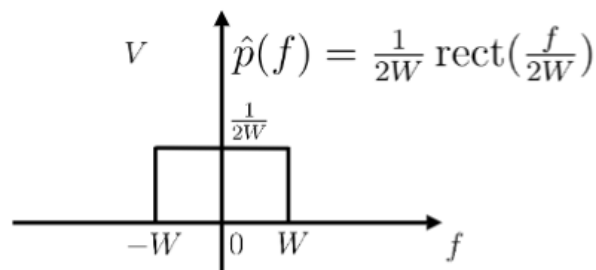
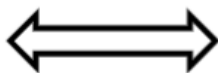
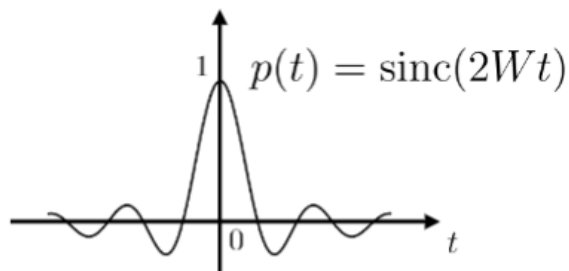
- 则显示



# 基本的基带脉冲波形



基带(baseband)  
频域无限

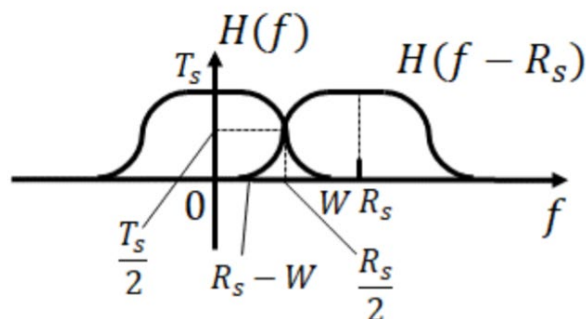


基带  
频域有限

- 但这两种理想情况在现实中均不可实现

# 根号升余弦滤波器

- 为了同时满足Nyquist准则和匹配滤波：
  - 设计 $p(f)$ 使得 $H(f) = |p(f)|^2$ ，其中 $H(f)$ 为升余弦

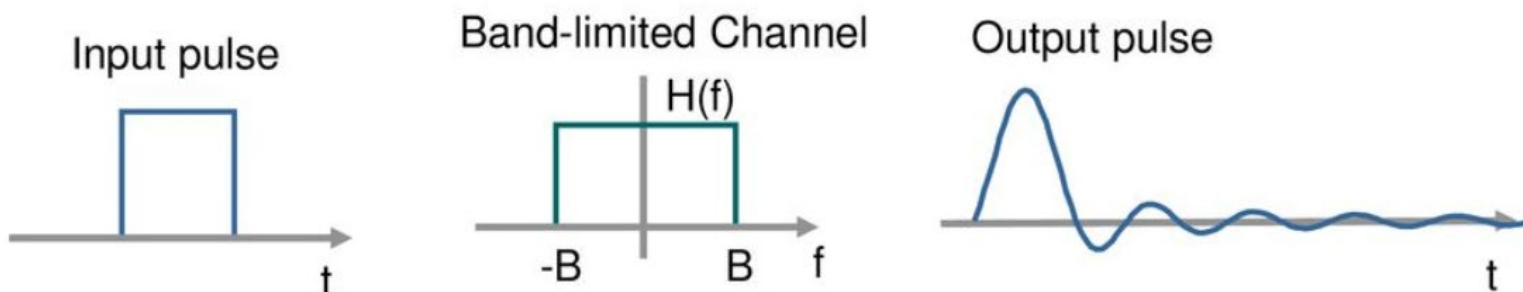


$$H(f) = \begin{cases} T_s, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2}R_s \\ \frac{T_s}{2} \left( \cos\left(\frac{\pi}{\alpha R_s} \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2}R_s\right)\right) + 1 \right), & \frac{1-\alpha}{2}R_s < |f| \leq \frac{1+\alpha}{2}R_s \\ 0, & |f| > \frac{1+\alpha}{2}R_s \end{cases}$$

- 滚降系数一般取 $\alpha \in [0.3, 0.7]$
- $\alpha$ 越大，物理实现越容易，但频谱效率降低

# 带限信道

- 现实中的信道是带限的 (Band-limited)
  - 因为往往需要在不同的频段同时传输信号，且避免与其他频段互相干扰，所以在发射机、接收机处都需要对信号进行滤波。
  - 基带信号由于信道带宽的限制，脉冲相当于受到平滑处理，一些脉冲波形也因此更容易产生符号间串扰（例如矩形脉冲）。

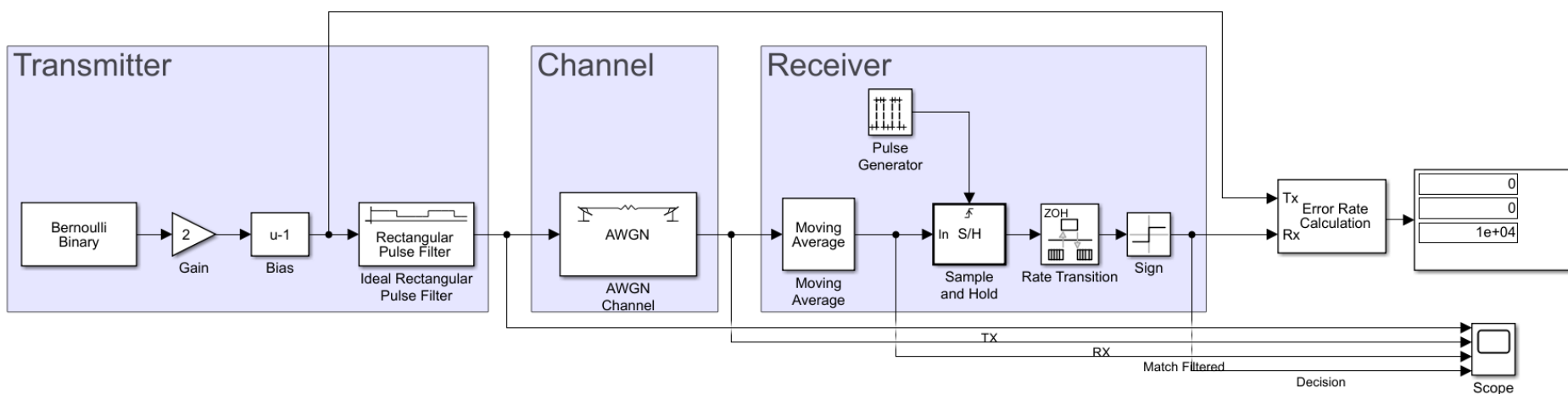


## 二、实验内容介绍

# 1. 矩形脉冲幅度调制

## • 搭建模型

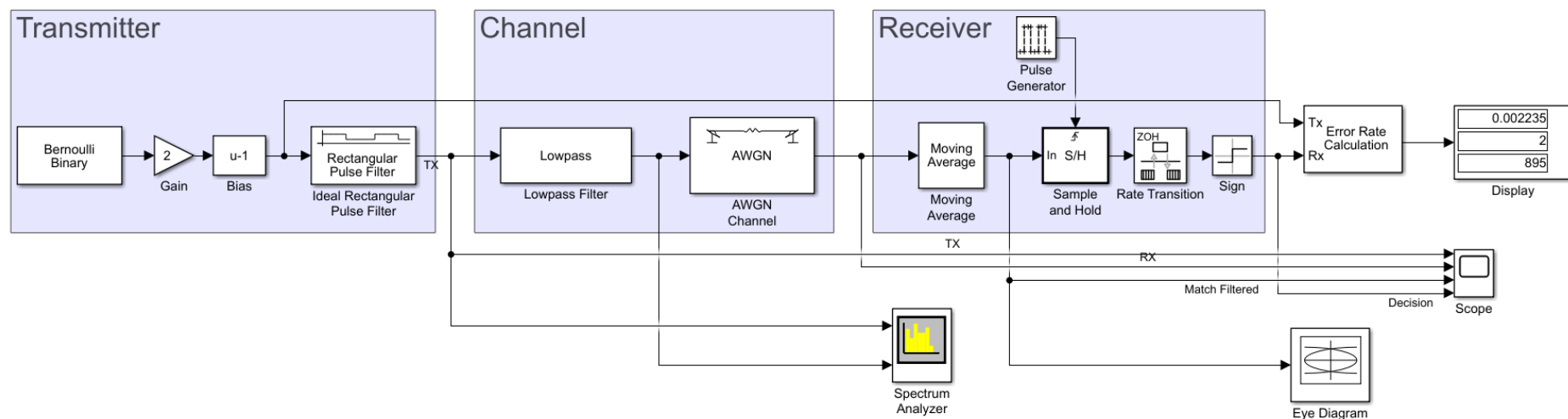
- 调制：理想矩形脉冲滤波器
- 匹配滤波：通过“移动平均”实现



- 观察矩形脉冲调制与解调过程
- 在不同的信噪比 $E_b/n_0$ 下记录误符号率
  - 对比二元双极性符号的理论误符号率

## 2. 带限AWGN信道

- 搭建模型
  - 在信道中添加低通滤波器



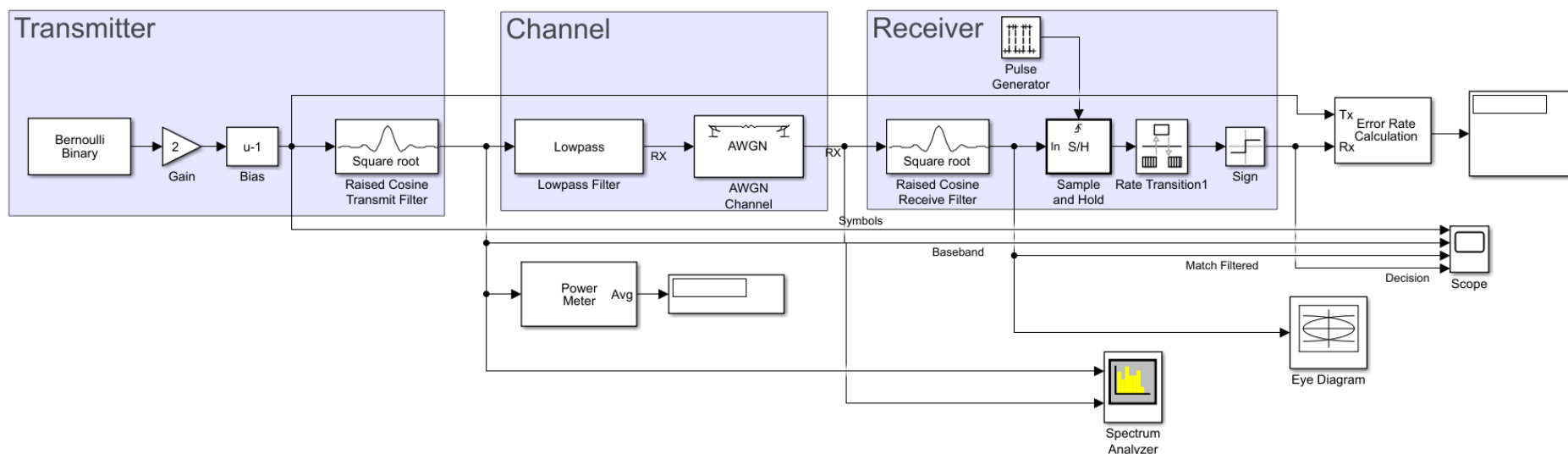
- 观察记录信号时域特征、功率谱、眼图
  - 着重观察是否体现符号间串扰
- 记录误符号率并与理想信道对比



### 3. 根号升余弦滤波器

- 搭建模型

- $\alpha = 0.5$ , 符号率  $R_s = 1\text{kHz}$ , 带宽  $W = \frac{(1+\alpha)}{2} R_s = 0.75\text{kHz}$
- 采用根号升余弦滤波器作为发送调制和接收



- 观察记录信号时域特征、功率谱、眼图

- 着重观察是否体现符号间串扰

### 3. 根号升余弦滤波器

- 绘制误符号率曲线

- 打开Matlab脚本exp7.m，修改模型文件名称
- 填写最优接收下二元双极性PAM误符号率与信噪比 $E_s/n_0$ 的理论关系
- 运行脚本绘制误符号率-信噪比曲线

```
1 open_system('pam_rc.slx');
2 SNR_list = linspace(-10, 10, 11); % in dB
3 ser_rc = zeros(1, length(SNR_list));
4 ser_th = zeros(1, length(SNR_list));
5
6 for i = 1:length(SNR_list)
7     SNR = SNR_list(i); % in dB
8     simOut = sim('pam_rc');
9     ser_rc(i) = simOut.ser(1);
10    ser_th(i) = % TODO
11 end
12 save_system;
13 close_system;
```

# 注意事项

- **提交实验报告至网络学堂**
- **实验报告需包括代码、实验流程记录、思考题回答**