

# 通信原理第四次实验报告

实验小组成员：汪奕晖（19302058），马知行（19302045）第43组 6.5

实验分工：共同完成

实验日期：2022年3月11日

班级：2019级信息工程

## 第5章 BPSK/QPSK调制、解调实验

## 第6章 数字通信系统中成型滤波与匹配滤波

### 一、实验目的

1. 了解通信系统中成型滤波器和匹配滤波器的基本概念。
2. 通过星座图、眼图、误码率等方式观察和分析两种滤波器在通信系统中所起的作用。

### 二、实验仪器

1. LabVIEW软件仿真

### 三、实验原理

1. 成型滤波与匹配滤波。

假设经过QAM调制映射后发送的复数符号序列波形为：

$$\hat{x}(t) = \sqrt{E_x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s[n] \delta(t - nT)$$

它相当于一个冲激串序列，频域带宽无限，实际信道却是带限的，信号经过信道后会带宽会被削减，可能会导致信号失真、码间串扰和谐波的产生。为了满足信号发送时要求的频带，需要对带外的信号进行抑制。通过将发送符号送至一个滤波器，选择合适的滤波系数，使得信号的频率成分被限制在指定带宽内，平滑突变，减少谐波的过程，称为成型滤波。

设成型滤波器函数表示为 $g_{Tx}$ ，通常进行归一化，即 $\int |g_{Tx}(t)|^2 dt = 1$ 以避免额外的缩放系数。

假设信道的冲击响应函数为 $g(t)$ ，为了使信号在抽样判决时刻满足无码间串扰的条件， $g(t)$ 应满足奈奎斯特脉冲形状，即它满足 $g(nT) = \delta[n]$ ，奈奎斯特脉冲形状特性除了消除符号间的干扰，从而使得检测器可以采用一种更为简单的形式。

较常用的奈奎斯特脉冲是升余弦脉冲，它的傅里叶频谱为：

$$G_{re}(f) = \begin{cases} T & 0 \leq |f| \leq (1 - \alpha)/2T \\ \frac{T}{2} [1 + \cos \frac{\pi T}{\alpha} (|f| - \frac{1 - \alpha}{2T})] & (1 - \alpha)/2T < |f| < (1 + \alpha)/2T \\ 0 & (1 + \alpha)/2T \leq |f| \end{cases}$$

傅氏反变换为：

$$g_{rc} = \frac{\sin \pi t/T}{\pi t/T} \frac{\cos \pi \alpha t}{1 - 4\alpha^2 t^2/T^2}$$

$\alpha$ 称为滚降系数， $0 < \alpha < 1$ ，通常表示为剩余带宽的百分比。

为了改善抽样时刻的判决信噪比，在接收端往往需要使接收信号通过一个匹配滤波器，假设匹配滤波器函数为，则接收端信号通过的总的响应函数为：

$$g(t) = \int g_{Rx}(\tau) g_{Tx}(t - \tau) d\tau$$

匹配滤波器函数拥有一个重要性质：

$$g_{Rx}(t) = g_{Rx}^*(-t)$$

由于脉冲成型滤波函数通常是实的，所以可简化为 $g_{Rx}(t) = g_{Rx}^*(-t)$ ，从而可见接收滤波器也就是匹配滤波器。选择匹配滤波器改善了接收的信噪比，使得最大似然检测有更好的性能。可选择 $g_{Rx}(t)$ 和 $g_{Rx}^*(-t)$ 为升余弦滚降函数的“平方根”，即成型滤波函数和匹配滤波函数相乘后的函数为升余弦滚降函数，这样的函数被称为平方根升余弦函数或根升余弦函数：

$$g_{sqrc}(t) = \frac{4\alpha}{\pi\sqrt{T}} \frac{\cos[(1 + \alpha)\pi t/T] + \frac{\sin(1 - \alpha)\pi t/T}{4\alpha t/T}}{1 - (4\alpha t/T)^2}$$

该函数为偶函数，故如果令 $g_{Rx}(t) = g_{sqrc}(t)$ ，则 $g_{Rx}(t) = g_{Rx}(-t) = g_{sqrc}(t)$ ，即成型滤波函数和匹配滤波函数是同一个函数。

1. 匹配滤波对判决时刻信噪比的改善。

实验中假设发射信号仅受到了AWGN 的影响。AWGN信道模型很好地建模了无线信道的热噪声损害，数学公式为： $z(t) = x(t) + v(t)$ ，其中 $x(t)$ 是复基带信号， $v(t)$  表示高斯白噪声信号， $z(t)$ 是接收信号。

当接收端对信号 $z(t)$ 进行抽样得到 $z[n]$ ，则在DSP器件处理端， $z[n]$ 的表达式为： $z[n] = x[n] + v[n]$ ，其中 $x[n]$ 为抽样后的符号序列， $v[n]$ 为各项独立等同分布的高斯随机变量，其分布满足 $N(0, \sigma^2)$ 。

考虑发送的符号序列进行脉冲成型时使用的是矩形脉冲进行成型，升采样率为M，平均功率为P，则一个符号周期的波形满足：

$$y[n] = \begin{cases} \sqrt{P} + v[n] & \text{if } |n| \leq \frac{M}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

当直接对该波形进行抽样判决时，噪声功率为高斯随机变量的方差即，信噪比 $SNR = P/\sigma^2$ 。在上述直接进行抽样判决过程中，没有利用到其余非抽样时刻的信息，导致信噪比可能会偏高，为了进一步提升抽样时刻信噪比，需要将信号通过匹配滤波器。

假设匹配滤波器的波形为：

$$h[n] = \begin{cases} \frac{1}{M} & \text{if } |n| \leq \frac{M}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

接收信号 $y[n]$ 经过匹配滤波，输出波形为： $s[n] = y[n] * h[n]$

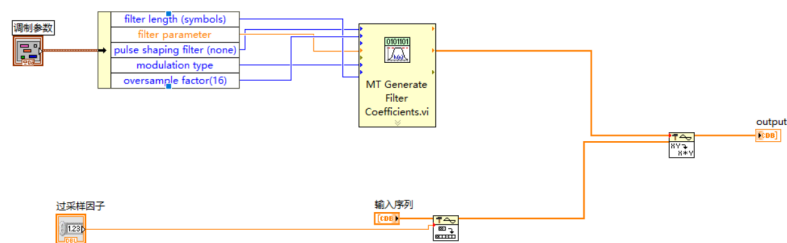
$$s[n] = \begin{cases} \frac{M+n}{M}\sqrt{P} + \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{|n|} v(0, \sigma^2) & \text{if } n \leq 0 \text{ or } n \geq -M \\ \frac{M-n}{M}\sqrt{P} + \frac{1}{M} \sum_{k=1}^{|n|} v(0, \sigma^2) & \text{if } n \leq M \text{ or } n \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

噪声功率为P，抽样时刻噪声随机变量为：

$$X = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M v(0, \sigma^2)$$

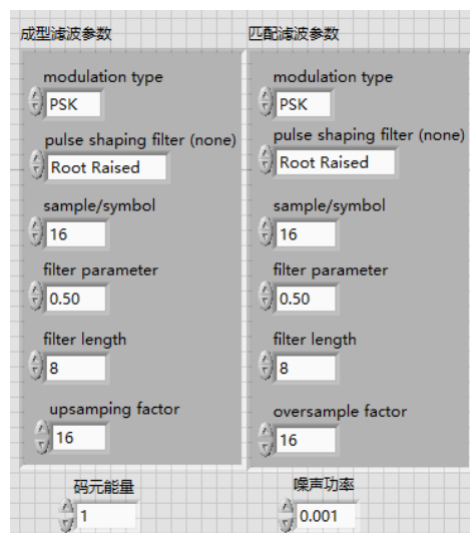
由概率论知识，随机变量X的均值为0，方差为 $\sigma^2/M$ ，噪声功率与直接抽样相比降低了M倍，抽样时刻信噪比有了很大改善。

## 匹配滤波



## 总程序

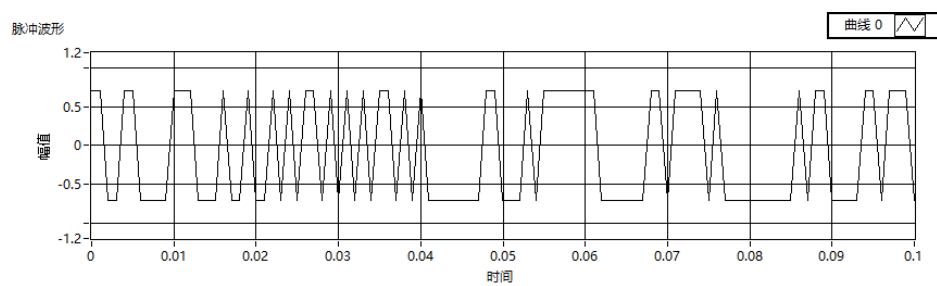
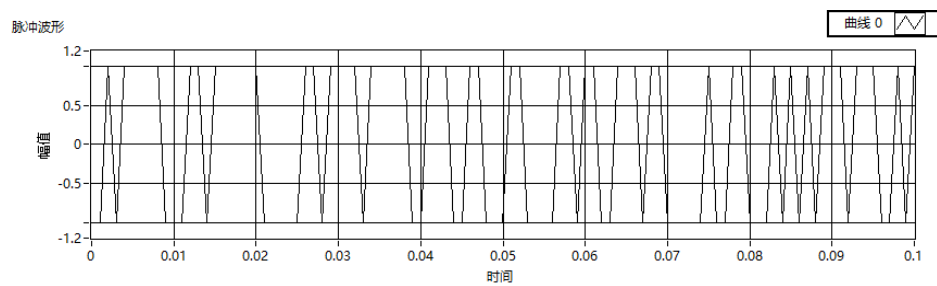
2. 观察经过脉冲成型滤波和匹配滤波后的信号波形，分别调整滤波器系数、过采样因子、sample/symbol和滤波器系数长度，观察波形变化。



### a. 调整滤波器参数

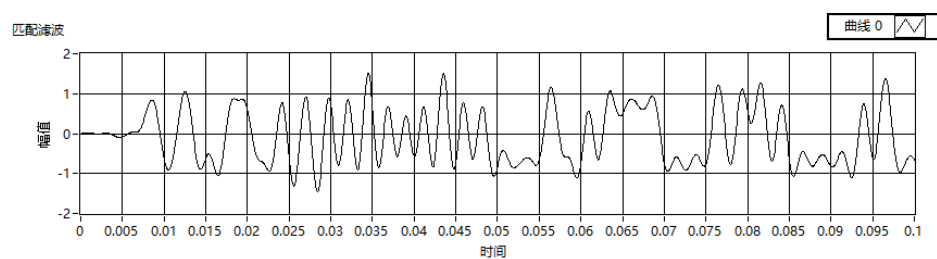
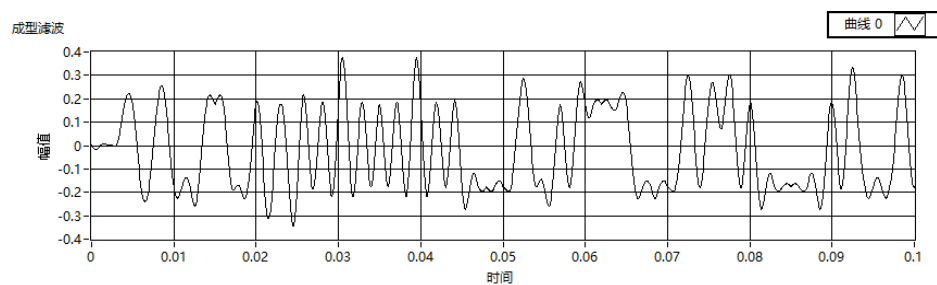
滤波器系数指的是滚降系数 $\alpha$ ，表示的是剩余带宽的百分比，取值范围为 $0 < \alpha < 1$ 。当 $\alpha$ 趋近于0时，滤波函数越接近理想低通滤波，所占带宽越小，但与此同时时域上滤波函数的拖尾衰减得越慢，越容易造成严重的码间串扰。当 $\alpha$ 趋近于1时，频域上滤波函数越平

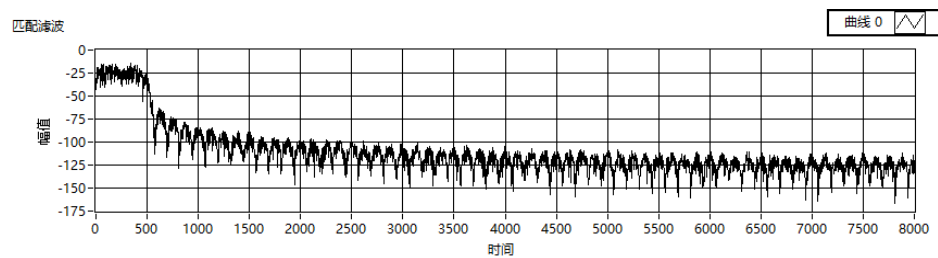
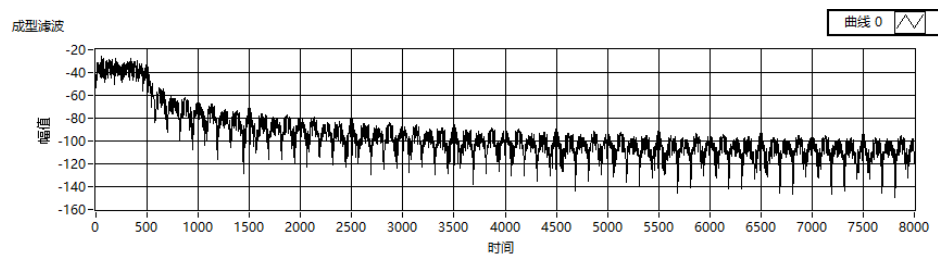
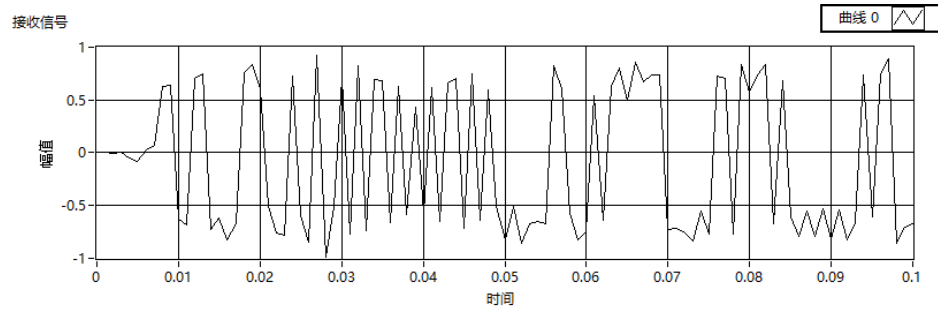
缓，所占带宽越大，导致频谱利用率低，但与此同时时域上滤波函数的拖尾衰减较快，更有效的抑制码间串扰。



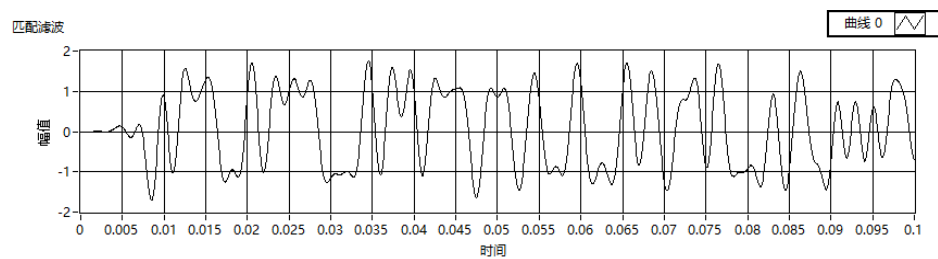
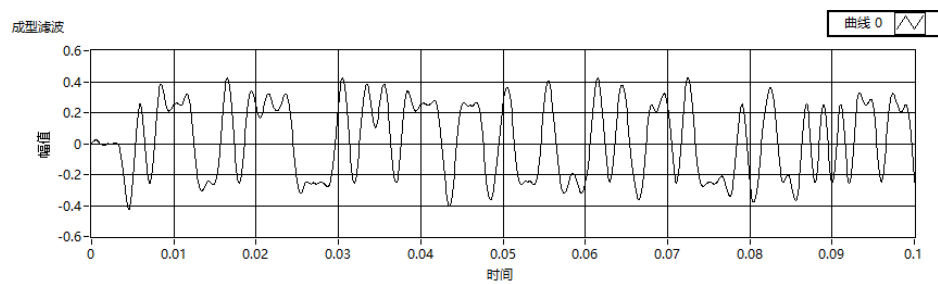
filter paramter = 0

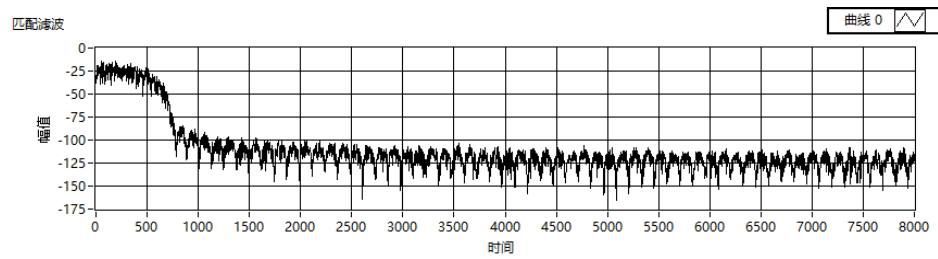
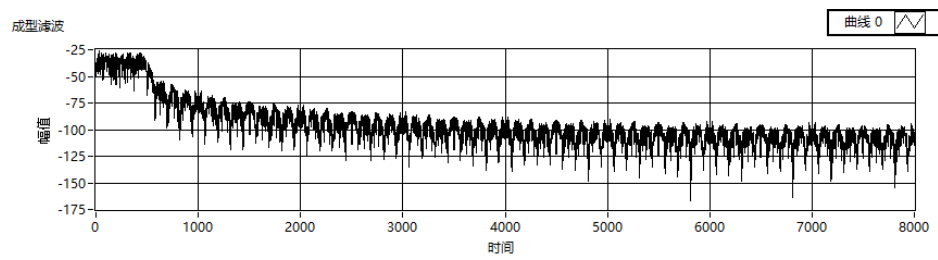
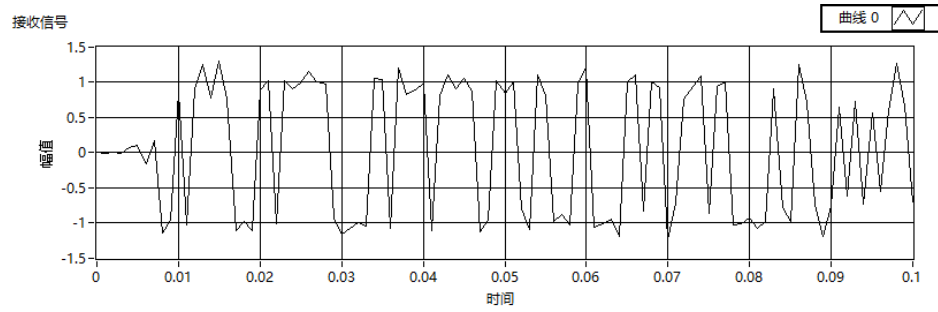
QPSK:





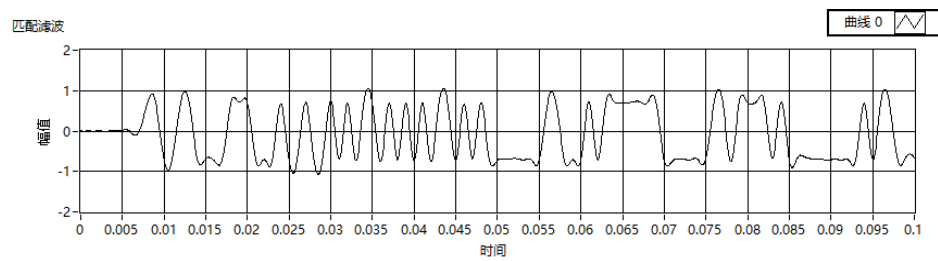
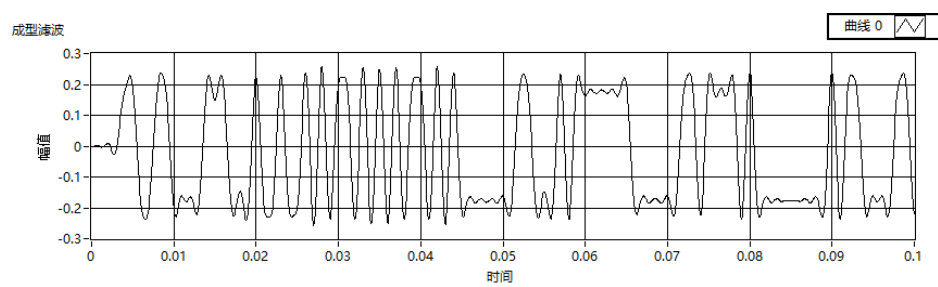
BPSK:



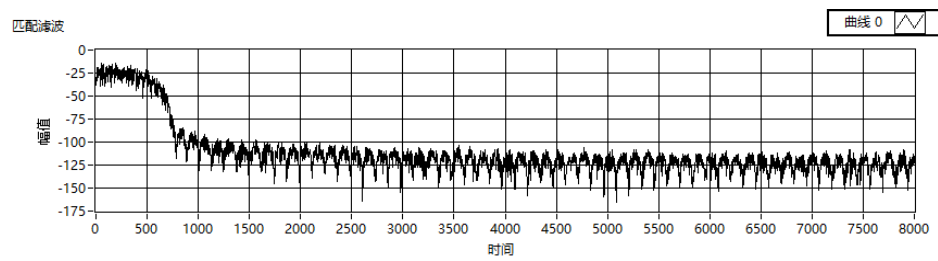
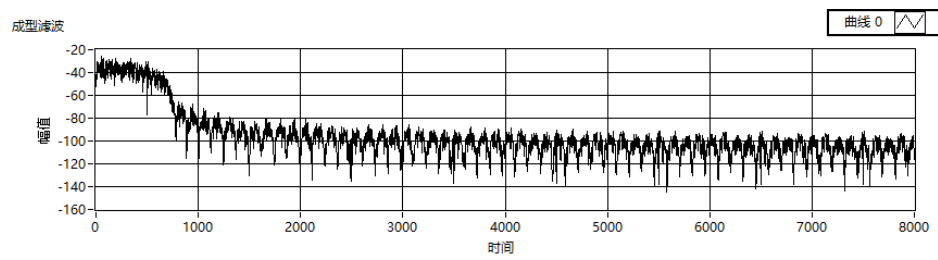
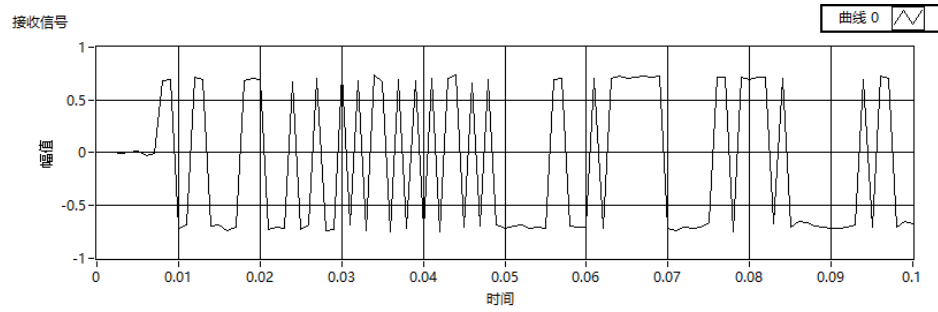


filter paramter = 0.5

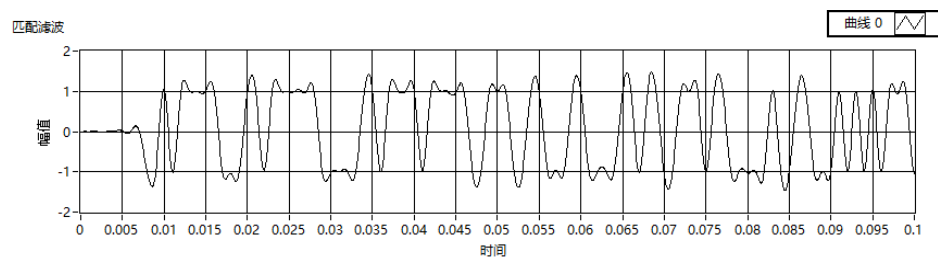
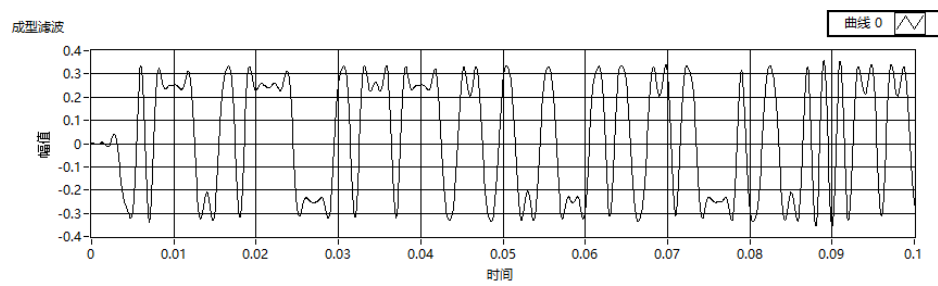
QPSK:

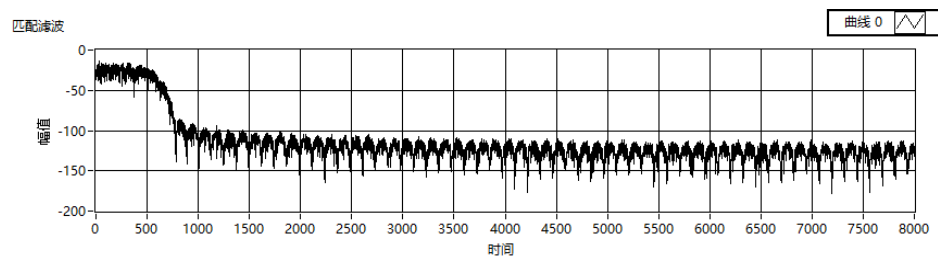
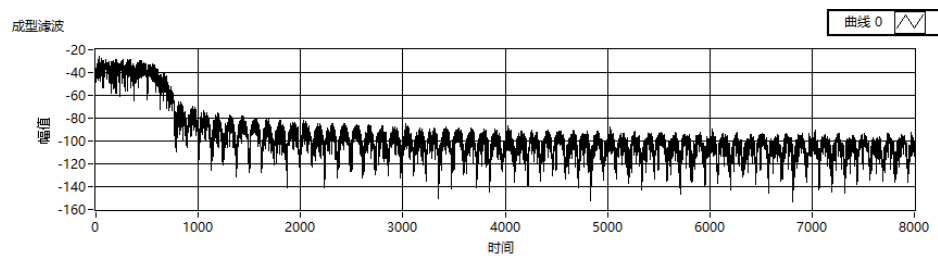
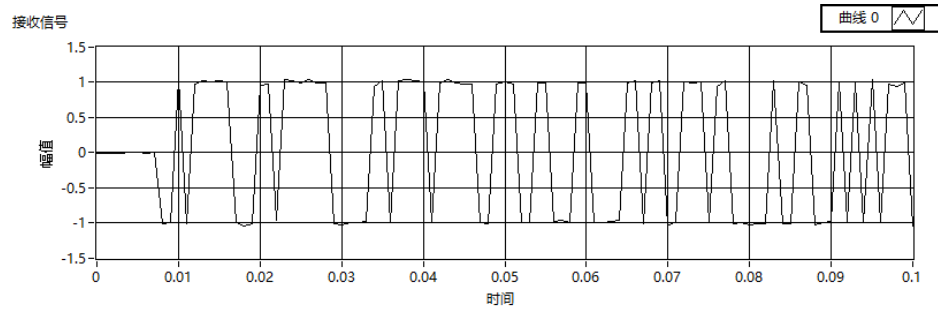






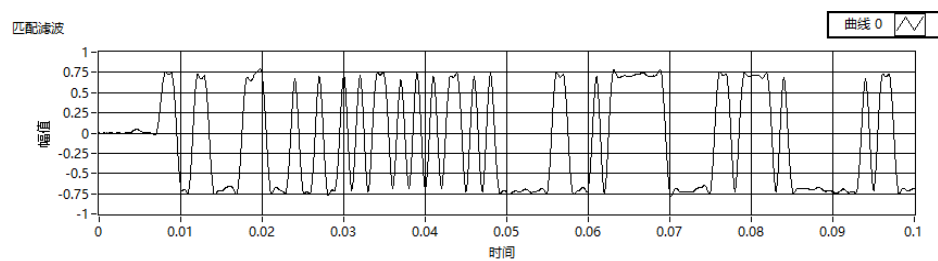
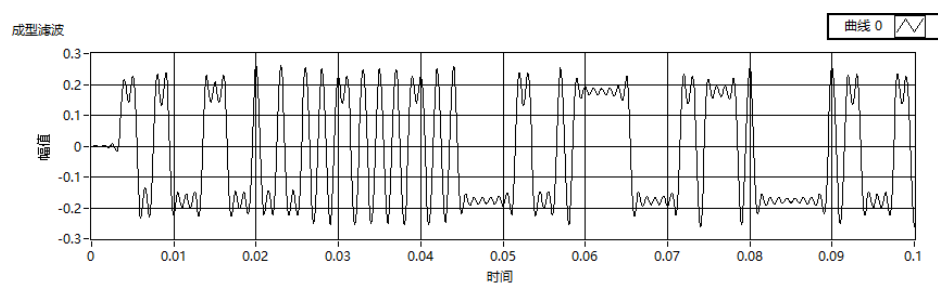
BPSK:

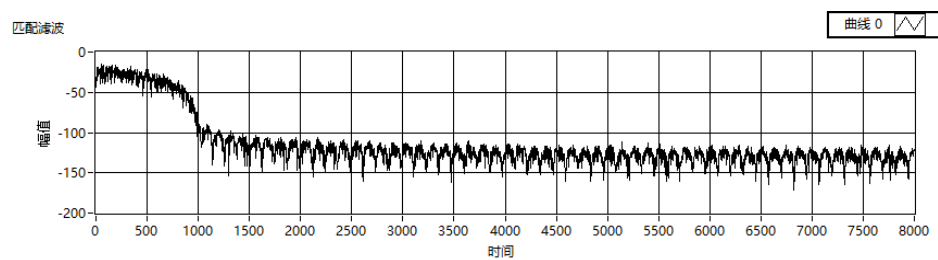
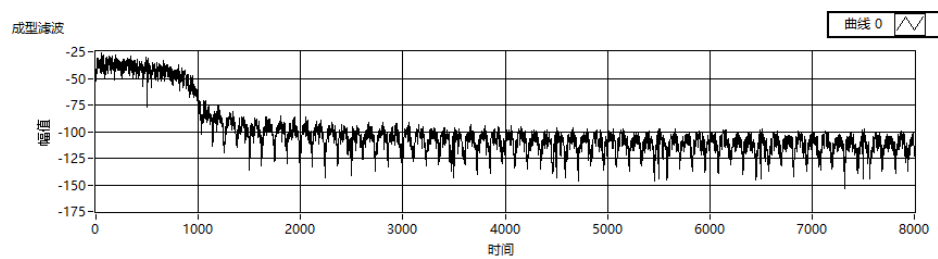
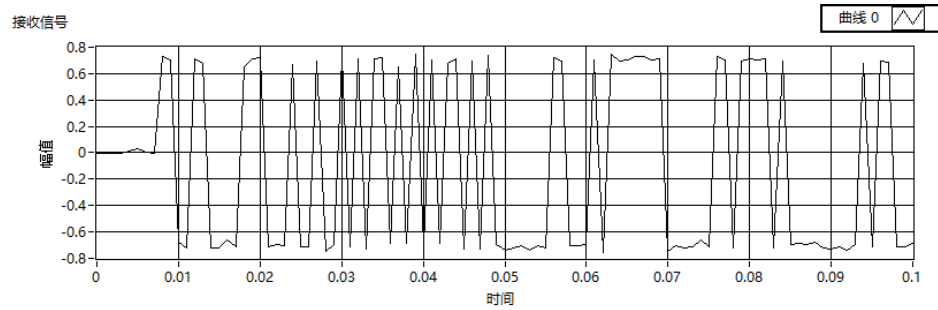




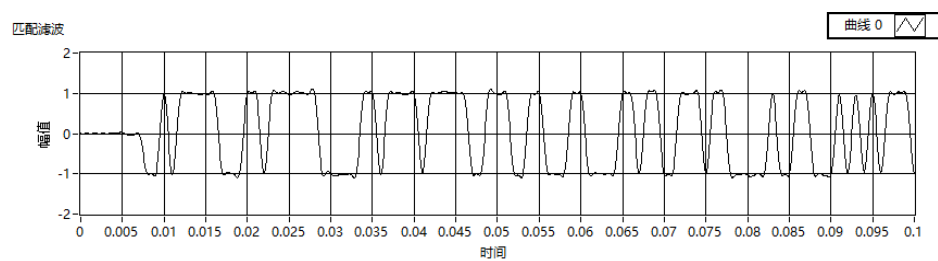
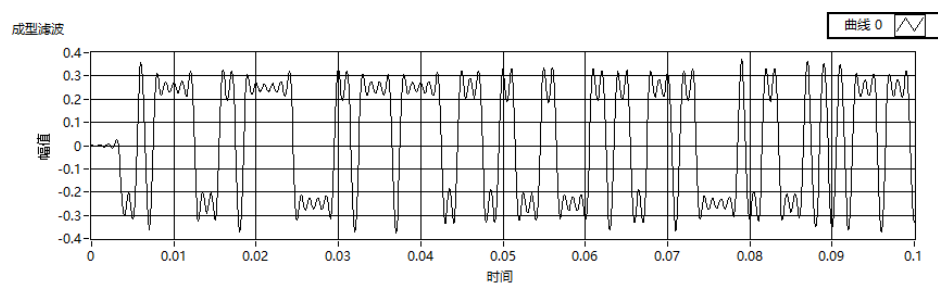
filter paramter = 1

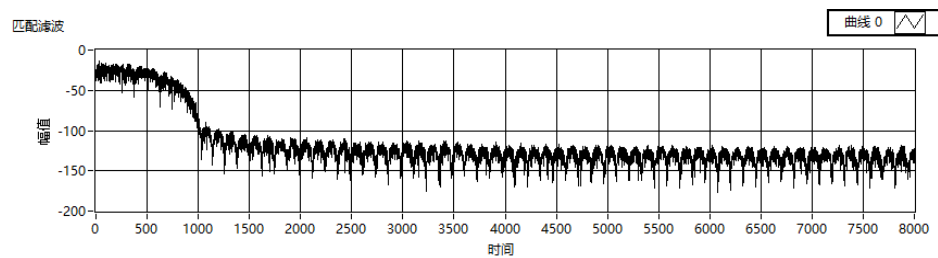
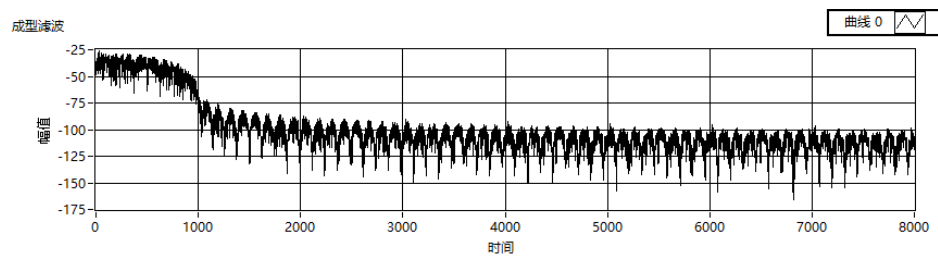
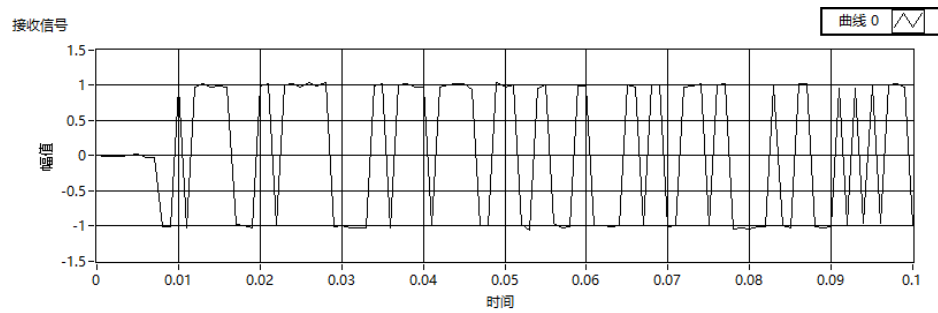
QPSK:





BPSK:

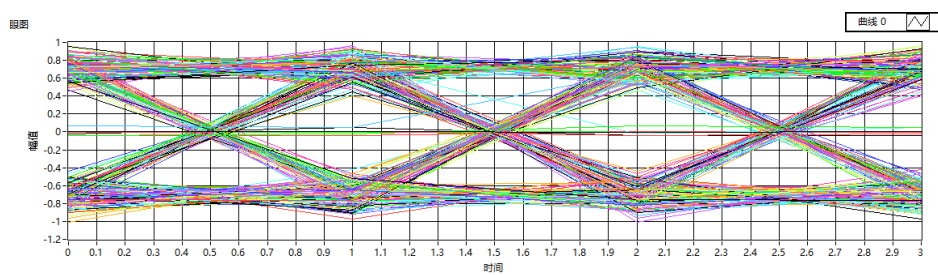




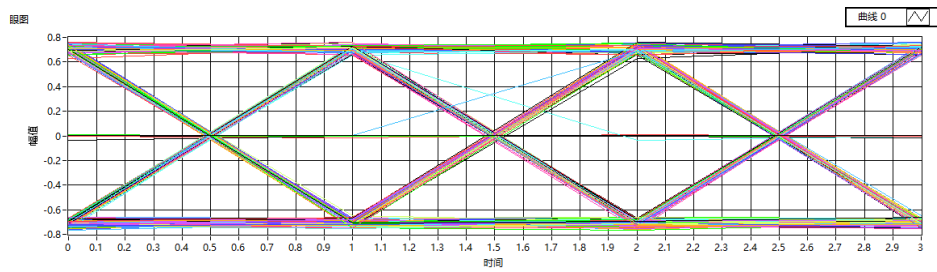
可以发现随着 $a$ 的增大，接收波形越接近发送波形，滤波效果越好

BPSK与QPSK除了波形样式有所区别其他并无二致，故接下来以QPSK为例

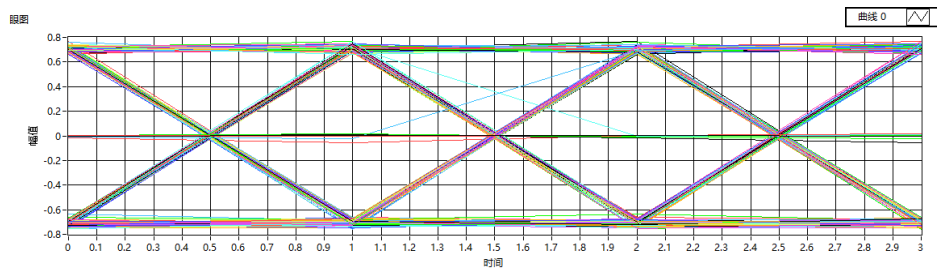
比较眼图



$$a = 0$$



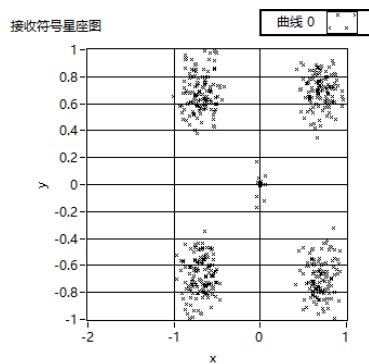
$a = 0.5$



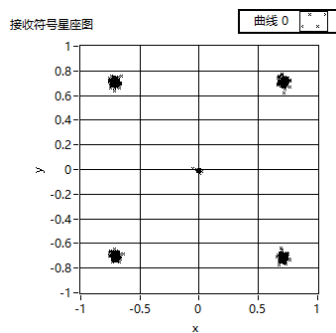
$a = 1$

随着 $a$ 的增大，眼图中“眼睛”变清晰，波形带宽变窄，滤波效果变好

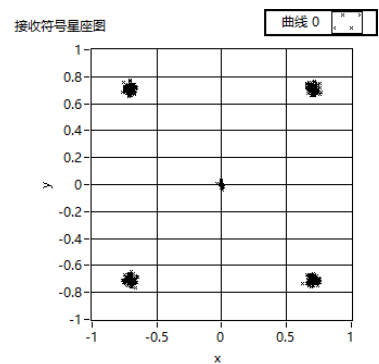
比较星座图



$a = 0$



$a = 0.5$



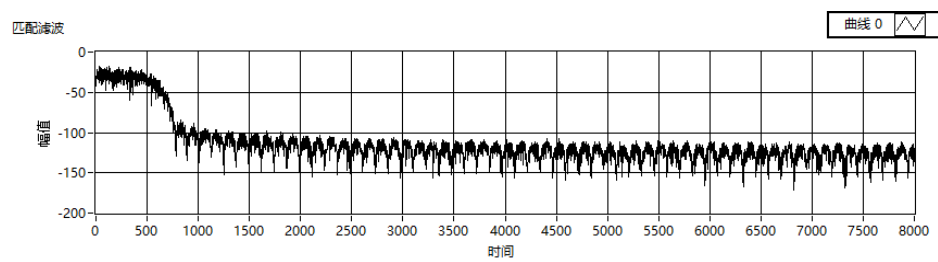
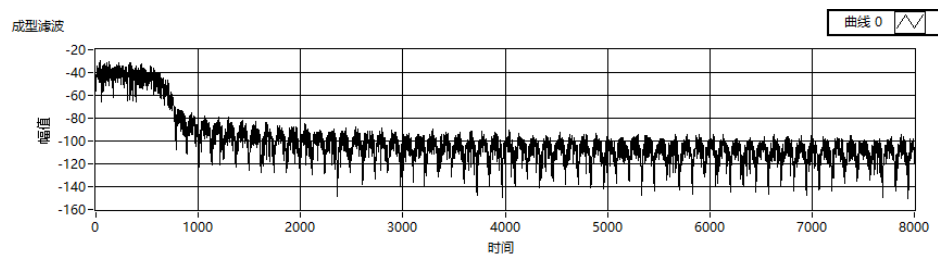
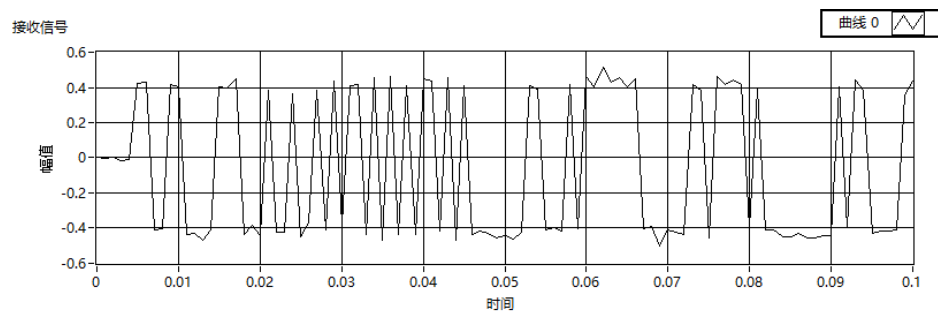
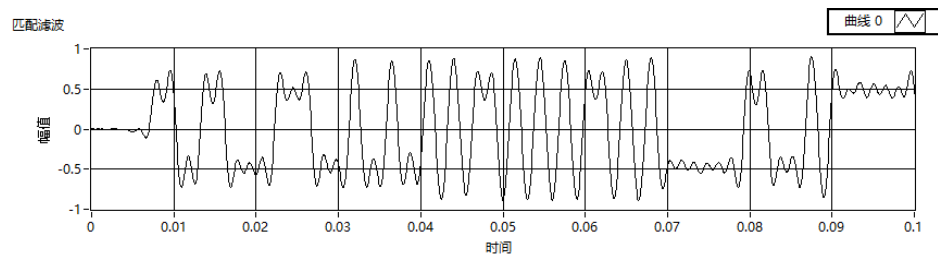
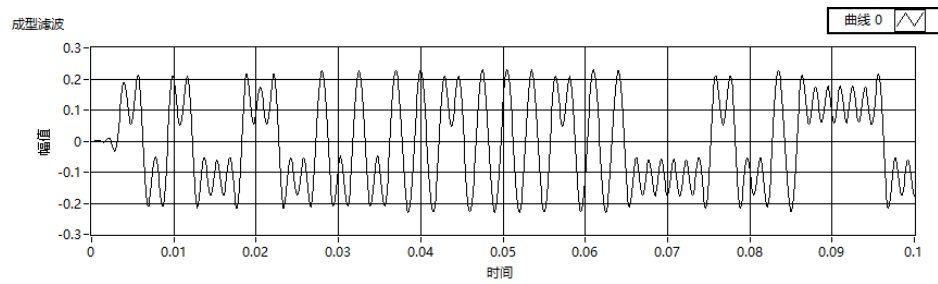
$a = 1$

随着 $a$ 的增大，星座图中的散点变集中，滤波效果变好。

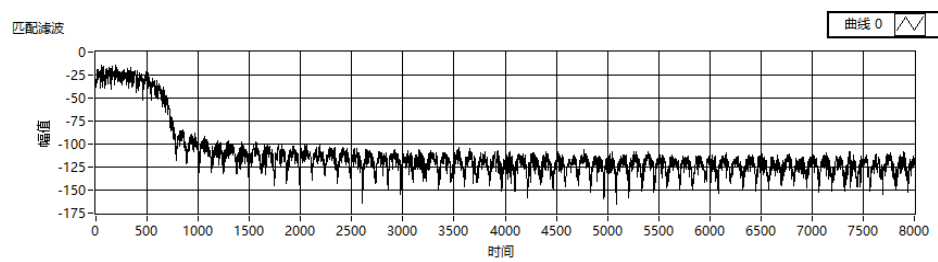
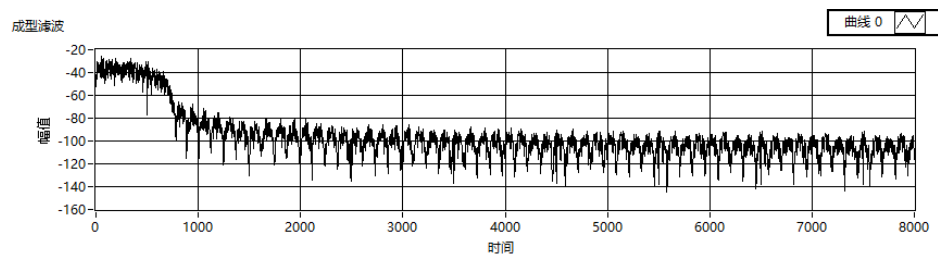
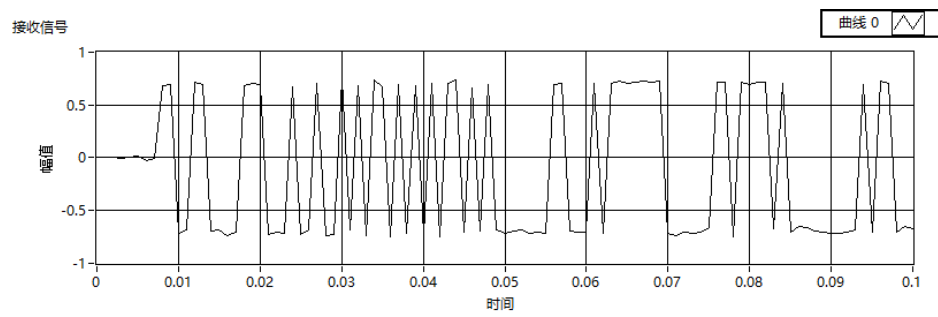
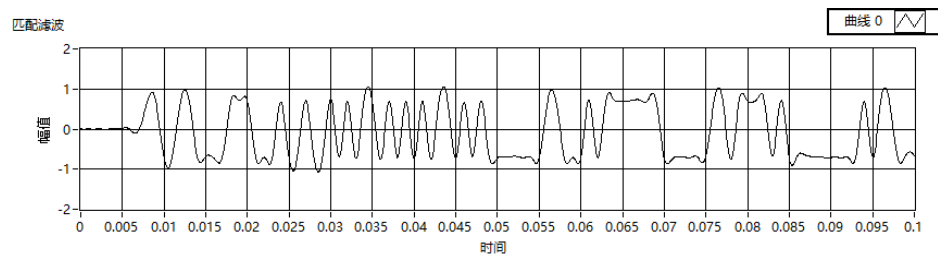
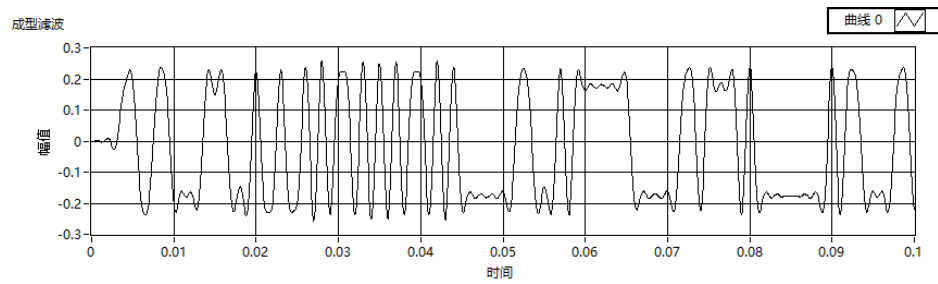
## b. 调整过采样因子

过采样因子指的是每符号样点数。过采样因子越大，频谱上滤波函数的主瓣越窄。这是由于过采样相当于在时域上进行拓展，则相应的频域会被压缩，因此所需要的滤波器主瓣可以较窄。

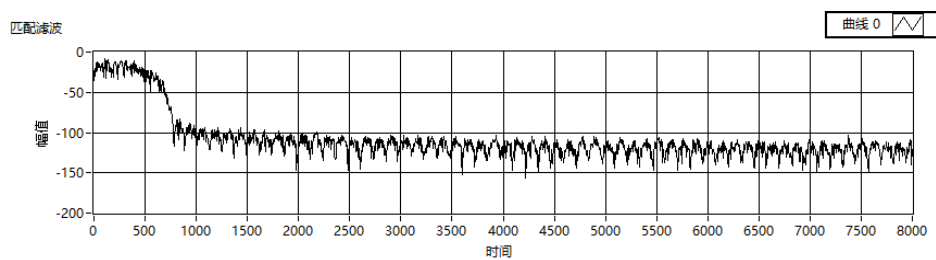
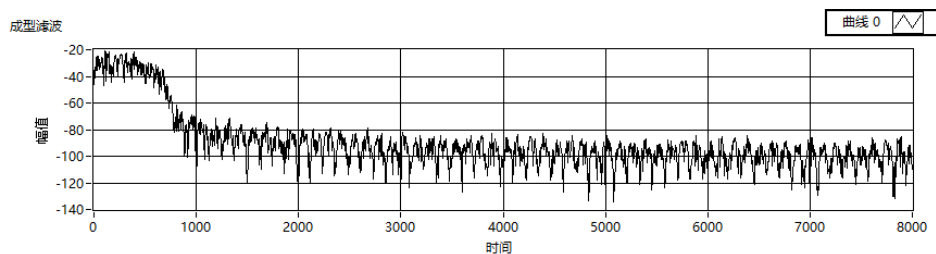
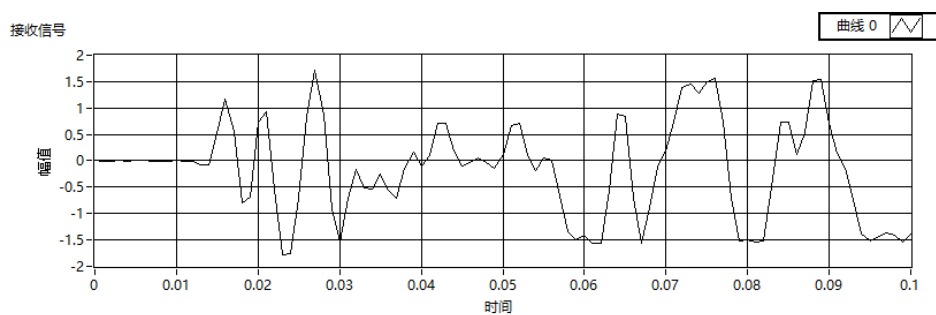
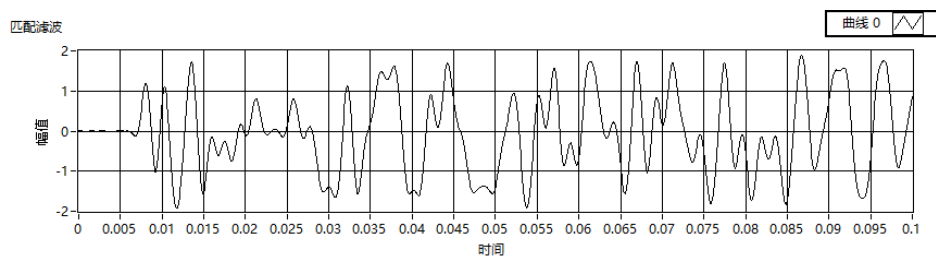
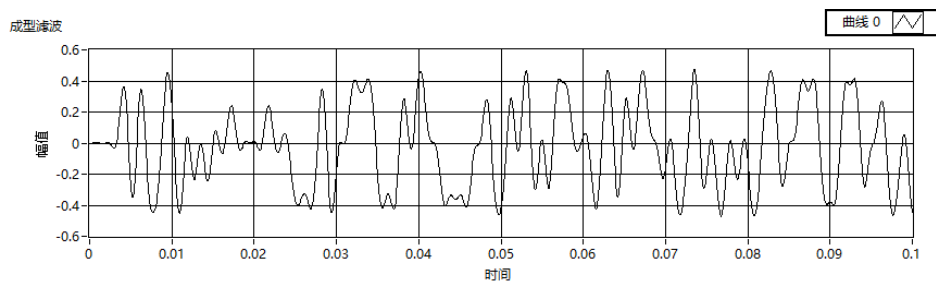
oversample factor = 24



oversample factor = 16



oversample factor = 8

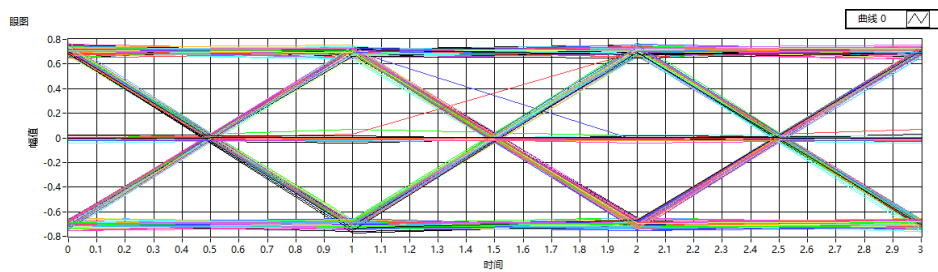


可以发现随着oversample factor的变小，波形出现一定程度的混叠，接收信号与发送信号差距较大。

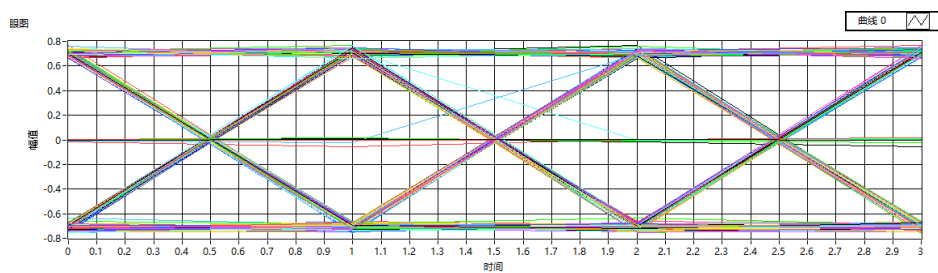
可以发现随着oversample factor的变大，波形虽然没有混叠，但由于过采样因子过大，导致接收信号波形有所起伏。

比较眼图

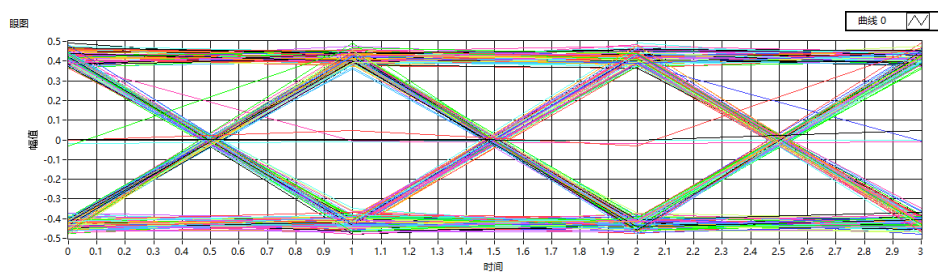




oversample = 24

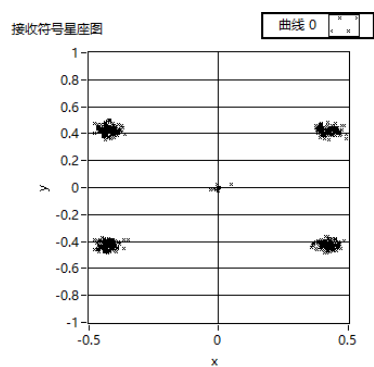
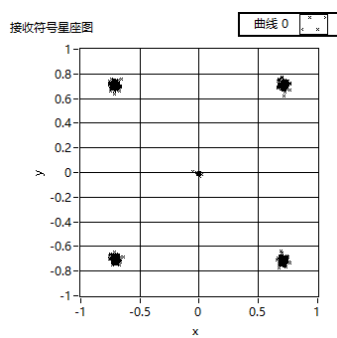
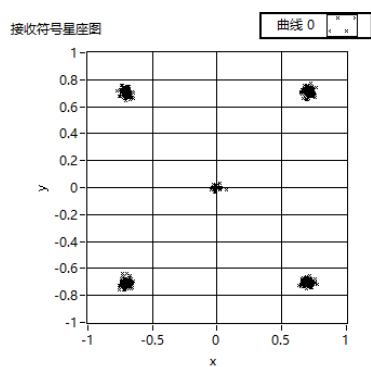


oversample = 16



oversample = 8

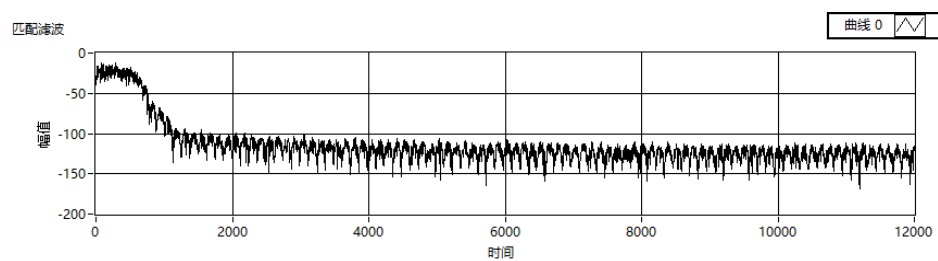
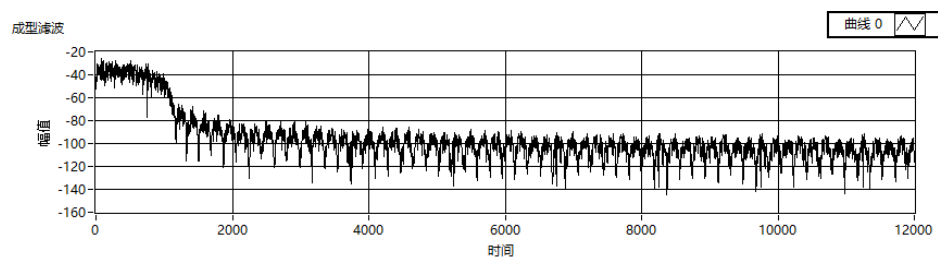
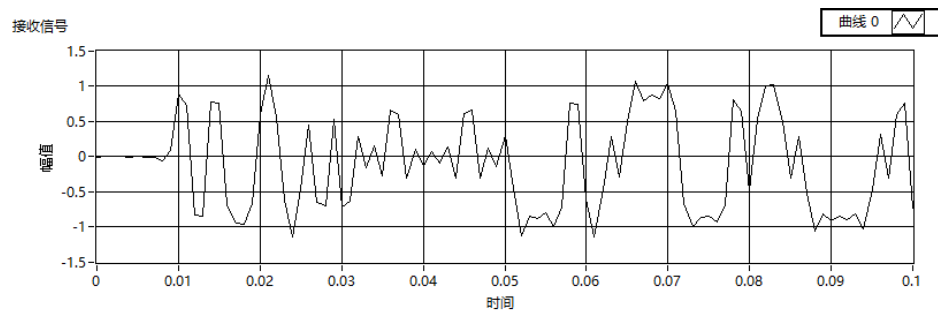
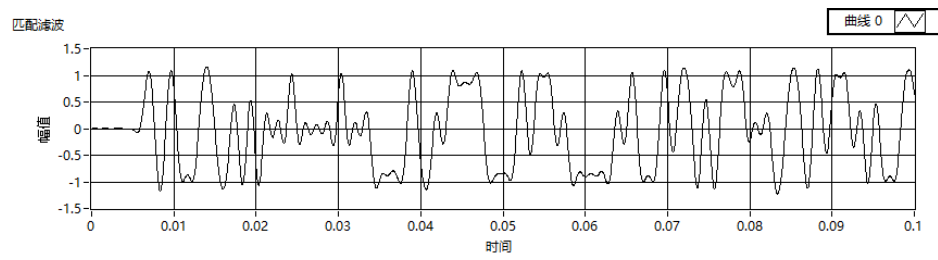
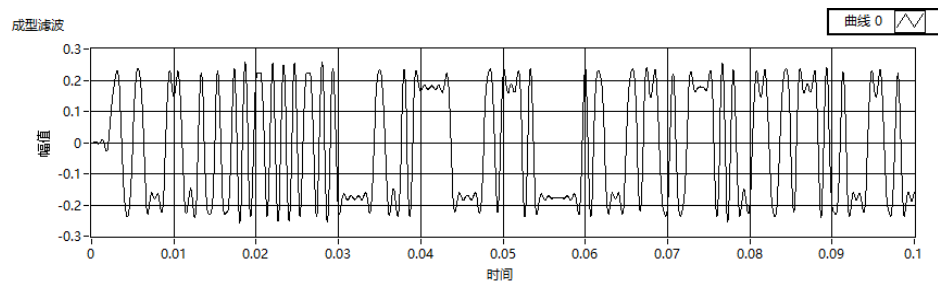
## 比较星座图



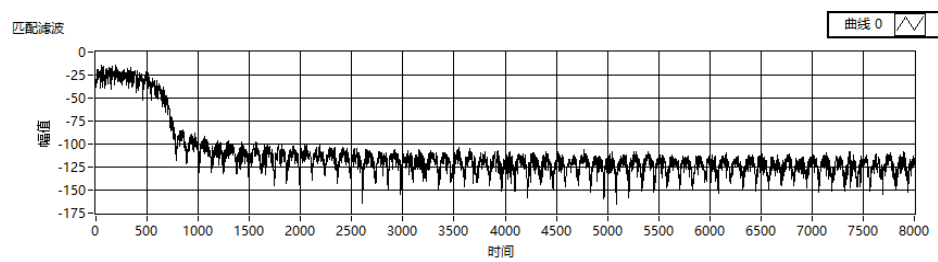
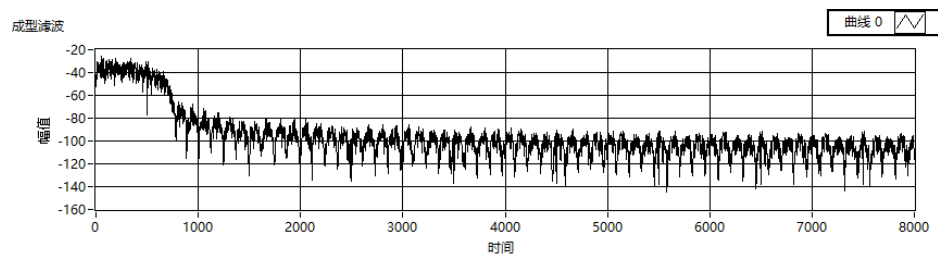
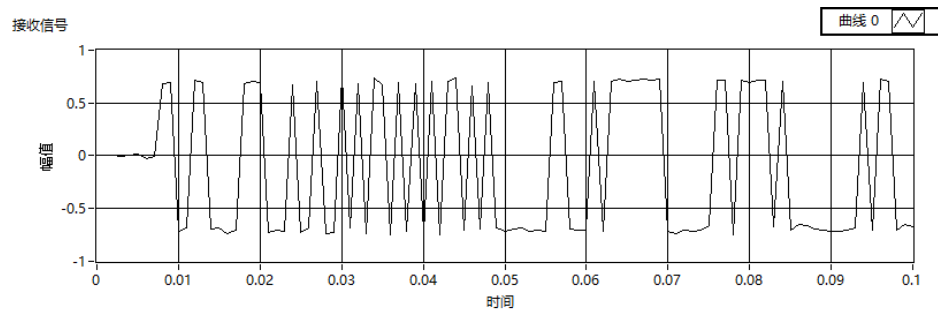
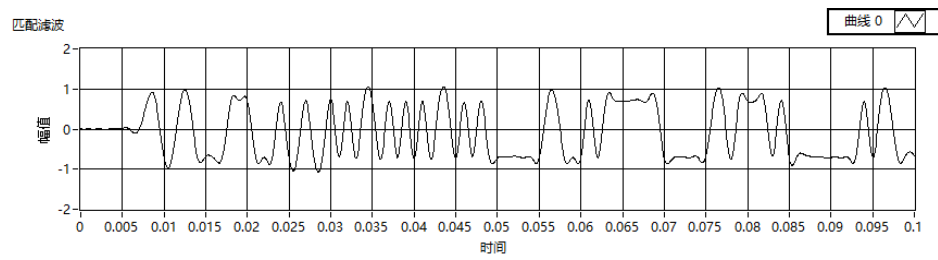
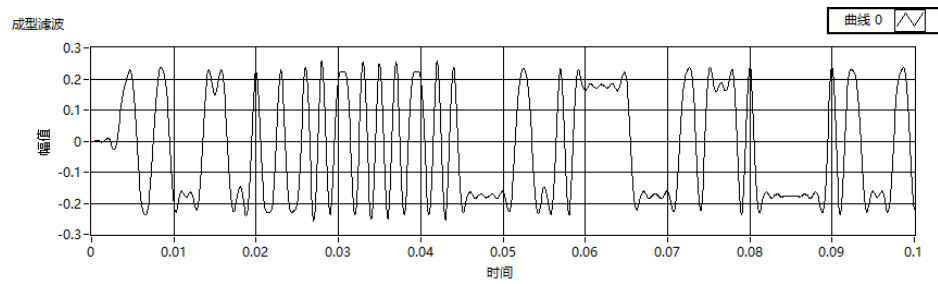
## c. 调整sample/symbol

sample/symbol用于指定脉冲成形滤波器每个符号的所需样本数。

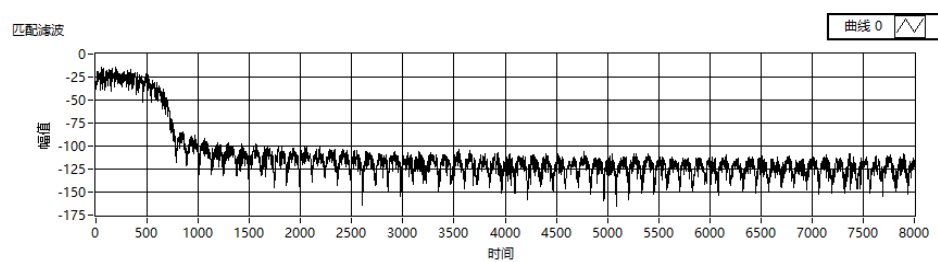
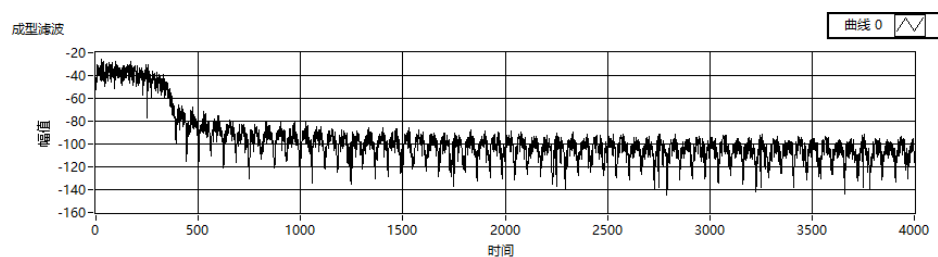
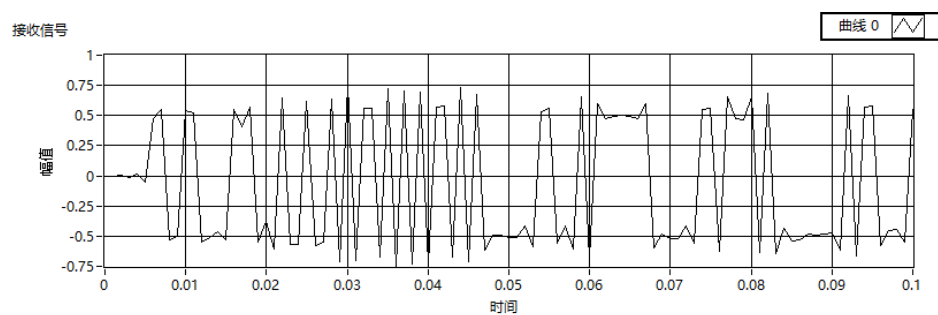
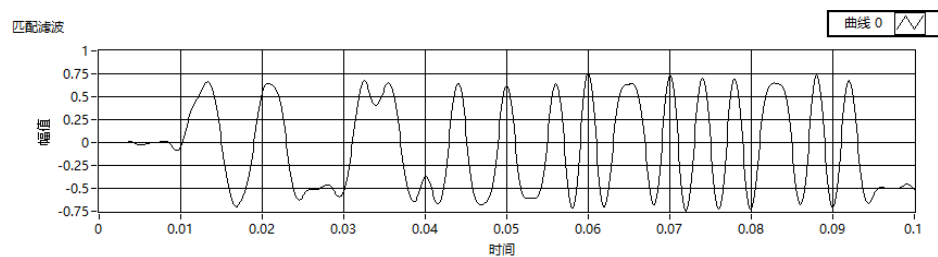
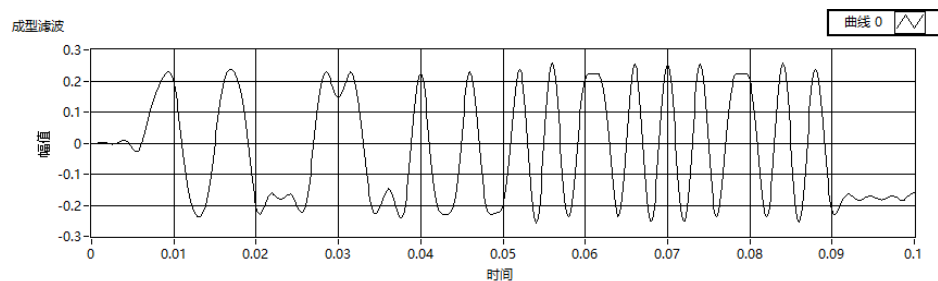
sample/symbol = 24



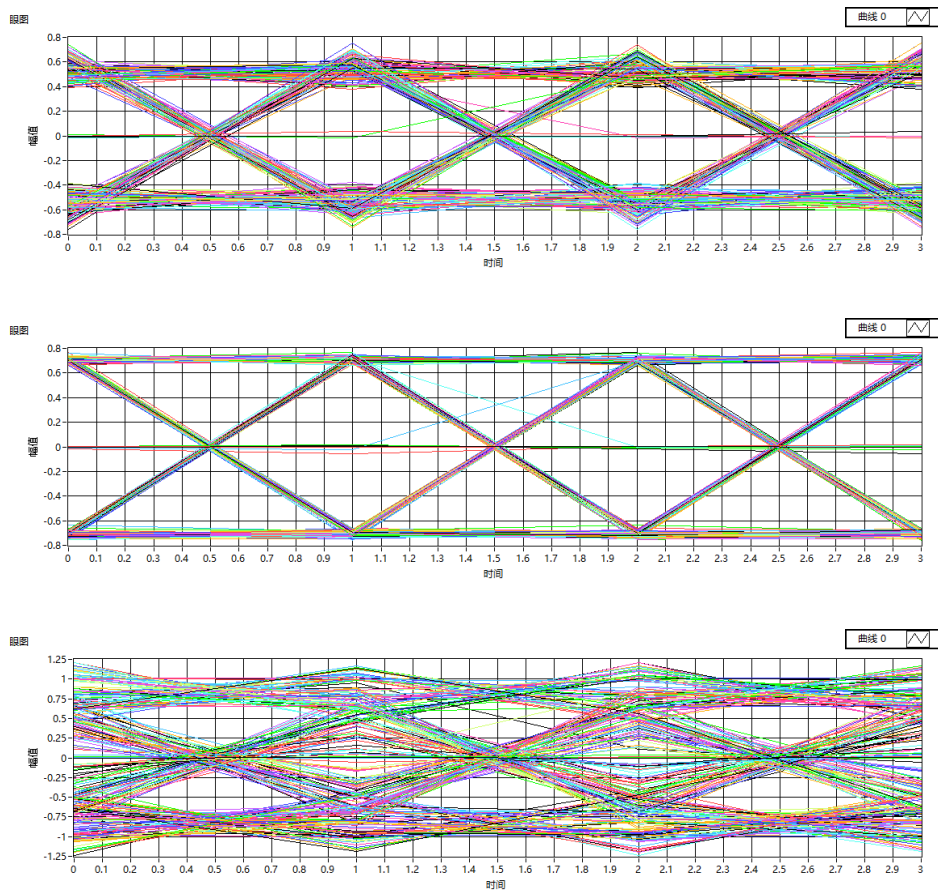
sample/symbol = 16



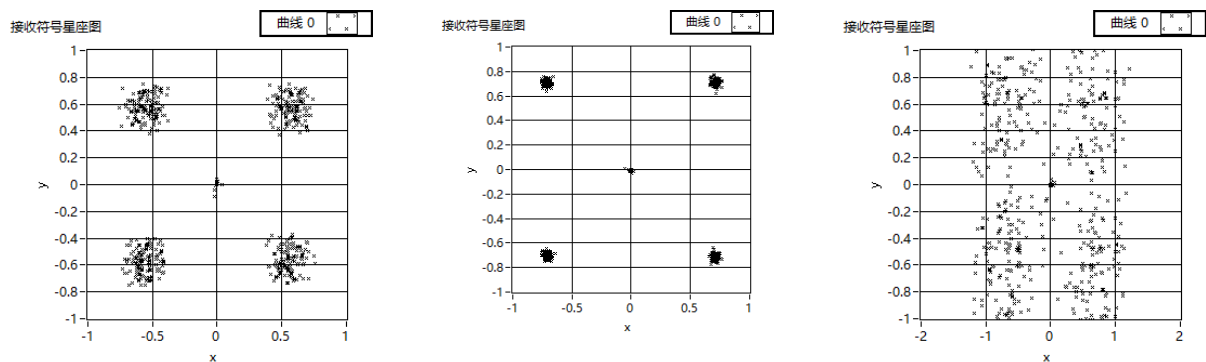
sample/symbol = 8



比较眼图



## 比较星座图

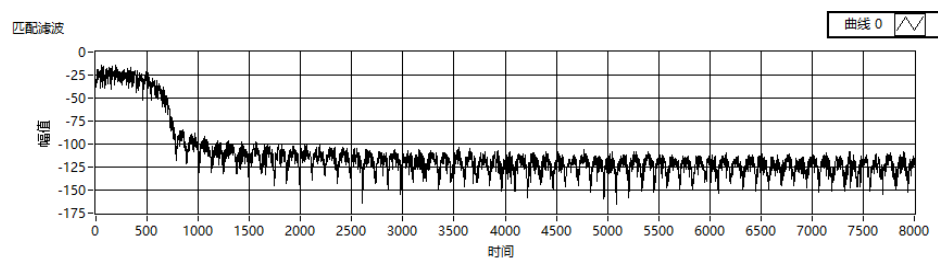
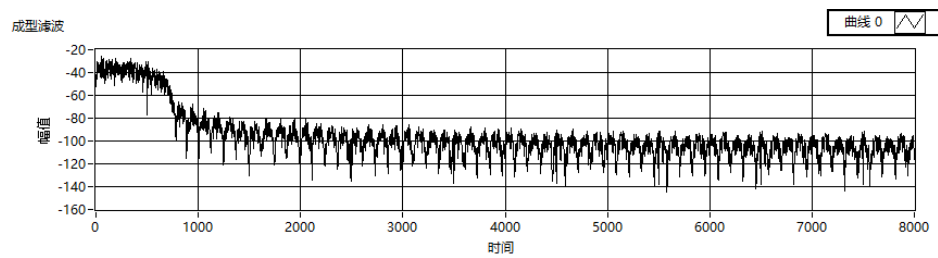
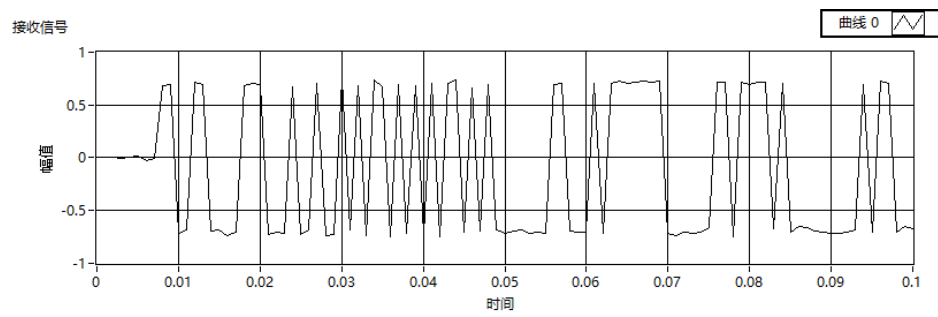
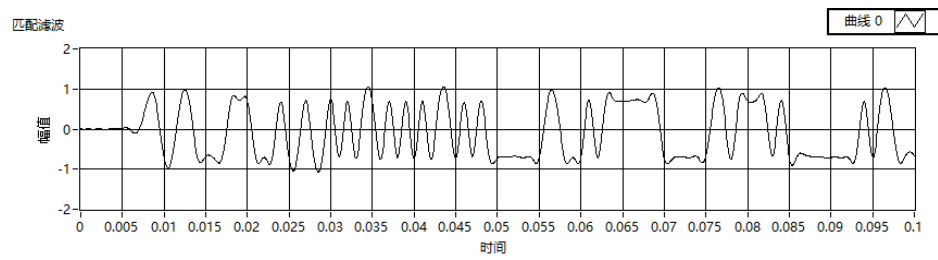
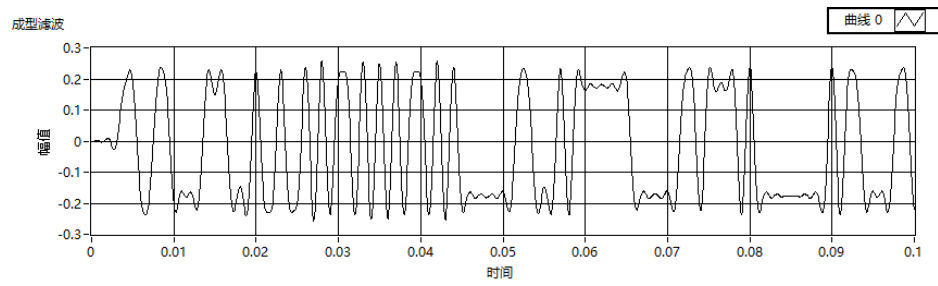


可以发现在sample/symbol值偏大或偏小时都会出现波形的失真。

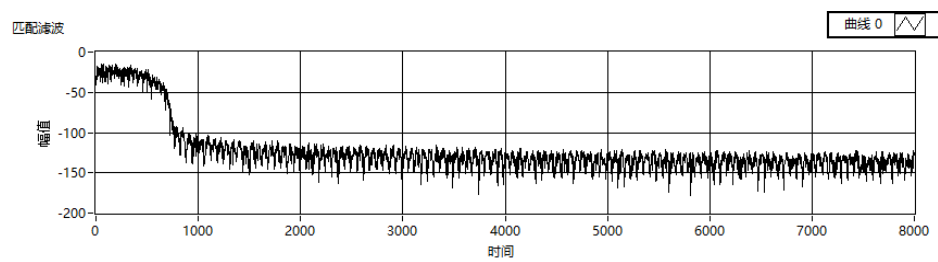
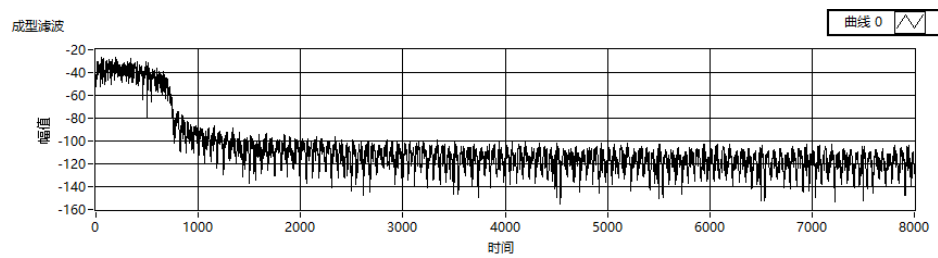
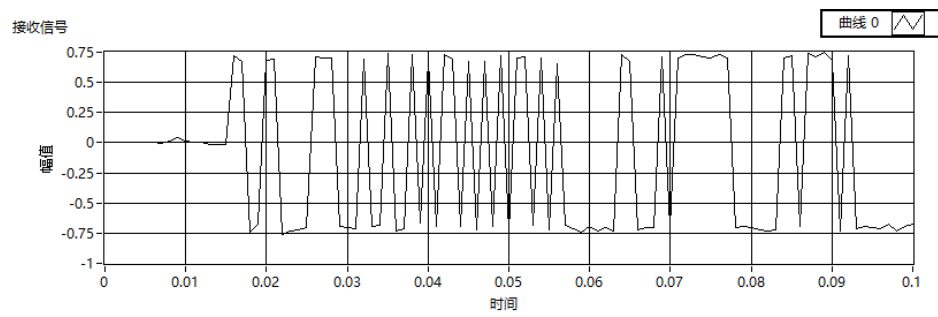
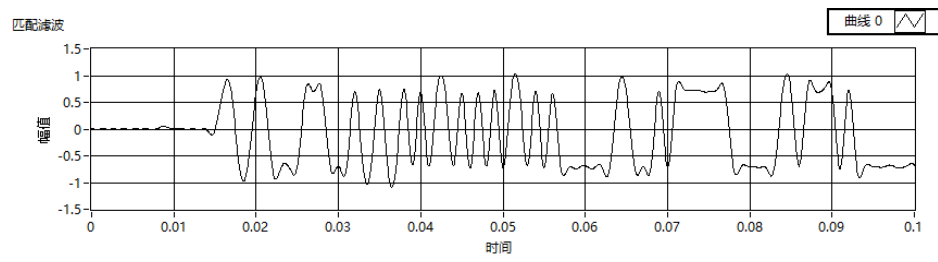
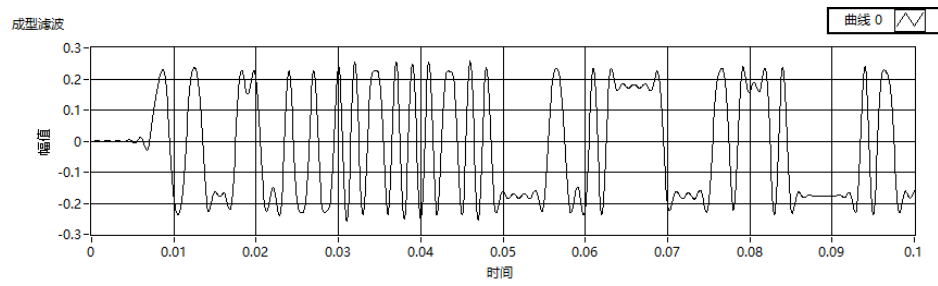
## d. 调整滤波器系数长度

滤波器长度指的是产生的滤波函数数字化后的样点个数，滤波长度越大，所描述出来的滤波函数越精细。同时，用来表示函数两端的0值的点数越多，与输入信号进行卷积后，输出信号两端的0值也更多，表现为长度越长，输出信号的时延越明显。

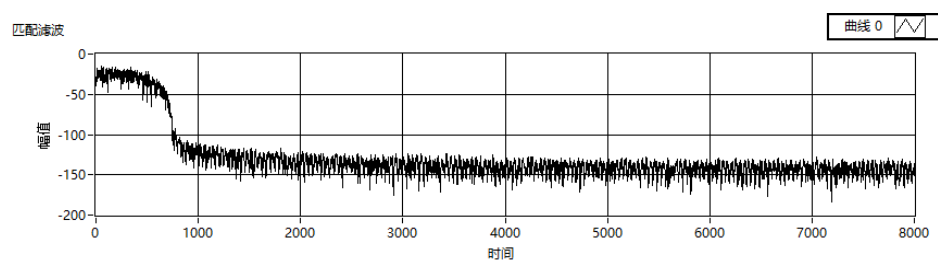
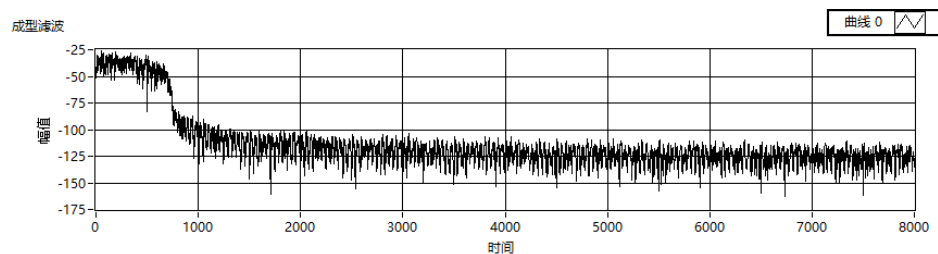
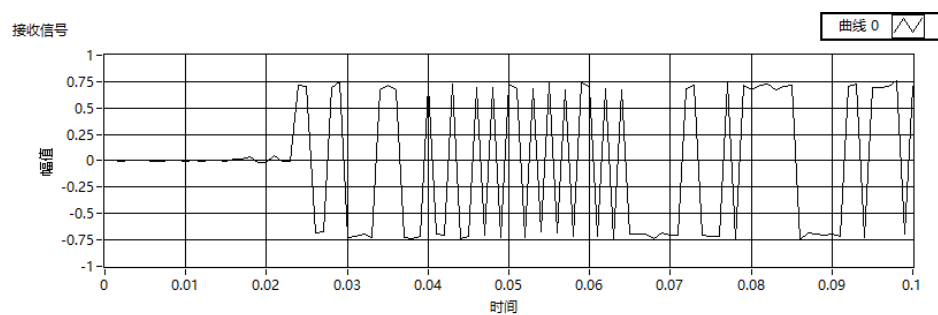
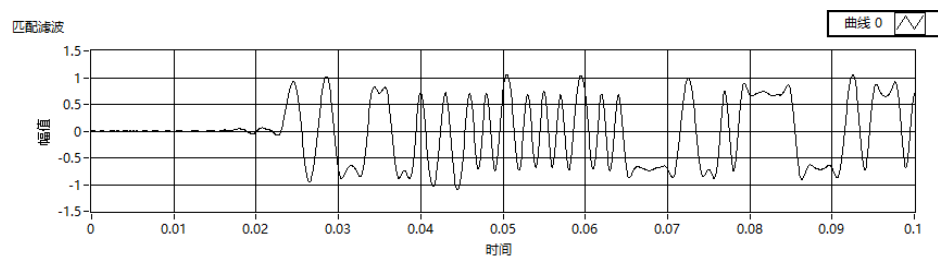
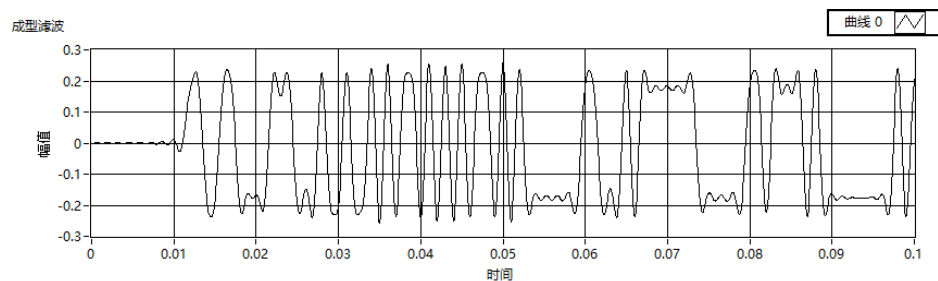
filter length = 8



filter length = 16

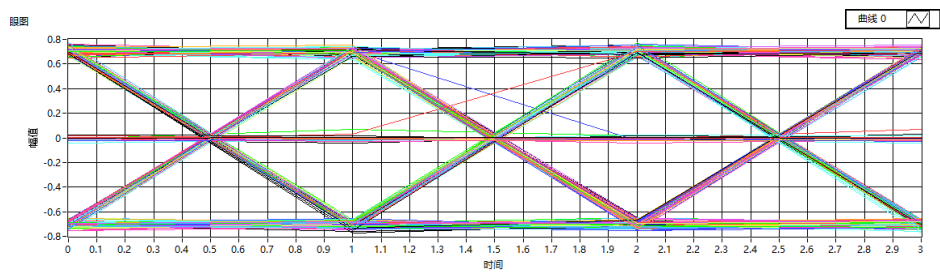
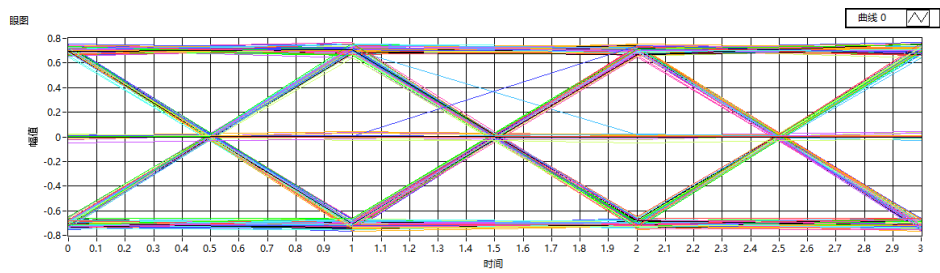
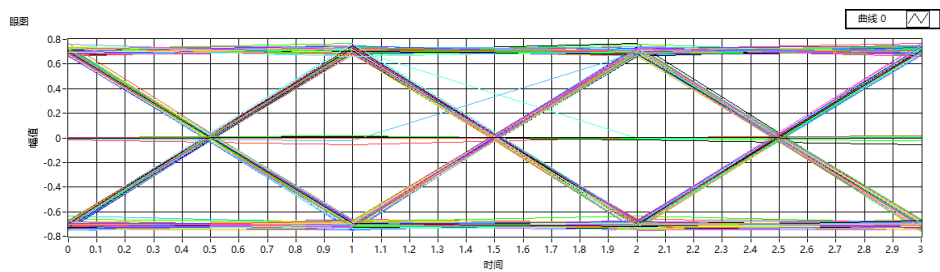


filter length = 24

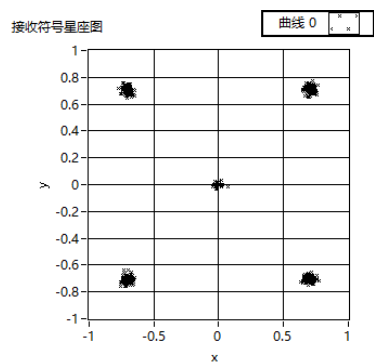
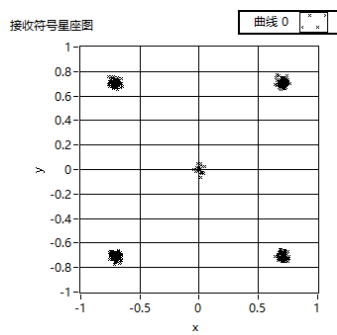
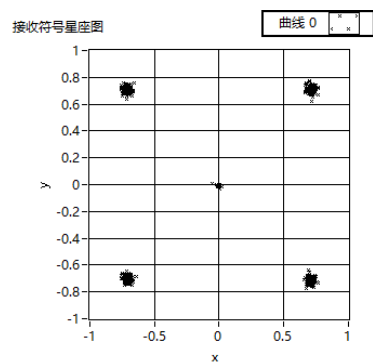


比较眼图



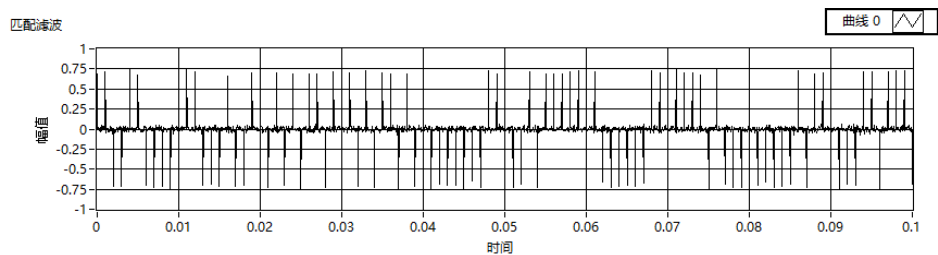
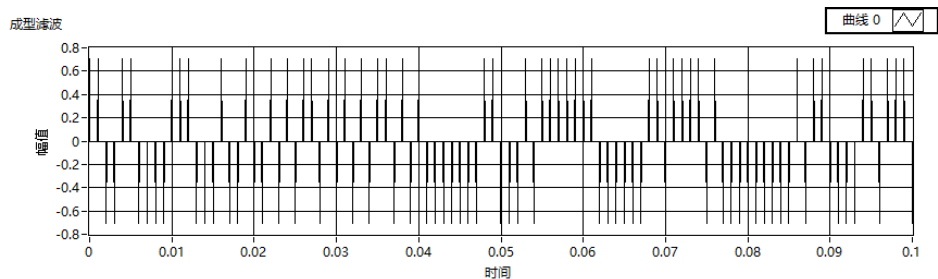


## 比较星座图

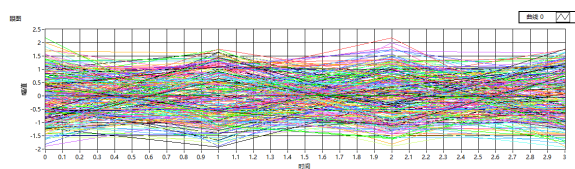


e. 改变滤波器种类

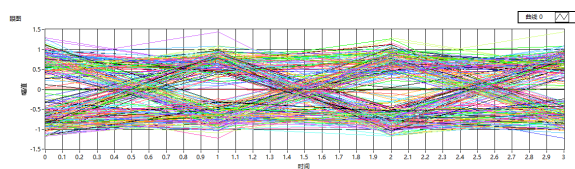
raised cosine



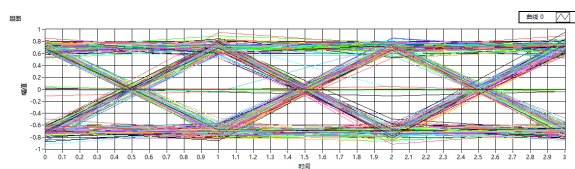
3. 画出接收符号的眼图，分析眼图现象。改变SNR，观察眼图变化，分析SNR变化对过零点的改变和失真的影响



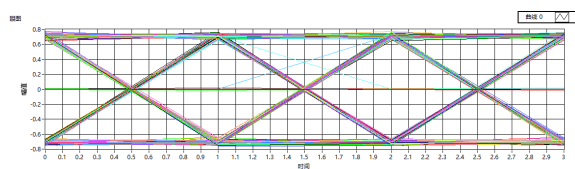
3dB



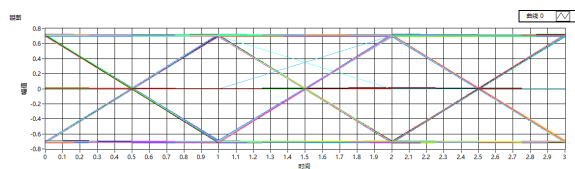
10dB



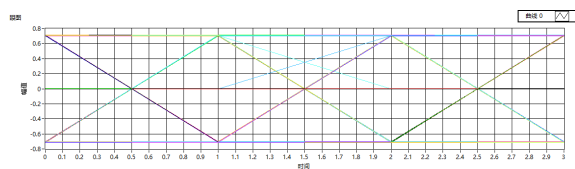
20dB



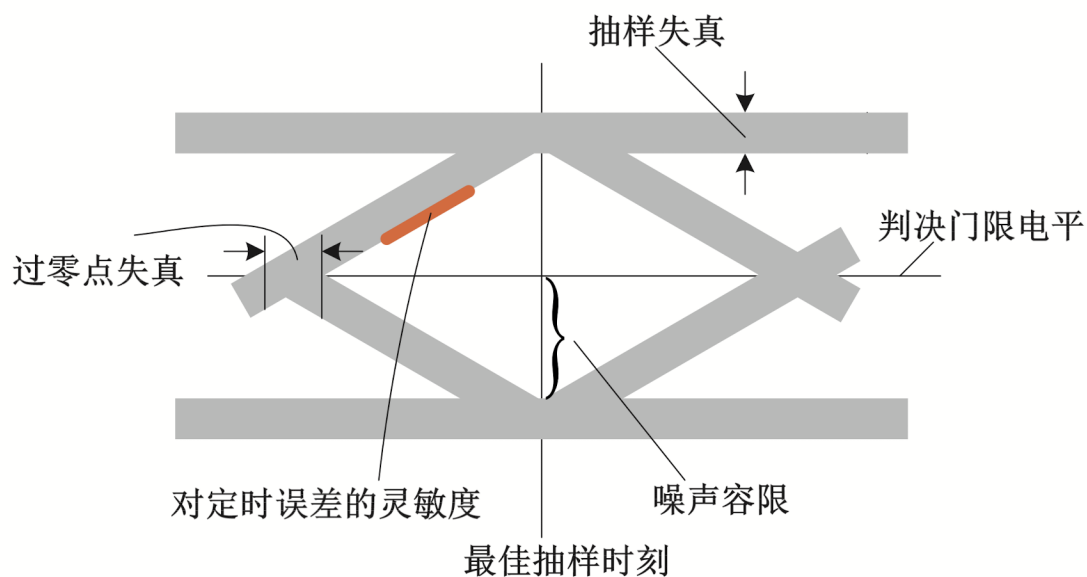
30dB



40dB



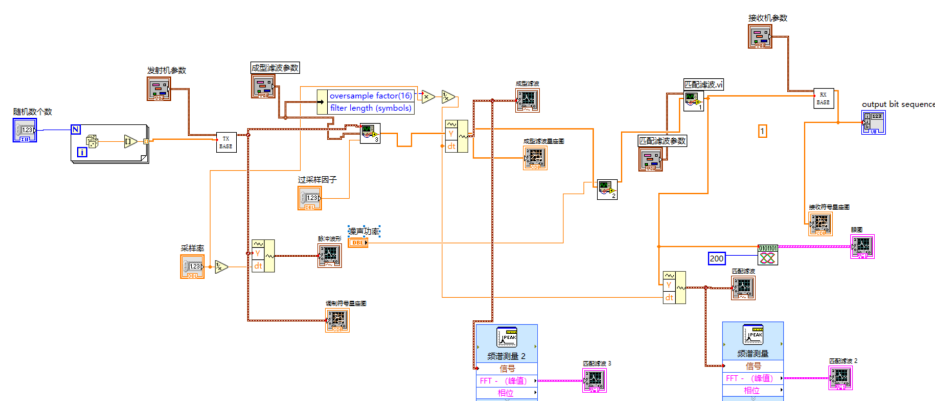
50dB



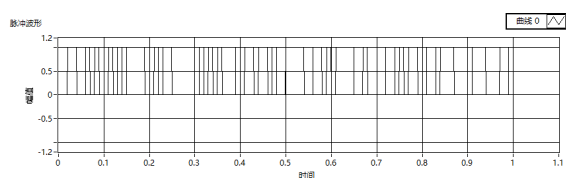
可以看出当噪声功率变小时，即SNR变大时，其过零点失真减小，即过零点的位置相对更稳定，并且随着SNR变大，信号变得更为纤细。同时可以发现在眼图中央有一条直线，该直线产生的原因为使用的滤波器非理想滤波器存在拖尾，若不使用滤波器可以发现该直线在眼图中消失。

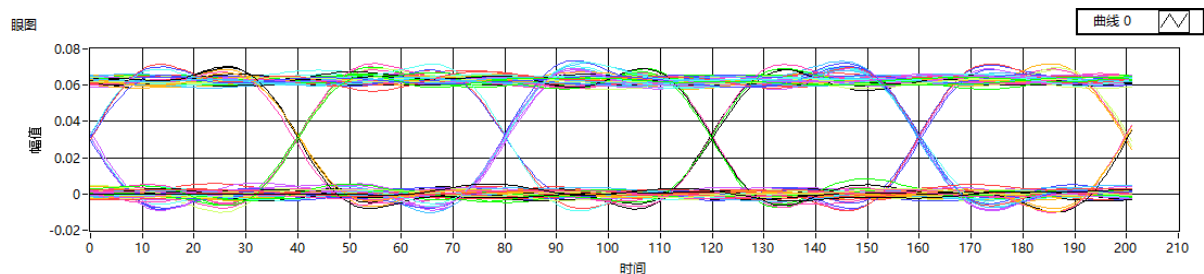
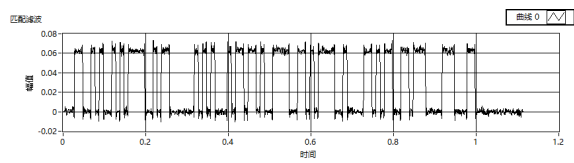
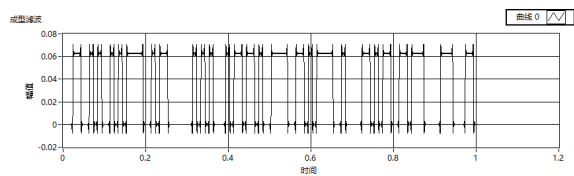
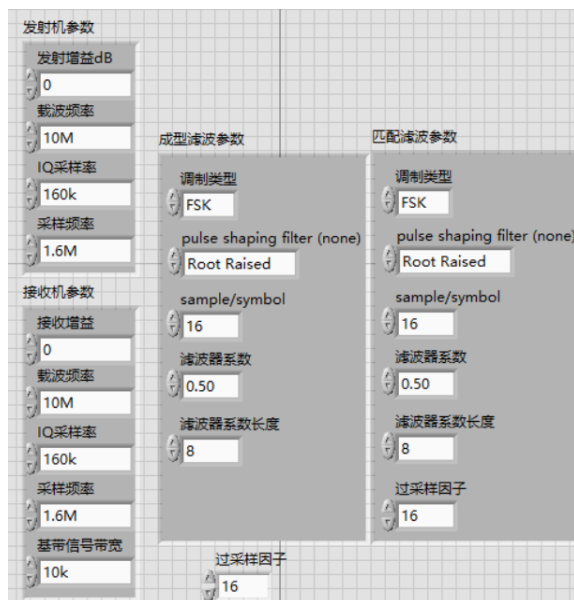
## 拓展部分

加入给出的收发机



采取如下的参数设置





## 五、回答问题

验收要点：

1. 观察经过脉冲成型滤波和匹配滤波后的信号波形，说明使用滤波器的作用；改变滤波器系数和长度，观察对信号波形的影响。

答：脉冲成型滤波可以控制发送信号的带宽，抑制高次谐波，减少码间串扰。匹配滤波可以改善抽样时刻信噪比，使抽样时刻信噪比最大。

2. 画出接收符号的眼图，观察SNR的改变对眼图变化的影响，进而分析其对过零点的改变和失真的影响。（实验内容中回答）
3. 列举两到三个可能对眼图造成可视性损伤的通信链路环节。（课后习题中回答）

## 课后习题：

1. 在通信链路（从信源到信宿）的很多环节都会对眼图造成可视性损伤，请至少列举出三处这样的环节。

答：

- 信号在信道传输的过程中受到噪声的干扰，对眼图的信号从纵向来看空间缩小，容易对信噪比造成不利的影响。
- 信号通过ISI信道的时候产生了码间串扰，过零点处产生了信号的混叠，误码率提高，对信号产生干扰。
- 信源处成型滤波器的滚降系数过高，对信号的处理不足，带宽仍然较宽，眼图产生损伤。
- 脉冲成型滤波器和匹配滤波器不匹配。

## 2. 为什么成型滤波能增加信道容量？

答：成型滤波内有升采样，提高了信噪比，所以增大了信道容量。

## 3. 匹配滤波如何降低误码率？

答：匹配滤波器按照信号的幅频特性对输入波形进行加权，能有效地提高接收信号能量而抑制噪声，使通过匹配滤波器后的信号信噪比最大化。

## 4. 成型滤波器和匹配滤波器的各参数含义是什么？

答：这两个滤波器的函数呈现共轭关系，因此其设计参数也是相同。滤波设计参数包括：滤波器系数、滤波器长度、过采样因子。

滤波器系数指的是滚降系数 $\alpha$ ，表示的是剩余带宽的百分比，取值范围为 $0 < \alpha < 1$ 。当 $\alpha$ 趋近于0时，滤波函数越接近理想低通滤波，所占带宽越小，但与此同时时域上滤波函数的拖尾衰减得越慢，越容易造成严重的码间串扰。当 $\alpha$ 趋近于1时，频域上滤波函数越平缓，所占带宽越大，导致频谱利用率低，但与此同时时域上滤波函数的拖尾衰减较快，更有效的抑制码间串扰。

滤波器长度指的是产生的滤波函数数字化后的样点个数，滤波长度越大，所描述出来的滤波函数越精细。同时，用来表示函数两端的0值的点数越多，与输入信号进行卷积后，输出信号两端的0值也更多，表现为长度越长，输出信号的时延越明显。

过采样因子指的是每符号样点数。过采样因子越大，频谱上滤波函数的主瓣越窄。这是由于过采样相当于在时域上进行拓展，则相应的频域会被压缩，因此所需要的滤波器主瓣可以较窄。

## 5. 考虑如何实现数字化的成型和匹配滤波器。

答：

要实现模拟滤波器转换成数字滤波器，频域转换公式为：

$$H(z) = H(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}$$

相应的截止频率为：

$$\theta_c = 2 \arctan \frac{T\Omega_c}{2}$$

其中 $H(s)$ 、 $\Omega_c$ 为模拟滤波器的系统函数以及截止频率； $H(z)$ 、 $\theta_c$ 为数字滤波器的系统函数以及截止频率； $T$ 为抽样周期。

由此对进行逆 $z$ 变换，可以得到数字滤波器的冲激响应函数。

6. 思考什么情况下成型和匹配滤波器的函数不一定为奈奎斯特脉冲。

答：当信道传输函数不为1时，成型和匹配滤波器的函数不一定为奈奎斯特脉冲。

7. 思考USRP模拟前端的低通滤波器和实验中设计的匹配滤波器的差别。

答：USRP模拟前端的低通滤波器是有带宽限制的，但是匹配滤波器是无限。

8. 考虑为什么不直接以码元周期采样，而是先升采样再降采样（匹配滤波，码元同步）。

答：若直接以码元周期进行采样，相当于直接对调制符号进行成型滤波，而调制符号变化较迅速，导致频谱较宽。但信道是一个较为固定的带限系统，输入信号的滤波带宽是依据信道带宽的。因此，当信号带宽较大时，相同的滤波条件下可能会滤除掉更多的信号信息，导致信息损失。

此外，要求接收端定时精确，否则容易直接错成相邻符号，造成很大的码间串扰。

若先升采样，相当于对信号对时域波形进行拓展，使得它的频谱被压缩，在相同的滤波条件下不仅可以滤除带外信号，可以较好的保持信号的主要信息。

此外，由于升采样再滤波后，信号取值的相关性使得同一符号的采样点的值较为接近，这样接收端进行同步降采样时，即使定时稍有偏差，也只是错成同一符号最优采样点的相邻采样点，信噪比仍然较大，译成相邻符号的概率较小，码间串扰因此也相对较小。

综上，先升采样再降采样可以使通信的可靠性得到提高。

## 六、心得体会

本周实验进行的是脉冲成型及匹配滤波实验，同时老师还讲解了码元同步原理。

本次实验中，我们学习了脉冲成型及匹配滤波器的参数设置，实现原理以及输出结果。除此之外，通过这次实验，我们又再度复习了一次数字调制解调的基本步骤。

在进行脉冲成型及匹配滤波器的设计时，由于ppt中有参考的程序框图，我们在滤波器子模块设计过程中并没有遇到什么问题，但是在我们将设计的滤波器与上一次实验中设计的BPSK/QPSK调制解调的程序相连接时，却出现了输入输出的数据类型不匹配的连线错误。为了将数据调整为相应的类型，我们又只能对滤波器和BPSK/QPSK调制解调程序进行修改，在这一步中花费了大量时间。

其次，在测试完我们自己设计的AWGN信道解调无误后，我们将助教提供给大家的信道模块接入程序，却发现无论如何都接收不到正确的波形，星座图也同样出现错误，本以为是噪声的功率过大，但无论将功率调整到多小，仍不能接收到正确波形，后来助教也来帮忙调试，却仍没有得出有效的解决方案。经过我们和助教的讨论，一致认为应该是输入参数没有达到最佳的匹配，我们将在下次实验中继续探索解决办法。