

通信原理第五次实验报告

实验小组成员：汪奕晖（19302058），马知行（19302045）第43组 8

实验分工：共同完成

实验日期：2022年3月18日

班级：2019级信息工程

第7章 数字通信系统中窄带信道中的码元定时恢复

一、实验目的

1. 了解最大能量法、迟早门法、Gardner算法等定时同步方法原理。
2. 用编程方法实现最大能量法，迟早门法，Gardner 算法定时同步的设计。
3. 通过观察星座图、眼图、误码率探究不同定时同步方法的特点。
4. 将信号通过USRP链路，观察符号定时前后星座图的变化。

二、实验仪器

1. LabVIEW软件仿真。
2. USRP 2920型号软件无线电设备。

三、实验原理

无线信道中的噪声并不是简单的高斯白噪声，更加真实的信道模型包含衰减、相位移动、

传播延迟。最简单的信道模型就是频率平坦信道，在这种信道中，接收信号为：

$$z(t) = \alpha e^{j\phi} x(t - \tau_d) + v(t)$$

其中， α 为衰减； ϕ 为相位移动； τ_d 为延迟。

信号经过该频率，平坦信道后，送入接收机且在数字端进行匹配滤波再降采样到频率等效于 $1/T$ 的离散时间信号 $y[n]$ ，表示为：

$$y[n] = \alpha e^{j\phi} \sqrt{E_x} \sum_m s[m] g((n - m)T - \tau_d) + v[n]$$

其中 $g(t)$ 是成型滤波函数 $g_{T_x}(t)$ 与匹配滤波函数 $g_{R_x}(t)$ 的卷积。

不同的时延 τ_d ，对采样判决造成的影响不同：

第一种情况下，假设传播时延 τ_d 小于一个码元周期，即 $0 < \tau_d < T$ ，相当于存在定时误差。此假设下，考虑到奈奎斯特脉冲波形仅在 $t = nT$ 时刻采样才不会对其他时刻码元产生码间串扰，故采样得到的 $y[n]$ 可以表示为：

$$y[n] = \sqrt{E_x} \alpha e^{j\phi} g(\tau_d) + \sqrt{E_x} \alpha e^{j\phi} \sum_{m \neq n} s[m] g((n-m)T - \tau_d) + v[n]$$

从表达式可以看出：在判决时刻，信号不仅存在自身的衰弱，噪声的干扰，同时还存在在其他时刻码元的码间串扰，这将对判决产生不利影响。

第二种情况下，假设传播时延 τ_d 是码元周期的整数倍，即满足 $\tau_d = dT$ ， d 为一个整数。在这种情况下，其他时刻码元对本时刻码元的码间串扰问题得到解决，不存在定时误差。但存在一个未知的传播延迟，为码元周期的整数倍。在这样的假设下，采样得到的 $y[n]$ 可以表示为：

$$y[n] = \sqrt{E_x} \alpha e^{j\phi} s[n-d] + v[n]$$

从表达式可以看出：在判决时刻，其他时刻的码元不会对本时刻码元产生串扰，但判决得到的原始比特序列将会有有一个固定时延。

第三种情况下，假设信道中已经不存在定时误差，即 $\tau_d = 0$ ，则采样得到的 $y[n]$ 可以表示为：

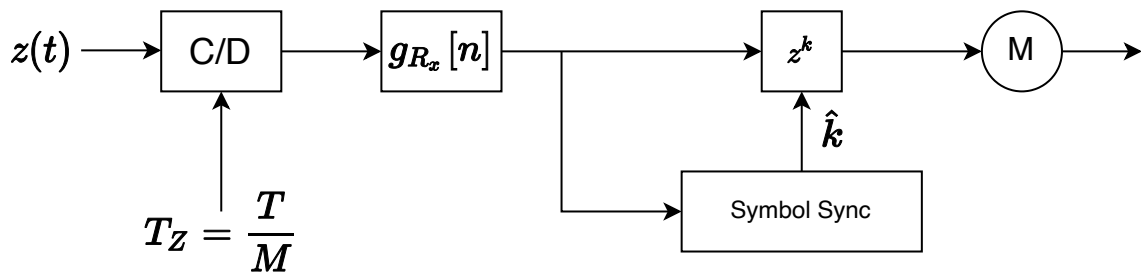
$$y[n] = \sqrt{E_x} \alpha e^{j\phi} s[n] + v[n]$$

从表达式可以看出：由于信道的传播时延和采样过程的存在，即使消除了定时误差，接收信号仍然存在失真，其中有幅度失真 α 和相位失真 ϕ ，这两个量对于接收机来说是未知的。

在成形滤波与匹配滤波实验中，当接收波形通过匹配滤波器后，存在一最佳抽样时刻，在该最佳抽样时间点抽样，可得到判决信噪比最大信噪比的采样点。码元定时同步的结果是找到该最佳采样时刻。对于使用奈奎斯特脉冲的通讯系统，其最佳采样时刻为 $t = nT$ ，当延迟 $\tau_d = 0$ 时，器件只需以码元周期 T 进行采样，即可采到最佳抽样点的抽样结果。

但实际通讯系统的延迟是随机的，这就需要进行码元同步。码元同步的方式有许多种，对于模拟通信系统，可以利用锁相环等方式提取载频信息。但实验中由于USRP的硬件结构限制，无法在模拟端实现锁相环的结构，故本实验采用过采样技术，通过对信号进行离散时间采样，在数字段实现码元同步，具体方法如下：

首先在一个码元时间 T 内，对该码元进行 M 倍的过采样。通过一系列计算后，估计出延时 \hat{k} 的值。最后在补偿了延迟 \hat{k} 后，在进行 M 倍降采样，即完成了码元同步。按照上述接收方式修改后的接收处理模型为：



1. 最大能量法。

最大能量法的核心思想是：寻找使得采样得到的信号的平均能量最大的点作为最佳采样点。假设接收端通过匹配滤波器之后的信号存在时延 τ ，则可定义能量函数为：

D

从表达式中可以看出：当 $(\tau - \tau_d)$ 是码元速率的整数倍时， $J(\tau)$ 有最大值，此时的 τ 就是估计得到的定时误差。

首先对接收信号 $y(t)$ 进行 M 倍采样，随后通过匹配滤波器得到的输出信号 $r[n]$ 可表示为：

$$r[n] = \sum_m y[m]g_{R_x}[n - m]$$

离散时间的输出能量可表示为：

D

其中 k 是采样偏移， k 的数值 $0, 1, \dots, M - 1$ 中任意两个相邻数值之间，对于每一个 k 值，都有对应的估计 $\hat{\tau} = \frac{kT}{M}$ 。上式中的期望值可以被替换为在 P 个码元内的时间平均值，由此可以得到：

最大输出能量方法的解，即求 $\hat{k} = \max J_{approx}[k]$ ，估计出 \hat{k} 的值后，参考图7.1的码元同步方案即可。一般来说，采用的P值越大，性能越好。

2. 迟早门法。

迟早门法的本质是给定一个参考码元，将参考码元分为前后两个周期，通过比较前半周期与后半周期的能量的大小，来调整同步时序信号。迟早门法的优点在于其无需插入导频和时间序列，无需通过码元相位而是通过码元能量来求解，且当同步稳定时，不会驱动自己离开同步。与最大能量法不同，其无需知道所有码元的信息来确定采样时钟，可以依据接收的码元来进行同步的调整。

迟早门算法开始时随机设定一个参考码元，将其起始时间作为接收码元的起始相位。将参考码元的前半个周期的能量与后半半个周期的能量进行比较。前半周期称为“早门”，后半周期称为“迟门”。

比较结果可以分为以下三种：

1. 迟早门能量相等。

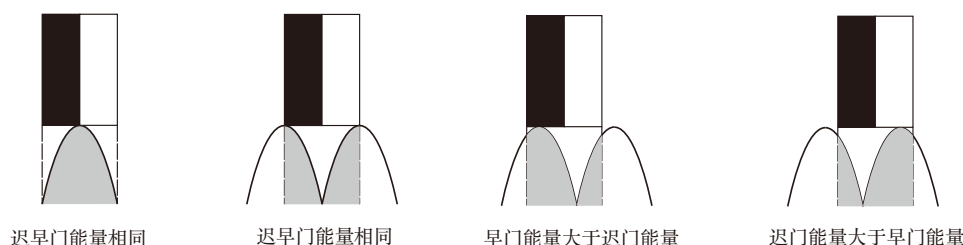
此时可能的情况有两种，一是码元已经进行同步，故而迟早门能量相等。二是参考码元处于两个码元之间，由于两个码元的前半周期与后半周期能量相等，故而迟早门能量相等。当遇到迟早门能量相等时，同步时序不改变，继续观察下一周期。

2. 早门能量大于迟门能量。

此时证明在后半周期来了一个新码元，故而需要将参考码元的起始时间前移一段。

3. 早门能量小于迟门能量。

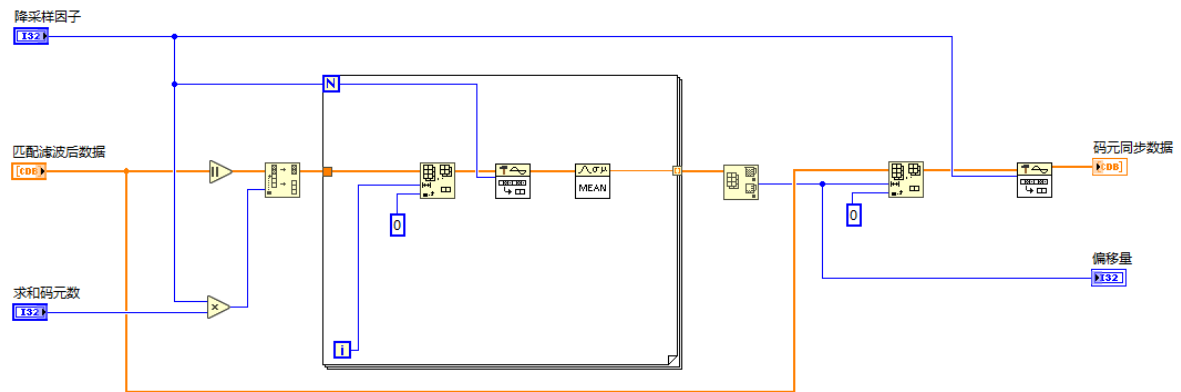
此时证明在前半周期来了一个新码元，故而需要将参考码元的起始时间后移一段。



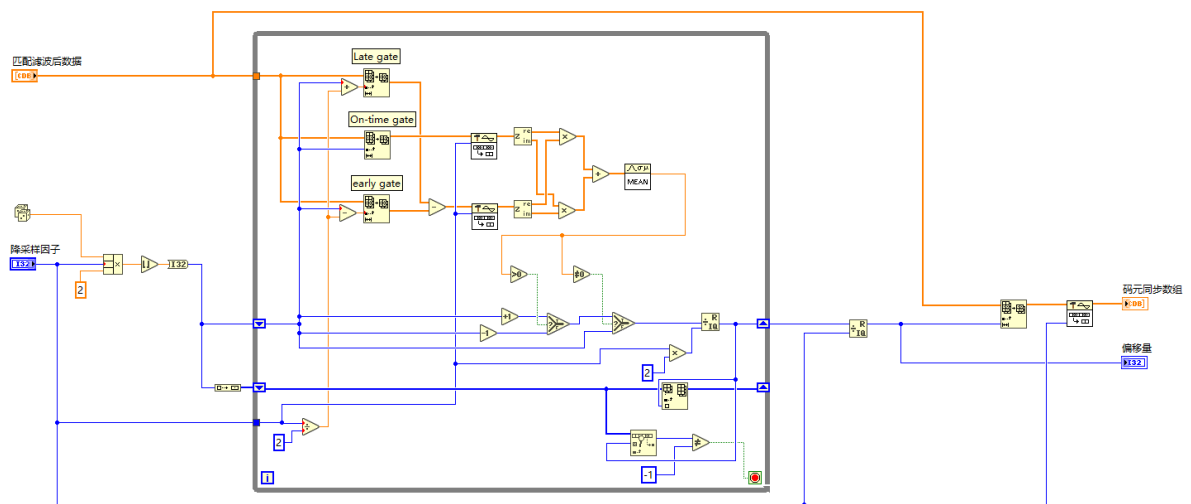
四、实验内容

1. 在以往实验的基础上，分别设计出基于最大能量法和迟早门法的码元定时同步 v_i 。

程序框图如下：



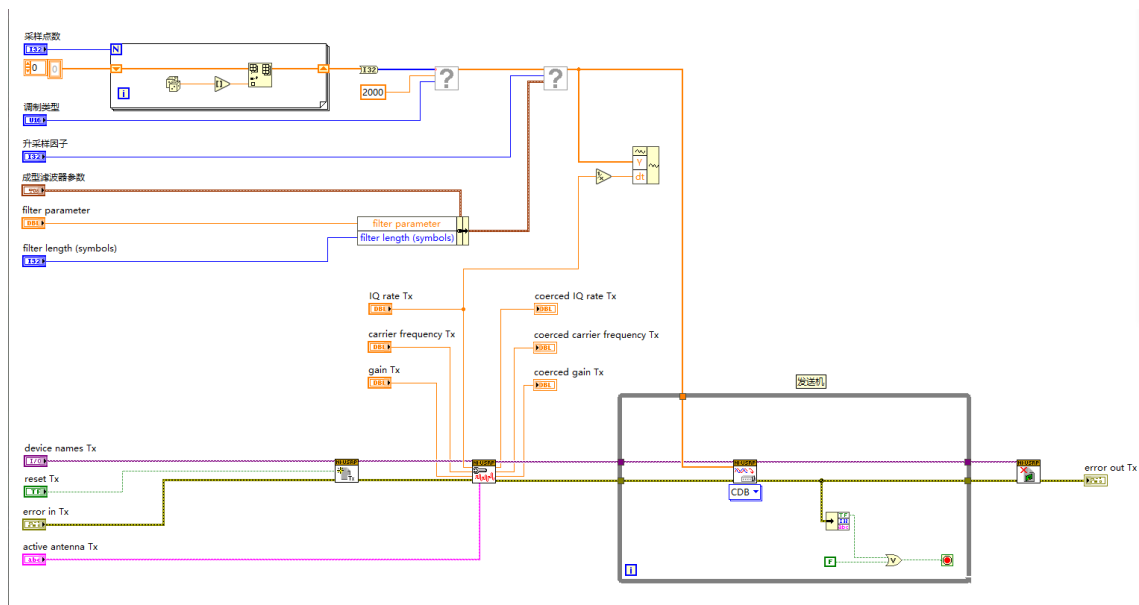
最大能量法



迟早门法

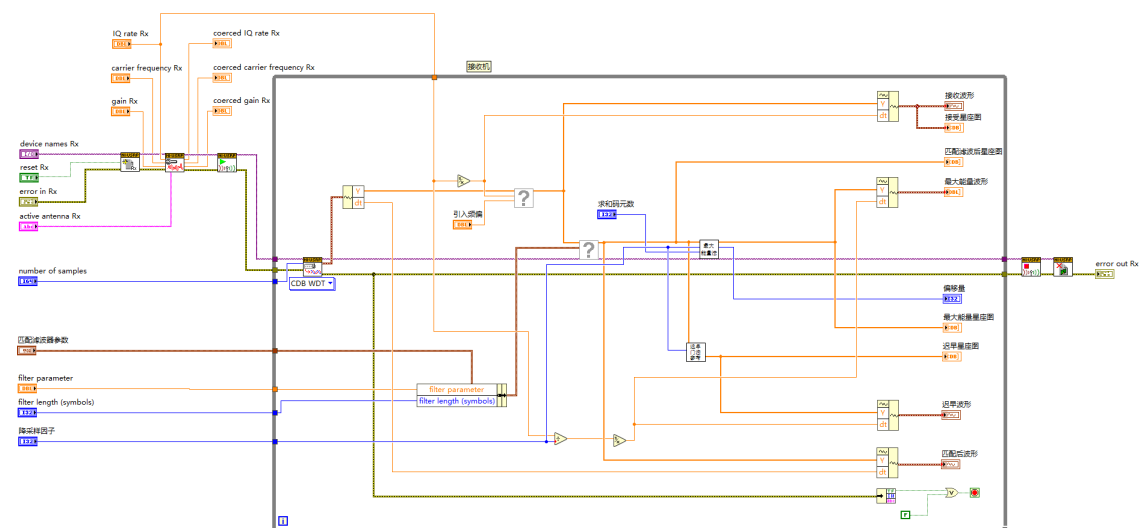
2. 将信号通过USRP链路，观察符号定时前后星座图的变化。

程序框图如下：



发射机

图中两个问号为调制控件和成型滤波控件

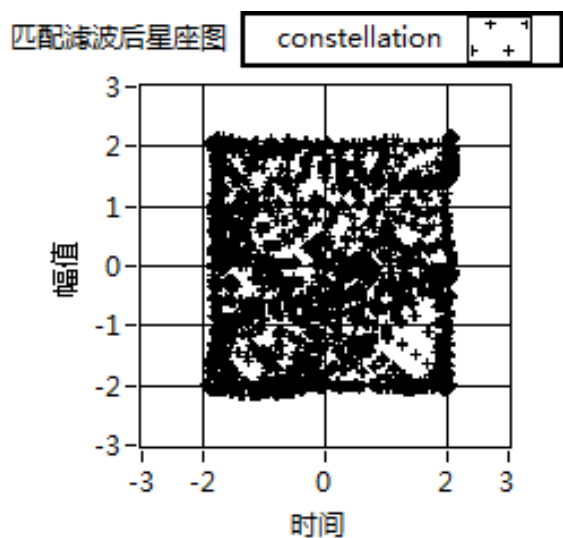
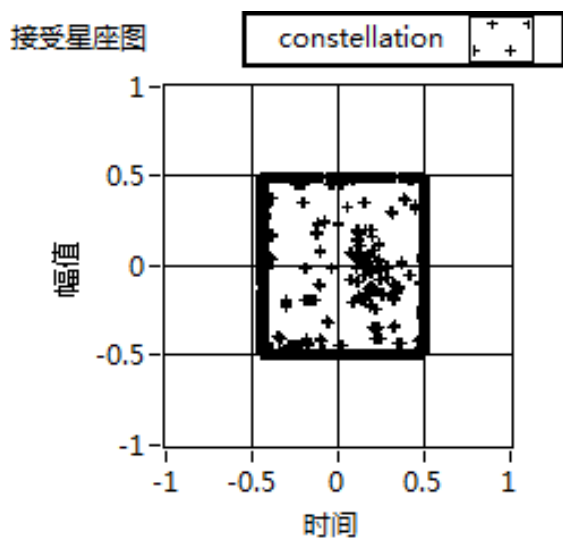
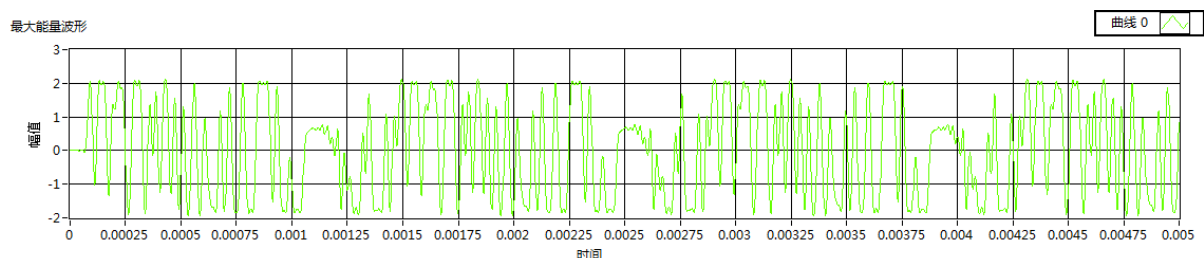
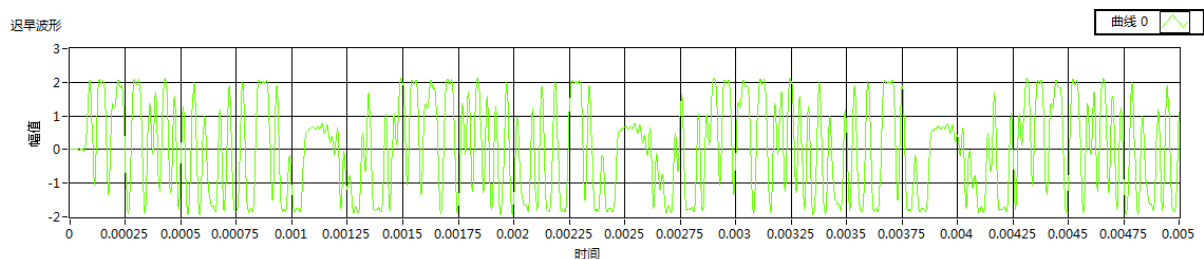
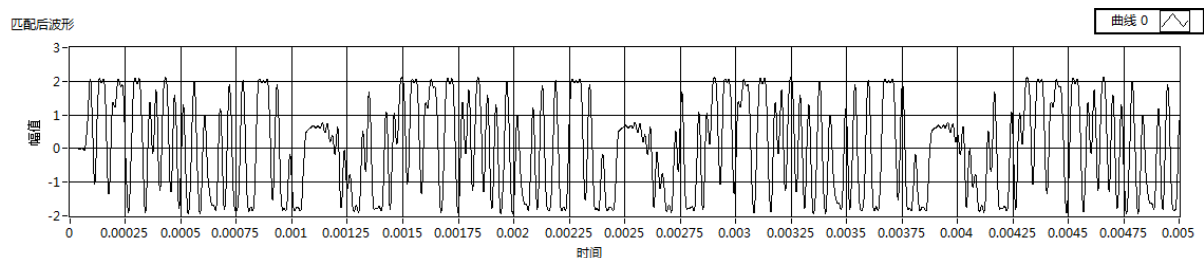
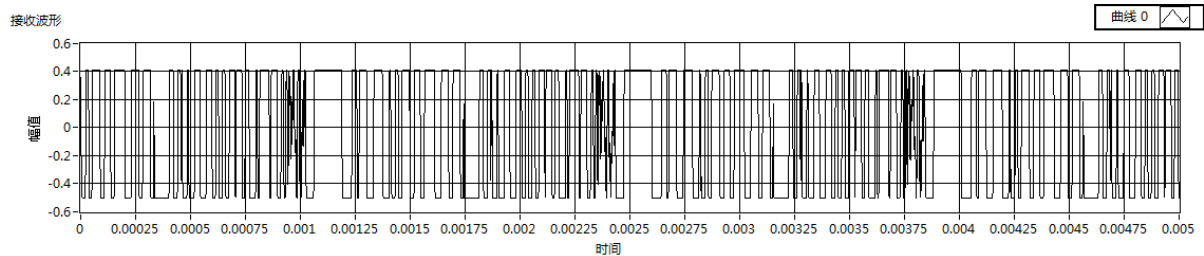


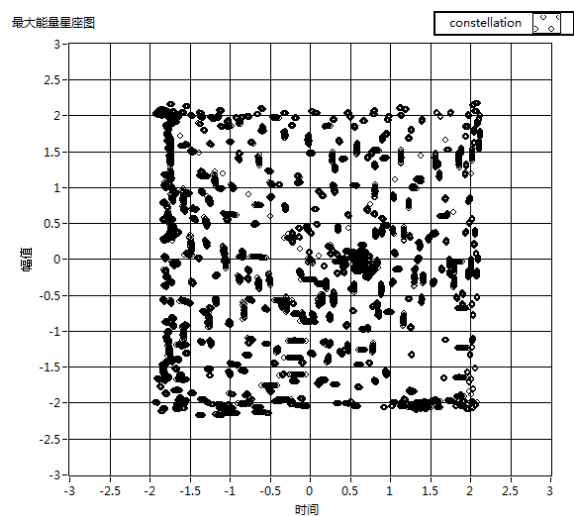
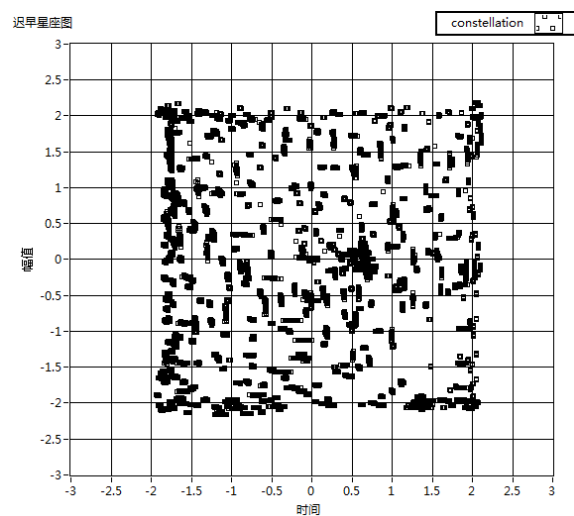
接收机

图中两个问号为匹配滤波控件和解调控件

3. 改变降采样系数，观察两种算法的性能。

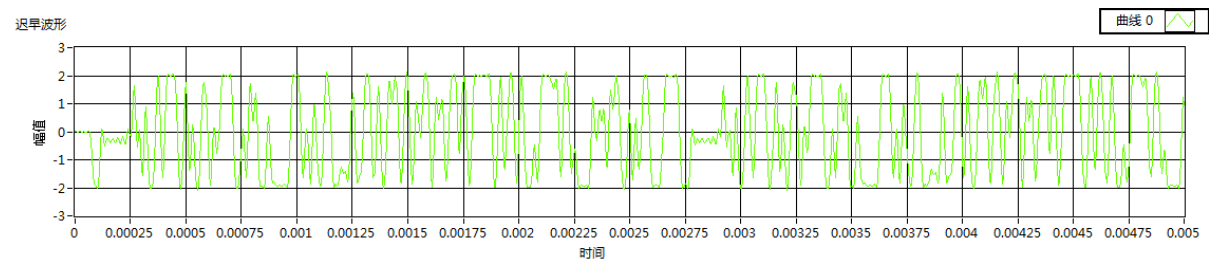
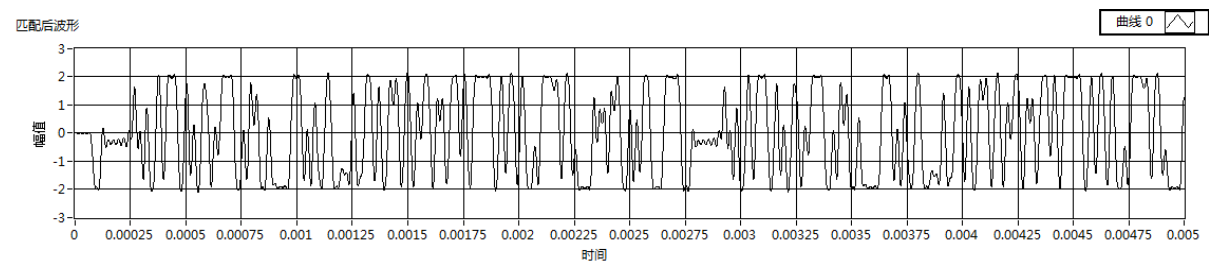
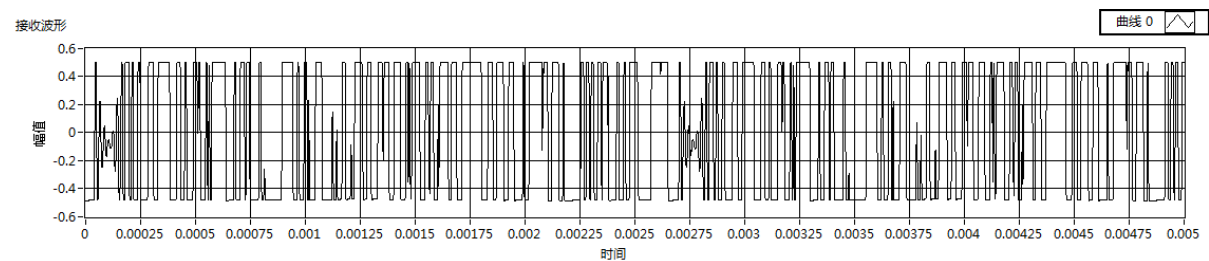
降采样系数为2时

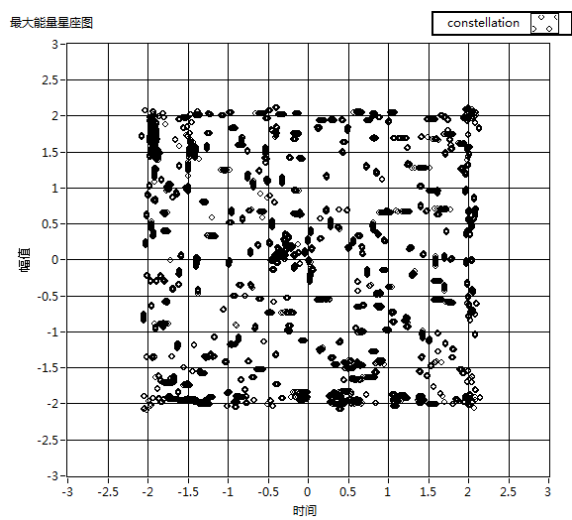
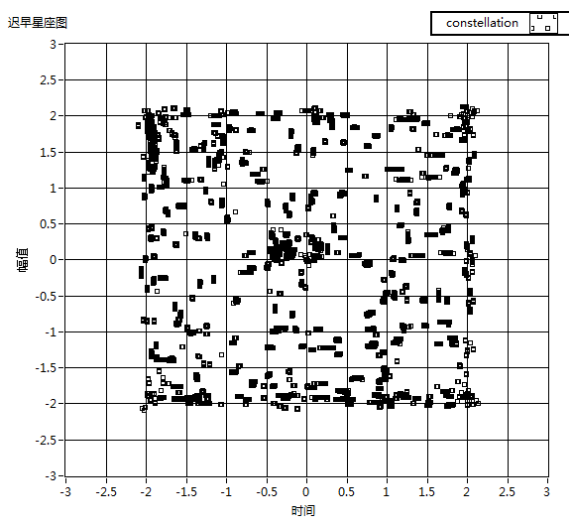
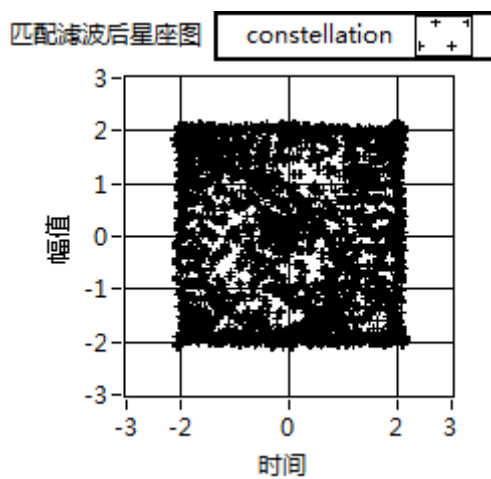
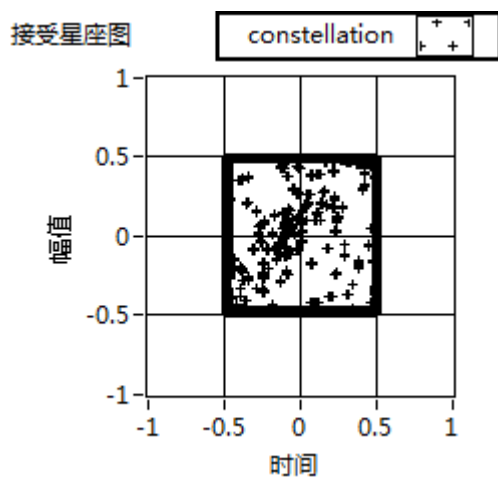
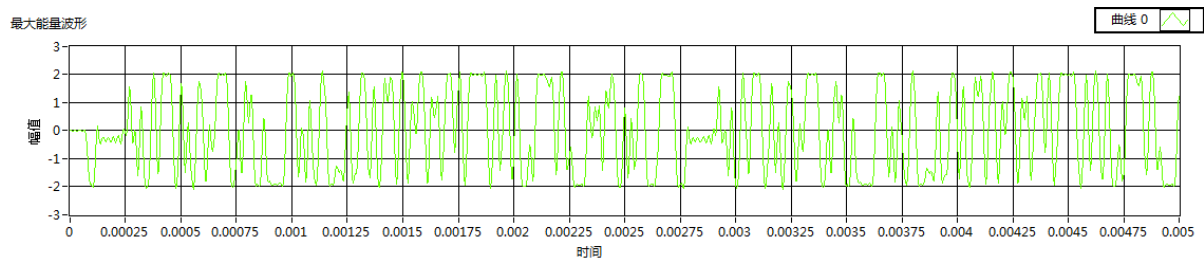




星座图中样点十分分散

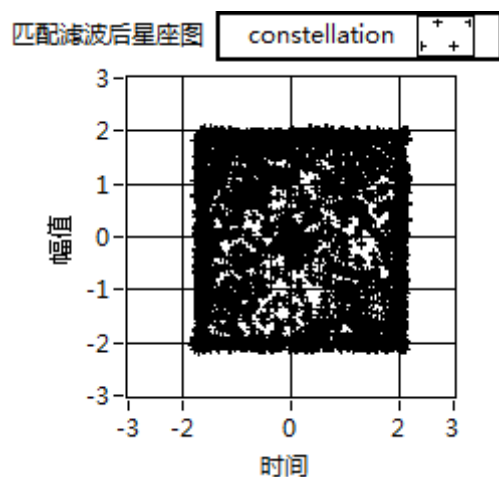
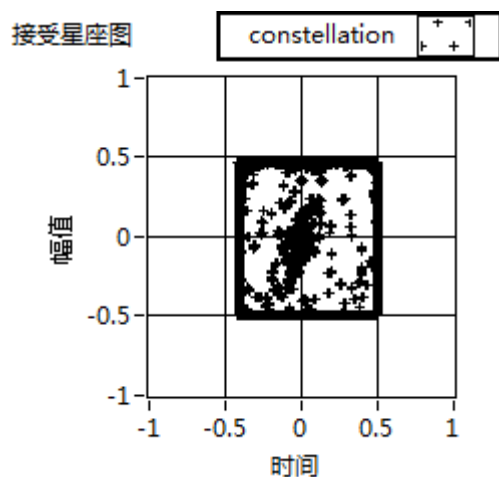
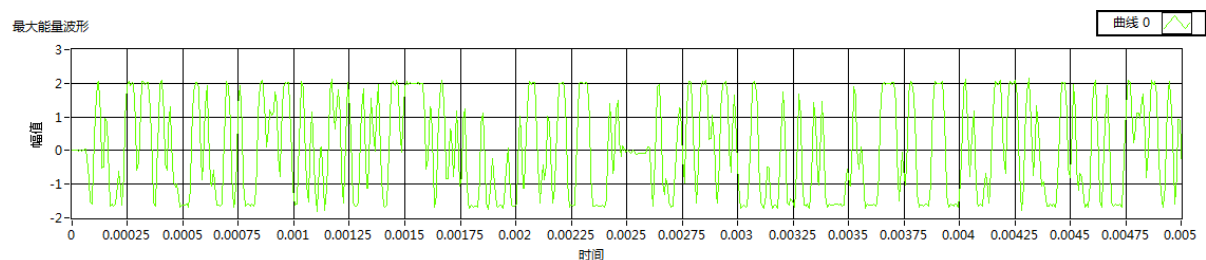
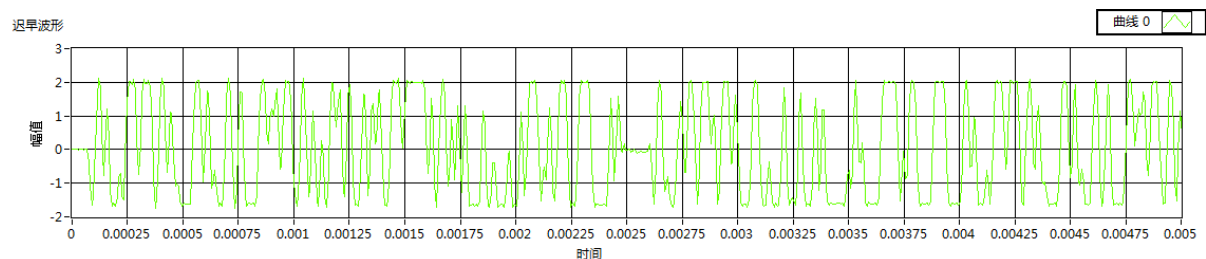
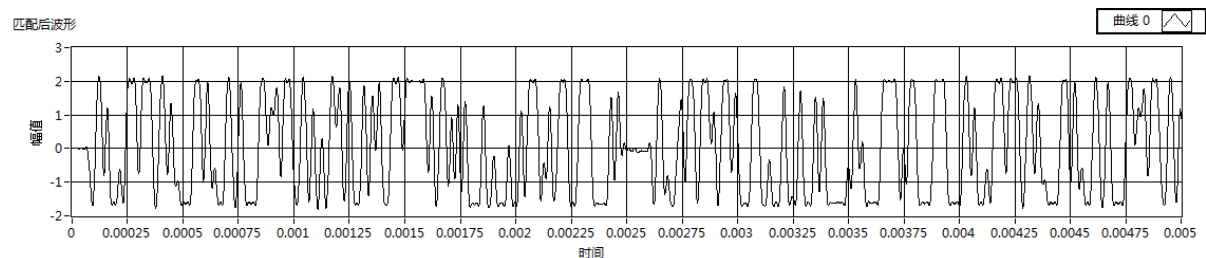
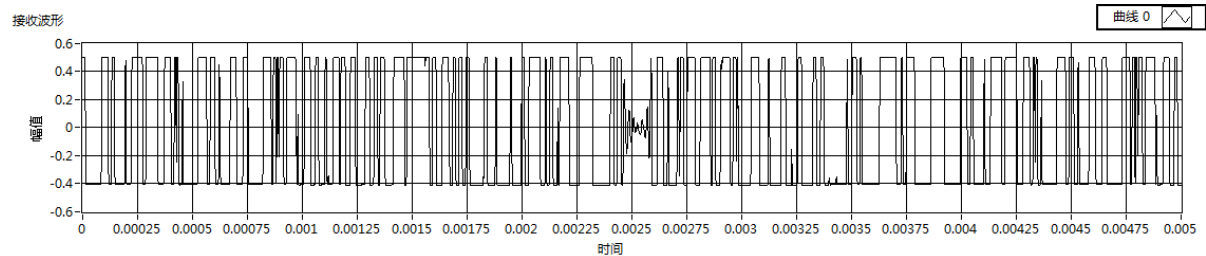
降采样系数为4时

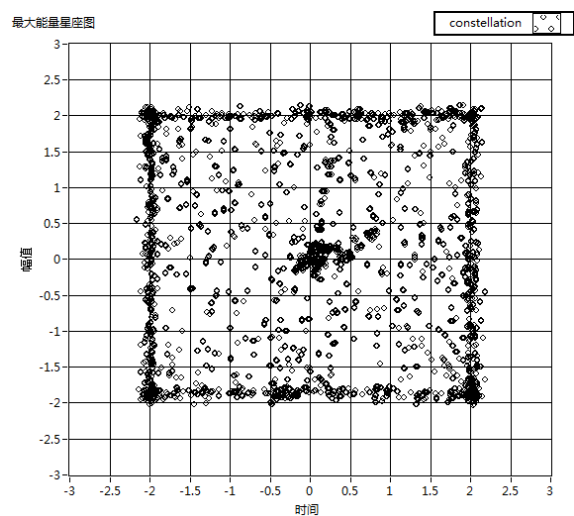
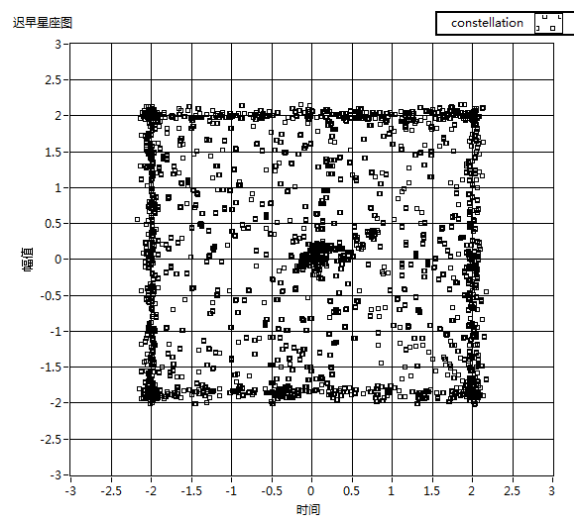




星座图中样点稍微好了点，但还是分散。

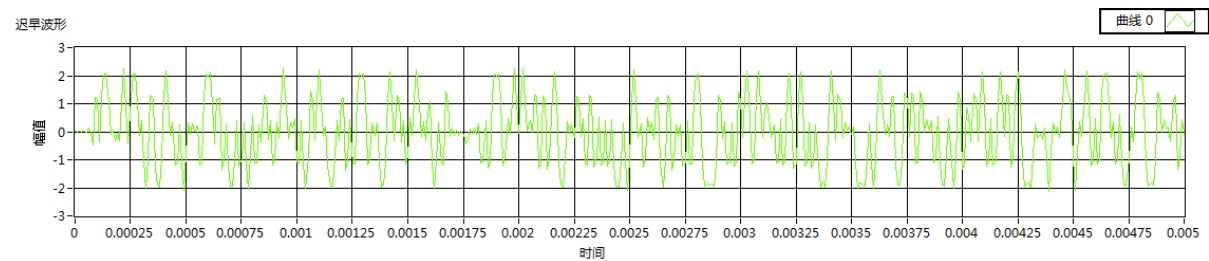
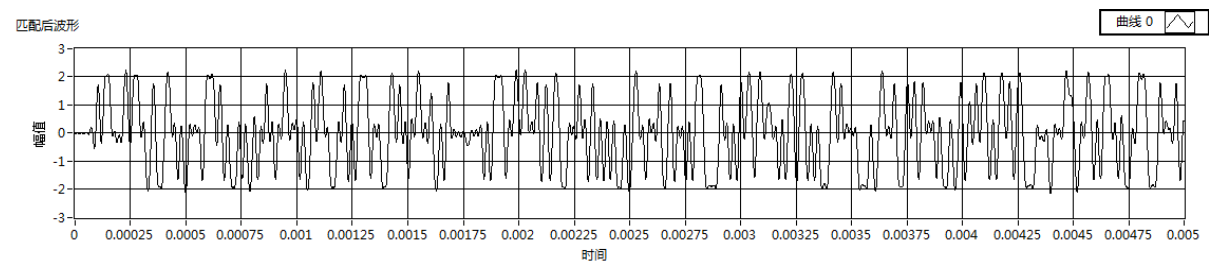
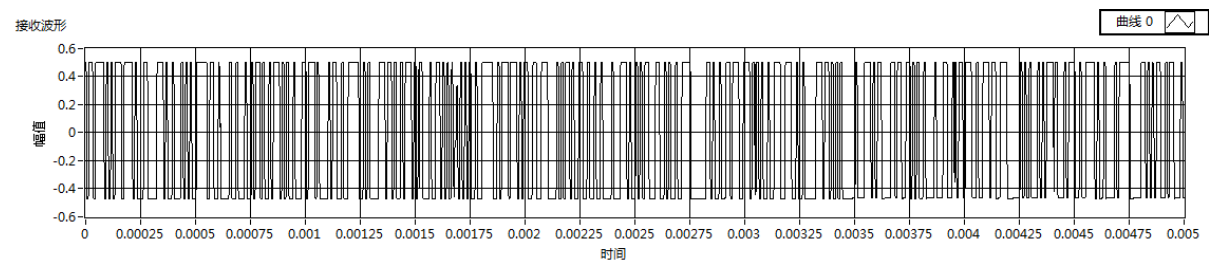
降采样系数为6时

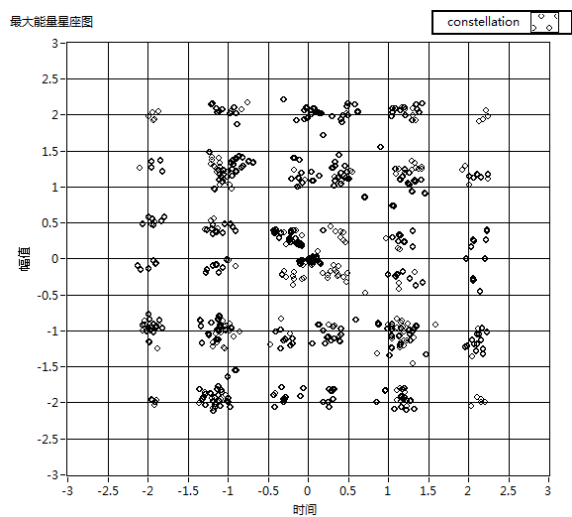
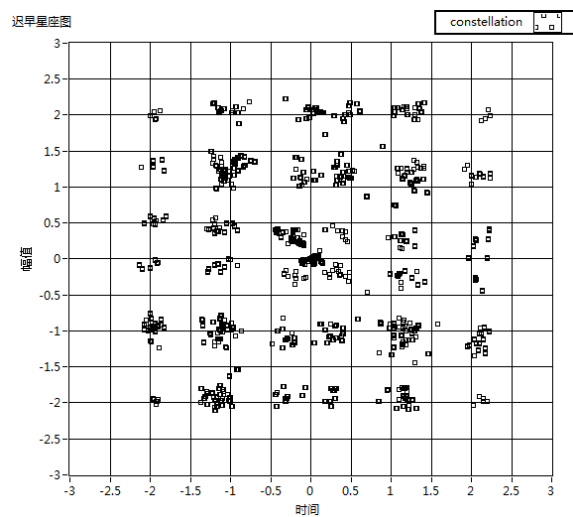
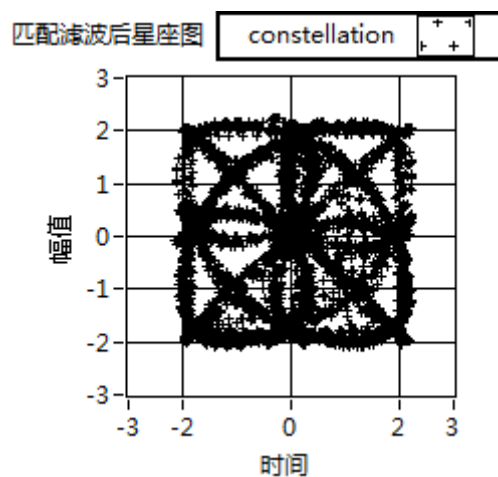
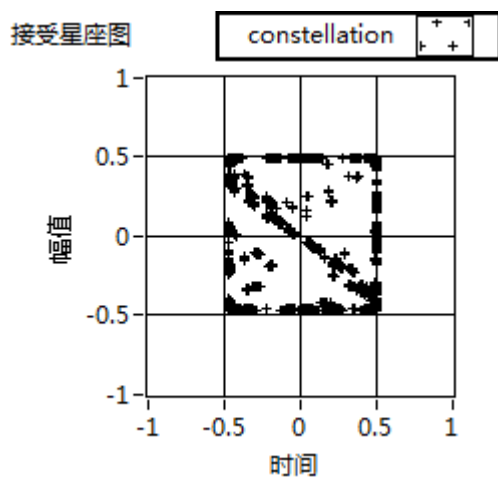
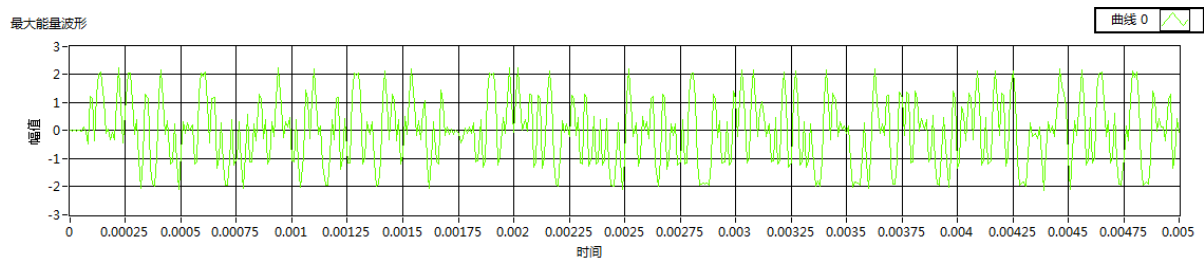




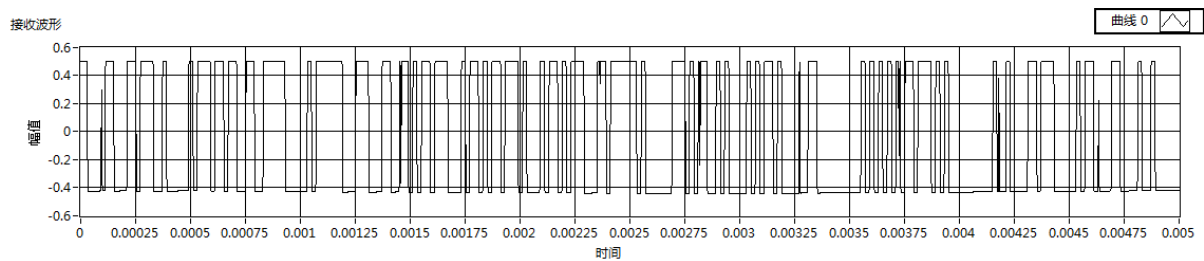
星座图中样点稍微好了点，但还是分散。

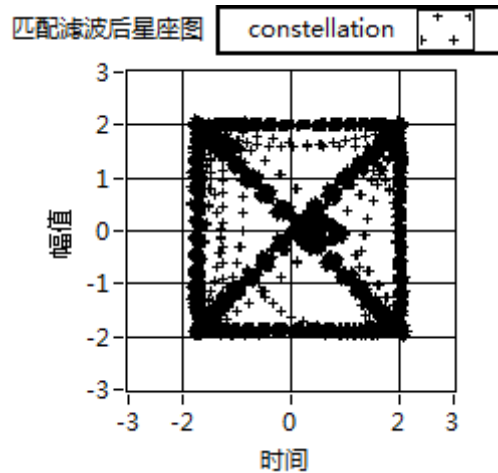
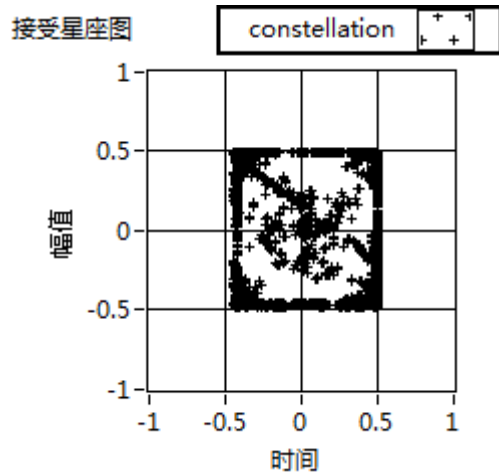
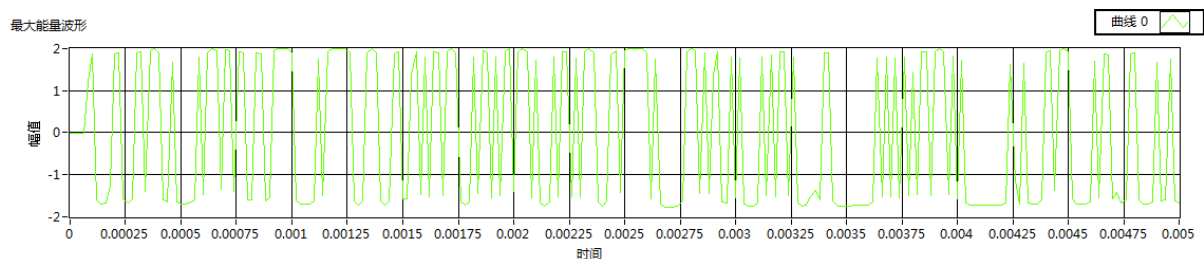
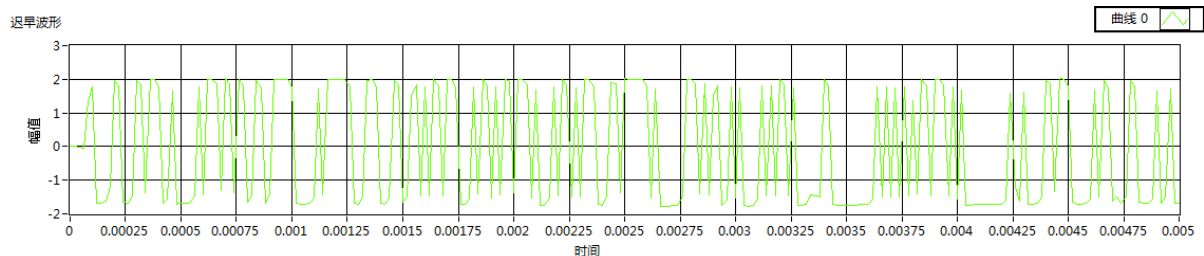
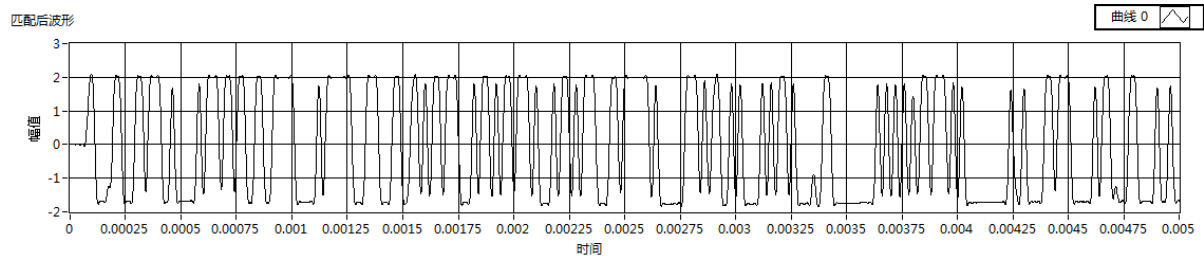
降采样系数为8时

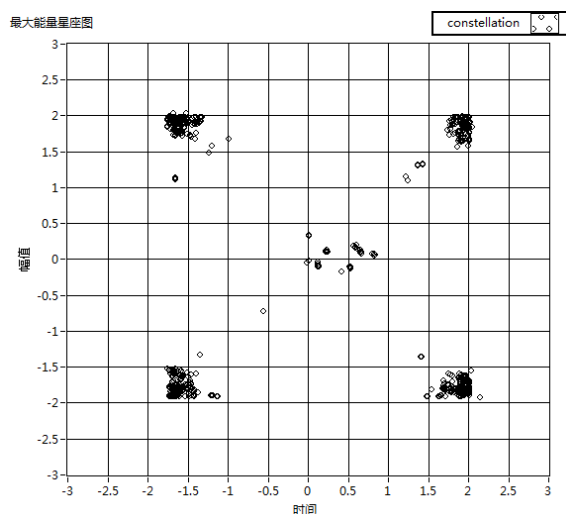
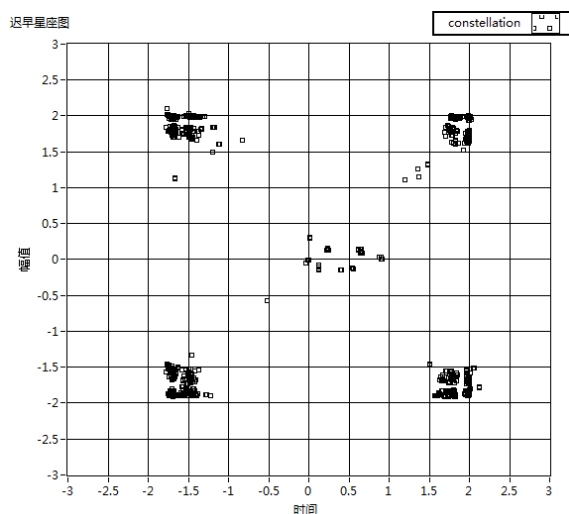




降采样系数为16时







降采样因子为2、4、6时，样点十分分散，可以认为同步效果不好，但相比未同步的情况还是有所改进。

8、16的结果图对比可得：降采样因子越小，点群越分散，效果越差。在USRP信道下，可以发现迟早门的样点更分散一点，同时动态波动较大（实验中观察到），故最大能量法效果比迟早门法稍微好一点。

五、回答问题

ppt问题：

1. 理解最大能量和迟早门两种符号定时算法的工作原理。

答：最大能量法：先假设一个 τ ，求 $J(\tau)$ 能量函数的最大值的时候的解，此时即是定时的最佳时刻。

迟早门法：将码元分成前后两半，两者比较能量大小。若能量相等，则代表已经同步；若能量不相等，则将参考码元的起始时间往能量大的一边移动。

2. 观察符号定时之后的星座图，并对观察到的现象做出合理解释。

答：对比定时前后的星座图，可以发现：定时后（最大能量法和迟早门法）的星座图的点更为集中。因为这两种方法可以在存在码间串扰的信道中找到一个最佳的采样点，所以可以得到一个更准确的码元序列。

3. 分析不同降采样系数下定时算法的性能。

答：降采样系数增大，对最大能量法来说，每一个点进行平均求最大能量的点数增大，定时算法得到的结果会更加准确；对迟早门法，虽然算法一次只比较一个码元长度的迟早门能量来进行调整，但如果采样点增多，序列增长，同样更有利于迟早门算法得到更准确的结果。综上，降采样系数的增大会提高定时算法的性能。

课后习题：

1. 在式

$$z(t) = \alpha e^{j\phi} x(t - \tau_d) + v(t)$$

中，如果不存在噪声，则 α 和 ϕ 对最大输出能量无影响，请证明。

答：在使用最大能量法的时候需要计算功率，因此在对信号进行取模值平方的过程中 $e^{j\phi}$ 被消除了，因此不构成影响； α 对于所有采样点都是同样的常数增益，因此也没有区别，所以在没有噪声的情况下这两个参数对最大能量法没有影响。

2. 一个序列的采样率为 $1/T_z$ ，对其进行下采样，下采样系数为 M ，所得信号的采样周期是多少？

答：采样率定义了每秒从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数。原序列采样率为 $1/T_z$ ，则经过下采样后采样率变为原采样率的 $1/M$ 。采样周期为采样率倒数，因此所得信号的周期为 MT_z 。

3. 分析最大能量法，迟早门法和Gardner算法的优缺点。

答：最大能量法：基于多个码元的统计平均算出最佳采样点，性能较好，但是由于要多个码元统计平均，所以需要把多个码元接下来后再进行操作，时延较大。

迟早门法：针对一个参考码元做定位，在实际的操作中需要在数据序列前加用于定位的码元，在针对单个码元的时候能够检测出最佳采样点，性能相对最大能量法要稍差，但是由于只用当前码元，所以不需要把多个数据都接下来之后再处理，实时性比较强。

Gardner法：只需要3个采样点进行插值计算，因此对接收端的采样率要求降低了很多，通过插值计算与反馈实时调整采样脉冲的相位从而找到最佳采样点，但是实现难度大，算法较复杂。

4. 分析Gardner算法中NCO的作用。

答：NCO可以使得数字处理延续到正交调制与解调之前，使得两路型信号具有高精度的正交误差。

5. 思考为什么接收机在接收过程中先过采样再降采样。

答：为了匹配滤波与码元同步。接收机在一个码元周期内进行多次采样即过采样能够恢复基带波形，对此基带波形再进行匹配滤波能改善抽样时刻的信噪比，再对一个码元内的多个数据进行码元同步，选出其中能量最大的地方作为最佳采样点，因此过采样因子越大，采到的数据越多，就越能够找到最佳采样点，因此这就是为什么过采样因子太小了码元同步不能工作的原因。

六、心得体会

本次实验进行的是数字通信系统中窄带信道中的码元定时恢复实验和无线信道原理的讲座。

讲座中，我们回顾了上学期学习的《信号与系统》中的无线多径信道部分内容，并将这学期正在学习的《无线通信技术》课程中的相干带宽、相干时间及信道衰落等知识联系了起来。在课堂上将之前学过的知识串联起来，并了解其如何应用于实践，这帮助我们构建了知识体系，并为如何学习接下来的课程提供了新的思路。

码元定时恢复实验中，我们采用了两种方法：最大能量法和迟早门法。在课前预习以及听老师讲解原理的时候，我们都觉得两种方法十分直观，但到了将其实现在Labview软件中时，仍然出现了不少问题，例如参数设定不合理，无法接收到正确的星座图等。为了将这些问题解决，我们请教了周边同学和老师，在解决问题的过程中，我们进一步提高了对实验原理的理解，也帮助其他同学解决了他们的问题。

本次实验让我们再次意识到：光理解原理还远远不够，必须要与实践相结合。通过本次实验，我们对Labview的使用更加熟练，分析问题也不再是毫无头绪了，相信接下来的实验我们会越做越顺利！