

# 浙江大学

## 本科实验报告

课程名称：通信原理实验

姓 名：黄嘉欣

学 院：信息与工程学院

系：信息与工程学系

专 业：信息工程

学 号：3190102060

指导教师：龚淑君 金向东

2022 年 5 月 18 日

# 浙江大学实验报告

专业： 信息工程  
姓名： 黄嘉欣  
学号： 3190102060  
日期： 2022 年 5 月 18 日  
地点： 东四-319

课程名称： 通信原理实验      指导老师： 龚淑君 金向东      成绩： \_\_\_\_\_  
实验名称： 脉冲成型与匹配滤波      实验类型： 设计性实验      同组学生： 张维豆

## 一、实验目的

- ① 构建基本的数字通信发送、接收系统；
- ② 了解脉冲成型的基本概念；
- ③ 了解匹配滤波的基本概念；
- ④ 了解脉冲对齐的基本概念；

## 二、实验设备

- ① USRP 设备      1 台；
- ② 安装 LabVIEW 环境的电脑      1 台。

## 三、实验概要

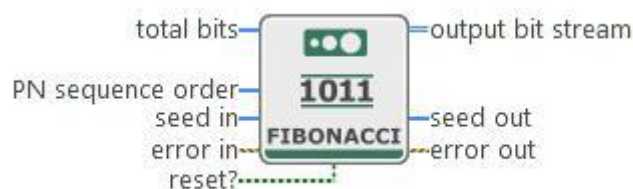
在数字通信系统中，数字信息必须要转换成模拟信号才能被发送出去。这种变换由脉冲成形滤波器完成，它将每一个数据符号转换成一个合适的模拟脉冲信号。由于脉冲信号的频谱决定了整个发送系统的频谱情况，因此脉冲成形滤波器的设计至关重要。为了限制频谱宽度，必须使用慢转换来平滑脉冲，这会导致脉冲信号超出一个符号时间，引入码间干扰。因此，必须在带宽和码间干扰之间做出权衡。

匹配滤波器负责从接收到的脉冲中捕捉数据符号。匹配滤波器的目标是通过最大化信噪比和最小化码间干扰，减小噪声的影响。

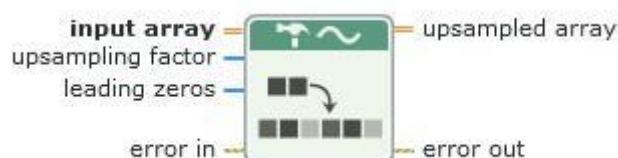
主要模块介绍：

以下是实验中将会用到的主要模块：

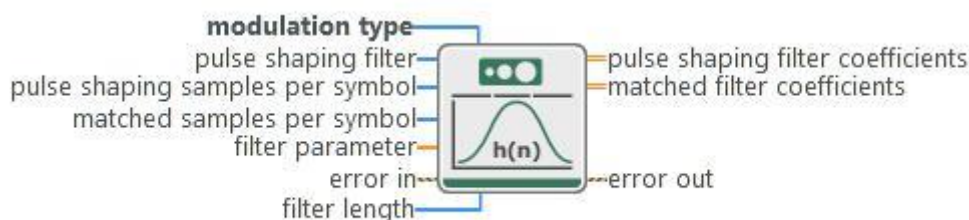
- (1) MT Generate Bits (Fibonacci, PN Order) (分析/Modulation/Digital)：产生 Fibonacci 伪随机序列，使用这个模块产生需要传输的数据。



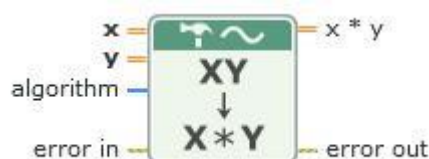
(2) 升采样 Upsample (分析/信号处理/调理)：根据给定的升采样因子，在一个序列中插入零。



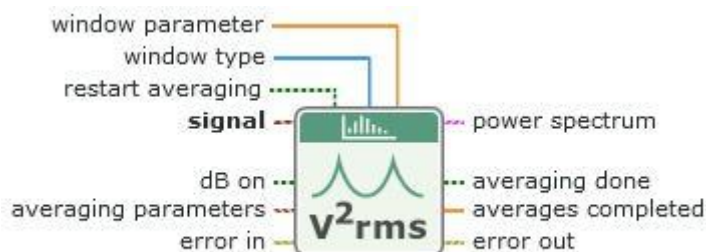
(3) MT Generate Filter Coefficients (分析/Modulation/Digital/Utilities)：计算滤波系数，用于在数字调制和解调中使用的脉冲成型和匹配滤波器。



(4) 卷积 (分析/信号处理/运算)：计算两个序列的卷积。



(5) FFT 功率谱和 PSD (分析/信号处理/测量)：计算时域信号的平均功率谱。



(6) MT Format Eye Diagram (分析/Modulation/Digital/Visualization)：对于一个给定的实数值波形，先将其分成片段，再在波形图上将这些片段以点的形式显示出来。片段的长度是基于符号率和眼图长度参数确定的。



#### 四、实验内容与步骤

##### ① 脉冲成形：

在 USRP 使用与边带传输实验发射机基本电路的基础上，构建一个发送电路。电路中使用脉冲成形和升采样来创建发送波形，使用二进制相移键控（BPSK）调制，BPSK 是最简单的相移键控（PSK）。载波信号的相位携带数据信息，在 BPSK 中，数据“1”对应 0 度，数据“0”对应 180 度。实验步骤如下：

- (1) 创建两个整型输入控件：Message length 和 Symbol rate。升采样因子 upsampling factor 的值由 IQ rate 和 Symbol rate 决定。对数据符号的升采样要在脉冲成形之前完成；
- (2) 产生比特数据：在程序框图中添加 MT Generate Bits 模块来产生一个 Fibonacci 伪随机序列。这个序列由二进制 0 和 1 组成。模块参数“PN sequence order”的默认值是 7，使用默认值。将“Message length”控制输入连接到模块的“total bits”端。
- (3) 比特数据编码成 BPSK 符号：使用乘法和减 1 模块将二进制 0 和 1 映射成符号-1 和 1（BPSK 编码）；
- (4) 创建一个 DBL 类型的显示变量，并将它命名为 Upsampling Factor（升采样因子）。使用合适的数学运算模块计算升采样因子（升采样因子定义为采样率/符号率）；
- (5) 升采样：在程序框图中添加 Upsample 模块，使用前面步骤中的 BPSK 编码符号和升采样因子，产生升采样符号；
- (6) 脉冲成形：添加 MT Generate Filter Coefficients 模块。右键点击模块的“pulse shaping filter”端，选择创建输入控件，创建“pulse shaping filter”端口。同样的，右键点击模块的“modulation type”端并选择创建常量，将它设置为“PSK”。将 Upsampling Factor 输入控件与模块的“pulse shaping samples per symbol”端相连。将“pulse shaping filter coefficients”作为输出。“filter length”取默认值 8，“filter parameter”（升余弦或均方根升余弦的滚降因子）取默认值 0.5。滤波器长度 filter length 是指在脉冲成形滤波器中符号所需的长度；

- (7) 卷积：使用卷积模块对升采样符号和脉冲成形滤波器系数作卷积运算；
- (8) 创建子 VI 函数 norm1D：将符号绝对值的最大值对符号进行归一化，使得符号值在-1 和 1 之间。在项目中创建一个 VI，命名为 norm1D.gvi，使用绝对值模块（数学/数值）和数组最大值与最小值模块（数据类型/数组），如下图 4.1.1 所示。点击“图标”按钮，给新建的子 VI 添加输入、输出端口：

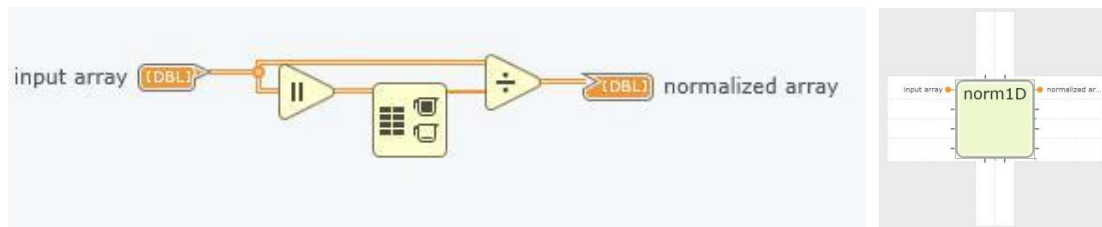


图 4.1.1 归一化电路

- (9) 回到发送电路程序框图界面，将“norm1D”子 VI 放入电路中，对卷积模块的输出进行归一化，再将归一化采样符号与 niUSRP Write Tx Data 的数据端相连；
- (10) 测量发送信号的频谱和眼图：使用创建波形模块从发送数据中构建时域波形。使用“倒数”模块从 IQ rate 中计算采样周期（dt），并将计算得到的采样周期与创建波形模块相连。添加“FFT 功率谱和 PSD”模块，并将它的函数配置为“功率谱”和“连续”，勾选“显示为 dB”。右键点击模块的功率谱端，创建一个显示控件。添加 MT Format Eye Diagram 模块（分析/Modulation/Digital/Visualization），将函数配置成“WDT”以接收波形数据，将“eye length”设置成 2，将 symbol rate 输入控件与模块相应端相连。右键点击模块的“eye diagram”端创建一个显示控件；
- (11) 保存此发送电路 VI 为“BPSKTx.gvi”；
- (12) 参数设置：

- a) IQ rate = 400k;
- b) carrier frequency = 1G;
- c) gain = 0;
- d) active antenna = TX1;
- e) Message length = 1000;
- f) Symbol rate = 10k.

## ② 问题 1:

- (1) 如果 PN 序列的阶数是 7，它的周期是多少？

- (2) 运行程序的时候，选择两种不同的脉冲成形滤波器：None 和 Root Raised Cosine，保存对应的频谱图和眼图。比较不同滤波器情况下的带宽、旁瓣和眼图打开情况。
- (3) 选择 Root Raised Cosine 滤波器，将 Symbol rate 改为 100k，跟 Symbol rate 为 10k 时的频谱和眼图作比较。

③ 匹配滤波：

在 USRP 使用与边带传输实验接收机基本电路的基础上，构建一个完成匹配滤波功能的接收机电路。

实验步骤如下：

- (1) 创建两个整型输入控件：信息长度 Message length 和 Symbol rate。降采样因子由 IQ rate 和 Symbol rate 决定。在发送端，在脉冲成形前对符号作了升采样处理；
- (2) （降采样因子）接收机对接收到的采样信号进行降采样处理，计算降采样因子的方法类似于升采样，这两个数值可以不一样；
- (3) 接收机捕获一帧数据，需要计算捕获到的采样数（提示：需要用到降采样因子和信息长度），并且将采样数与 niUSRP Fetch Rx Data 模块的“number of samples”端相连。移除 while 循环，只作一次数据接收，接收机接收到一帧数据后停止接收。niUSRP Fetch Rx Data 模块的函数配置为 CDB WDT 类型；
- (4) （匹配滤波）添加 MT Generate Filter Coefficients 模块，在模块“pulse shaping filter”端口点击右键创建控制终端，创建“modulation type”常量端口，将它的值设置为“PSK”。将前面步骤中计算的到的降采样因子的值与“matched samples per symbol”相连。将“matched filter coefficients”端作为输出；
- (5) （卷积）使用卷积运算模块，对接收到的采样值和匹配滤波器的输出进行卷积运算。NiUSRP Fetch Rx Data 模块输出的数据是 CDB WDT 类型的，卷积模块处理的数据类型是 CDB 数组类型，所以需要使用波形属性模块从接收数据中获取 CDB 数组类型数据。添加模型属性模块，并将其行为设置成“全部为读取”。部分电路图如下图 4.3.1 所示：

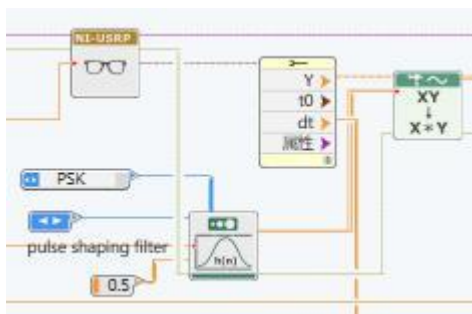


图 4.3.1 部分发送电路

- (6) (下采样&BPSK 解调) 添加降采样模块，将卷积输出连入模块的信号输入端，将前面计算得到的降采样因子数值连入模块的降采样因子端口。使用复数至实部虚部转换模块获取符号的实部值。完成 BPSK 解调 (使用大于等于?、布尔值至整数转换模块)：如果符号值小于 0，则比特数据为 0；如果符号值大于等于 0，则比特数据为 1。恢复的比特数据使用数组显示，将它命名为“unaligned bits”。部分电路图如下图 4.3.2 所示：

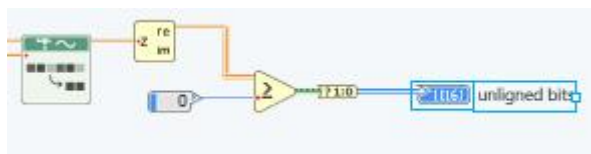


图 4.3.2 下采样和解调电路

- (7) (眼图) 取卷积值得实部数值，使用创建波形和 MT Format Eye Diagram 模块显示眼图；
- (8) 将此 VI 保存为“BPSKRx.gvi”；
- (9) 参数设置：
- IQ rate = 1M；
  - carrier frequency = 1G；
  - gain = 0；
  - active antenna = RX2；
  - Message length = 1000；
  - Symbol rate = 10k；
- (10) 先运行发送电路代码，再运行接收电路代码，比较匹配滤波前后的波形，测量匹配滤波后的信号波形眼图；

④ 问题 2：

(1) 在接收和发送电路中，将均方根升余弦的滤波器参数改为 0.2 和 1，随着滤波器参数值的增加，码间干扰的数量是增加还是减少了？接收信号的带宽是增加还是减少了？将接收采样值接入功率谱模块测量频谱；

(2) 多次运行接收机电路代码，观察眼图。每次眼图都对齐了吗？如果没有对齐，请解释原因。如果脉冲没有对齐，会出现什么问题？

##### ⑤ 脉冲对齐：

在接收机电路中，增加脉冲对齐功能。实验步骤如下：

(1) 复制“BPSKTx.gvi”文件，重命名为“BPSKTx\_shortPN.gvi”；

(2) 将 MT Generate Bits 的函数配置改为“User Defined”。点击右键，为模块的“user base bit pattern”创建一个数组常量，输入位序列“1011100”。在模块 bit 流输出端创建一个显示控件，观察输出 bit 流。局部电路如图 4.5.1 所示：

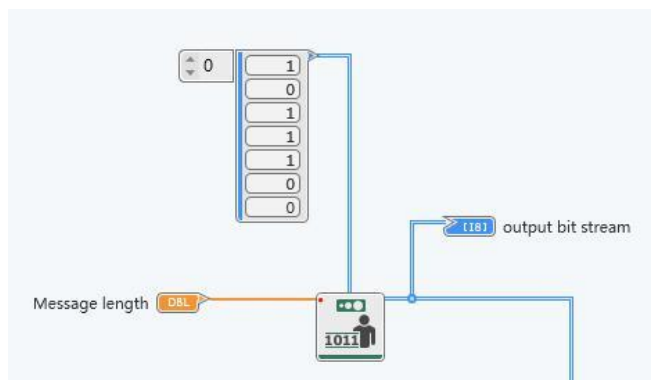


图 4.5.1 局部电路图

(3) 完成下面图 4.5.2 所示的子模块电路，并将其命名为“PulseAlign.gvi”。点击“图标”按钮，给新建的模块添加输入输出端口；

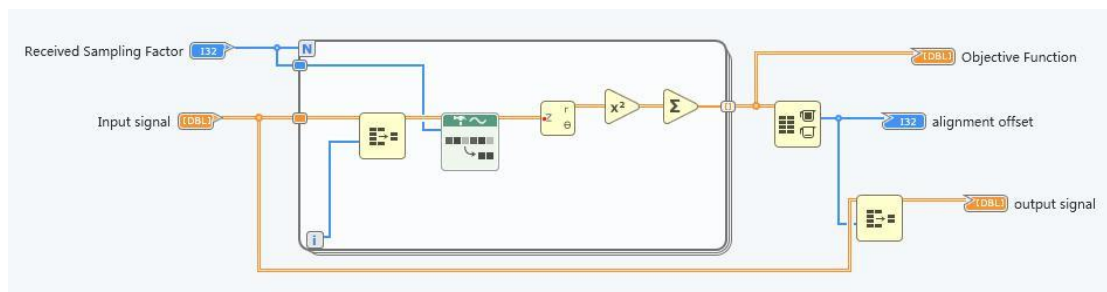


图 4.5.2 脉冲对齐电路

(4) 在接收电路中，添加脉冲对齐模块，对匹配滤波后的采样信号进行脉冲对齐，并显示脉冲对齐后的信号波形眼图（命名为“aligned eye”）；

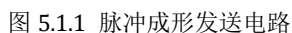
(5) 对对齐后的采样信号进行解调，恢复出位序列（命名为“aligned bits”）。



(3) 比较不对齐和对齐后接收到的位序列, 哪种情况下能检测到传输的数据“1011100”?

当 PN 序列的阶数  $n = 7$  时, 其周期为  $T = 2^n - 1 = 127$ 。

保存对应的频谱图和眼图。比较不同滤波器情况下的带宽、旁瓣和眼图打开情况：



如图 5.1.1，为设计的脉冲成形发送电路的程序框图。在前面板中选择脉冲成形滤波器为 None，运行程序，得到眼图和频谱图如图 5.2.2 所示：



将脉冲成型滤波器修改为 Root Raised Cosine，可得眼图和频谱图分别为：

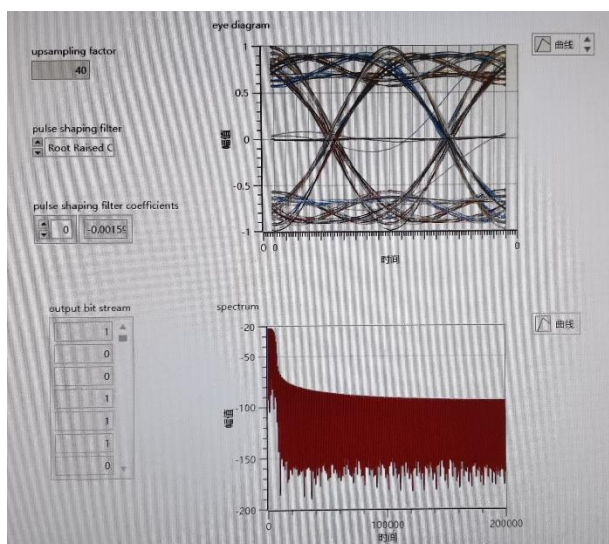


图 5.1.3 脉冲成型滤波器为均方根升余弦

显然，未进行脉冲成型时，信号频谱的旁瓣较多；当采用均方根升余弦滤波器后，频谱的带宽会变小，旁瓣会变少，与理论知识相一致。观察眼图的变化情况，可以发现，当滤波器类型为 **None** 时，眼图为简单矩形脉冲的叠加；当滤波器改为均方根升余弦后，眼图变化较大，其曲线变得平滑、为升余弦状，“眼皮”较薄，眼图打开情况较好，表明此时信号的质量较高。

(3) 选择 Root Raised Cosine 滤波器，将 Symbol rate 改为 100k，跟 Symbol rate 为 10k 时的频谱和眼图作比较：

如图 5.1.4，为 Symbol rate 为 100k 时的眼图和频谱：

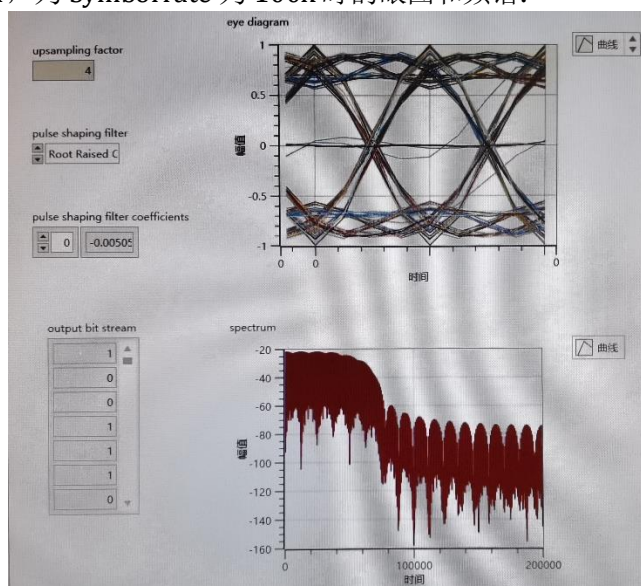


图 5.1.4 Symbol rate 为 100k

当使 Symbol rate 增大时，升采样因子会相应降低，即每个符号的采样数降低，此时滤波器频谱带宽会明显增加，同时会出现旁瓣；相对而言，眼图也会不再如先前平滑，但总体的张开程度差异不大。

② 问题 2:

(1) 在接收和发送电路中，将均方根升余弦的滤波器参数改为 0.2 和 1，随着滤波器参数值的增加，码间干扰的数量是增加还是减少了？接收信号的带宽是增加还是减少了？将接收采样值接入功率谱模块测量频谱：

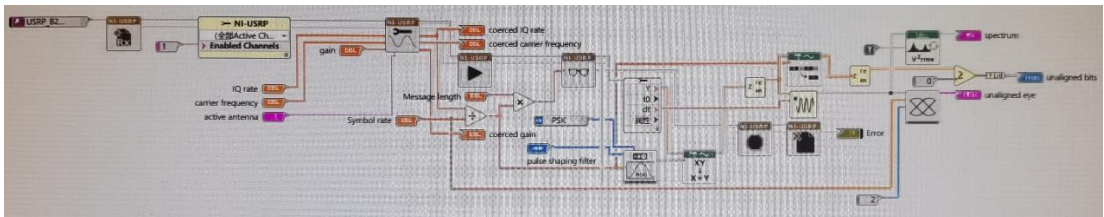


图 5.2.1 接收电路程序框图

如图 5.2.1，为设计的脉冲成形接收电路的程序框图。将发送和接收电路的均方根升余弦滤波器的滚降因子修改为 0.5、0.2、1，得到的眼图和频谱如图 5.2.2 至 5.2.4 所示，其中，左侧为发送电路的结果，右侧为接收电路的结果。

比较三图可以发现，当滚降因子为 0.2 时，眼图的张开度最小；当滚降因子为 1 时，眼图的张开度最大。因此，随着滤波器参数值的增加，码间干扰的数量将会减少，与理论相吻合。除此之外，观察接收信号的频谱图，当滚降因子为 0.2 时，其带宽最小；当滚降因子为 1 时，频谱带宽最大。故当滤波器参数值增大时，接收信号的带宽也会相应增加。

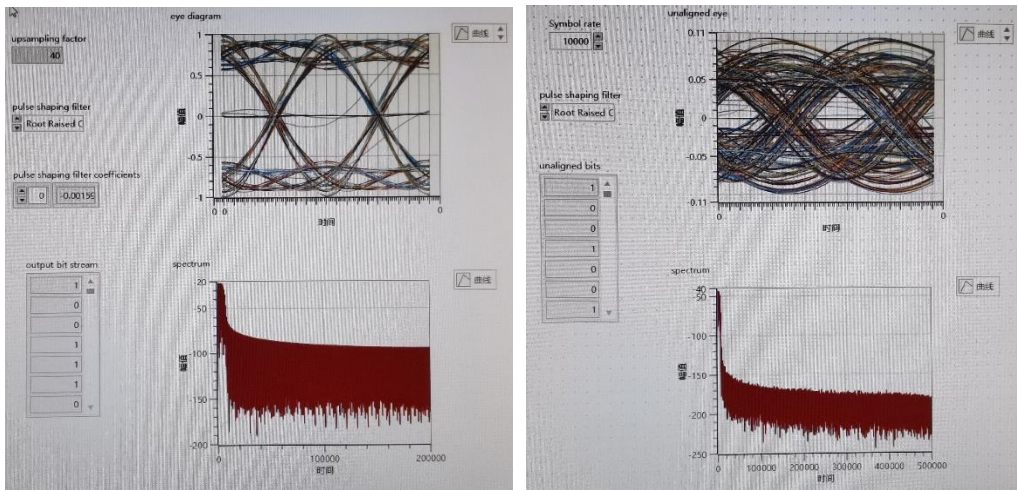


图 5.2.2 滤波器参数为 0.5 时发送、接收电路的眼图和频谱



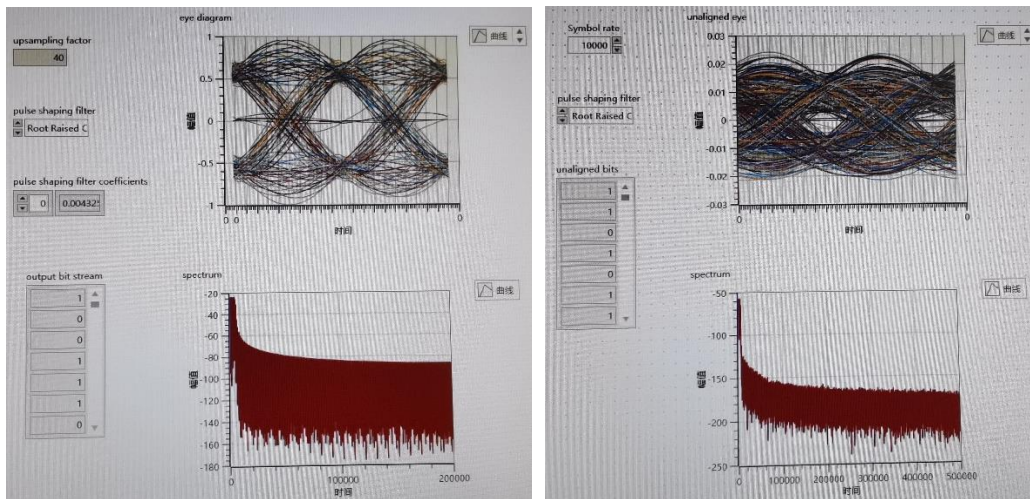


图 5.2.3 滤波器参数为 0.2 时发送、接收电路的眼图和频谱

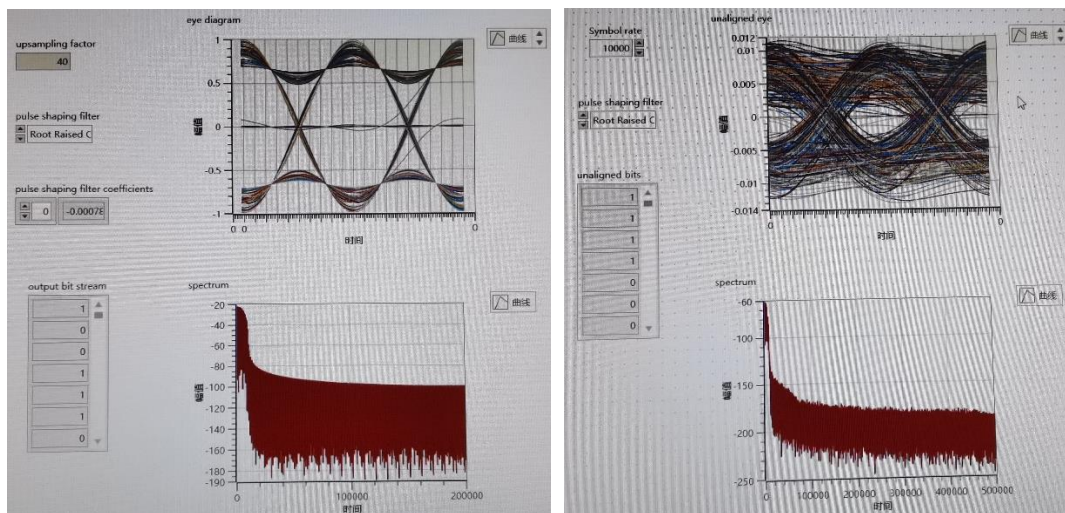


图 5.2.4 滤波器参数为 1 时发送、接收电路的眼图和频谱

(2) 多次运行接收机电路代码，观察眼图。每次眼图都对齐了吗？如果没有对齐，请解释原因。如果脉冲没有对齐，会出现什么问题？

多次运行接收机电路代码，观察接收到的信号眼图，发现眼图并非每次都会对齐。这是由于信号不可能每次高低电平的电压值都保持完全一致，也不能保证每次高低电平的上升沿、下降沿都在同一时刻。除此之外，存在的噪声其会叠加在信号上，使眼图的线迹变得模糊不清。综上，采样的不稳定、同步不佳、抖动和噪声的存在等，都会导致脉冲不能完全对齐。当脉冲没有对齐时，采样点位置不确定，接收到的信号受干扰太大，可能会不可靠，使其不能被完全正确地恢复成发送出来的原始信号。

③ 问题 3:

(1) 解释脉冲对齐电路的工作原理:

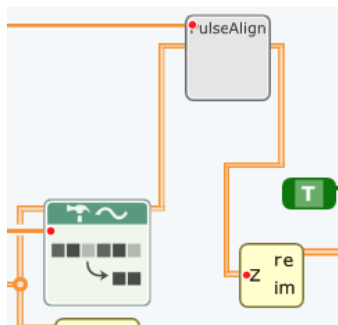


图 5.3.1 脉冲对齐电路的局部连接图

如图 5.3.1，将降采样因子输入到脉冲对齐电路的“Received Sampling Factor”端口，降采样信号作为模块的“Input signal”，再用复数至实部虚部转换模块获取电路“Output signal”的实部值。

观察脉冲对齐电路的程序框图可知，其对匹配滤波后的信号进行了部分降采样，并计算了降采样后信号模长的平方，即信号功率。通过对功率求和做滑动平均，我们使波形变得平滑，并且找到功率最大的位置，即最大值索引，该索引位置对应着原始信号中眼图张开度较大的地方。将其作为采样点进行采样，从而实现消除干扰、脉冲对齐的功能。

(2) 对不作脉冲对齐和作脉冲对齐的接收信号眼图作比较：

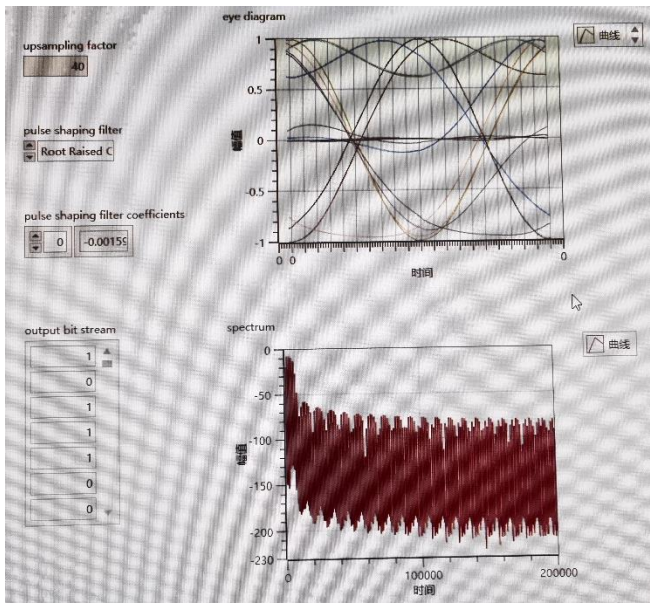
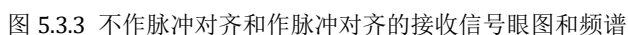


图 5.3.2 发送信号的眼图和频谱

如图 5.3.2，为发送电路的眼图和频谱，而接收信号的眼图如图 5.3.3 所示，其中左侧未做脉冲对齐，右侧进行了脉冲对齐。显然，经过脉冲对齐以后，得到的眼图与发送端信号更加接近，线迹不清的现象得到了明显好转，且眼图张开度更大，信号的

.....



如图 5.3.3，可以发现经过脉冲对齐后，电路能够正常检测到“1011100”，其以周期的形式循环出现，图中显示的位序列前三位为“100”，正是“1011100”的最后三位，后续序列不断循环“1011100”。而没有进行对齐处理时，接收到的位序列会在一些位出现判决错误，难以得到完全正确的结果。