

通信原理第三次实验报告

实验小组成员：汪奕晖（19302058），马知行（19302045）第43组 10

实验分工：共同完成

实验日期：2022年3月4日

班级：2019级信息工程

第4章 通信性信道的建模与仿真

第5章 BPSK/QPSK调制、解调实验

一、实验目的

1. 实现BPSK/QPSK的数字调制解调算法。
2. 设计高斯信道仿真模块，依据给定的噪声功率输出高斯复噪声。
3. 画出BPSK/QPSK的误码率曲线，比较两者的异同。
4. 观察数字调制在AWGN信道下的星座图。
5. 连接USRP硬件，观察星座图的变化。

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

1. 加性高斯白噪声信道

加性高斯噪声对无线信道而言是一种加性干扰。从统计特性上来看，加性高斯白噪声是满足噪声的概率密度函数分布为高斯分布的噪声。即对于高斯实噪声信号 $n(t)$ ，在某一时刻 t_0 ，信号幅值的概率密度 $f(n(t_0))$ 分布满足：

$$f(n(t_0)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(n(t_0) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

考虑以采样率 f_s 采样上述高斯白噪声信号，得到 N 点噪声序列 $s[n]$ ，则该噪声序列的平均功率 P_s 为：

$$P_s = E|s[n]|^2 = \sigma^2$$

通过上式可知，在给出高斯白噪声功率 P_s 情况下，可求出所需生成高斯随机数的方差，这些生成的随机数组成一个序列，即为仿真得到的随机高斯白噪声信号。此外，对于在复基带仿真高斯白噪声信道的情况，可以通过产生两路互不相关的方差为 $\sigma^2/2$ 的高斯随机数序列分别作为复高斯白噪声信号的实部和虚部，来进行复基带域的仿真。

2. 相移键控调制 (PSK)

相移键控调制 (PSK) 的基本原理是将数字信息调制在载波的相位中，而保持载波的幅度和频率不变。对于M进制的PSK调制系统，载波可能的相位状态有M种，码元波形可表示为：

$$s_k(t) = A \cos(\omega_c t + \theta_k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, M$$

一般BPSK选择 $0, \pi/2$ 作为调制相位，而QPSK选择 $0, \pi/2, \pi, -\pi/2$ 作为调制相位。

3. 星座图映射

将数字信息调制在载波后的载波信号的幅度和相位取出作为矢量映射在复平面上，将得到一系列映射在复平面上的点集，此为星座图概念。

假设数字调制源生成的比特序列为 $\{b[n]\}$ ，比特序列经符号映射模块产生符号序列 $\{s[n]\}$ ，每个 $s[n]$ 值都来自于称为星座的有限符号集，记作：

$$C = \{s_0, \dots, s_{M-2}, s_{M-1}\}$$

其中M为星座中的符号数目，常取 $M=2^b$ ，b为每个符号的比特数。

在BPSK中， $C=\{+1, -1\}$ ；在QPSK中， $C=\{1+j, -1+j, -1-j, 1-j\}$ ，为了便于实现和分析，通常将星座归一化具有单位能量，即满足：

$$\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |s_m|^2 = 1$$

4. 最大似然判决法

假设发射信号仅受到了高斯白噪声的影响，可将信道建模为AWGN信道，可表示为： $z(t) = x(t) + v(t)$ ，其中 $x(t)$ 是复基带信号； $v(t)$ 是高斯白噪声信号； $z(t)$ 是接收信号。

接收端采样后，接收信号 $y[n]$ 的模型可表示为： $y[n] = \sqrt{E_s} s[n] + v[n]$ ，其中 $v[n]$ 为独立等同分布的复高斯伪随机序列。

本实验中，采用最大似然准则（ML）进行判决：

$$\hat{s}[n] = \arg \max_{\hat{s}[n] \in C} f_{y|s}(y[n]|s[n] = \hat{s}[n])$$

其中 $f_{y|s}(y[n]|s[n])$ 是给定发送序列 $s[n]$ 的情况下，接收序列 $y[n]$ 的条件分布，即似然函数。对于加性高斯白噪声，上式可简化为：

$$\hat{s}[n] = \arg \min_{s \in C} \ln(y[n]|s[n] = s) = \arg \min_{s \in C} |y[n] - \sqrt{E_x} s|^2$$

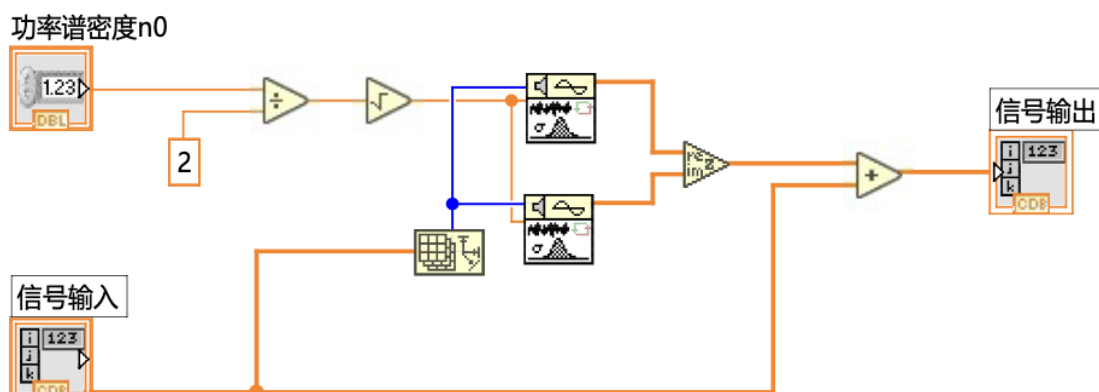
对于给定的一个观测值 $y[n]$ ，根据最大似然判决法则得到的判决符号 $\hat{s}[n]$ （带有缩放因子 $\sqrt{E_x}$ ），实际上是星座图中与接收信号 $y[n]$ 欧几里得距离最近的发送符号 C ，该算法也可利用星座图的结构和对称性进行简化。

四、实验内容

1. 设计高斯信道仿真模块。

程序框图：

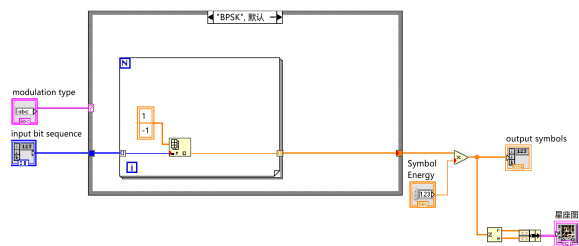
将 $\sqrt{n_0/2}$ 作为高斯分布的标准差输入高斯分布控件得到高斯白噪声，由于实部和虚部为不相关的两个白噪声信号，故分别使用两个控件进行形成，最后与输入信号相加得到所需信号。



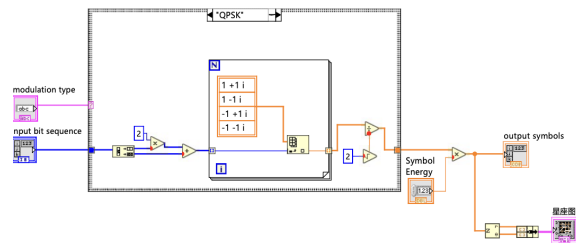
2. 设计BPSK/QPSK调制模块。

程序框图：

对于BPSK信号，则将随机生成的单极性信号转变成双极型信号即可。而对于QPSK信号，首先进行串转并，将信号分为两个等长的组，然后根据两个组不同的组合将对应的复值（00对应 $-1-i$ ，01对应 $-1+i$ ，11对应 $1+i$ ，10对应 $1-i$ ）作为数据，最后将能量归一化即可输出。



BPSK



QPSK

3. 设计BPSK/QPSK解调模块。

这里采用最大似然比进行判决,

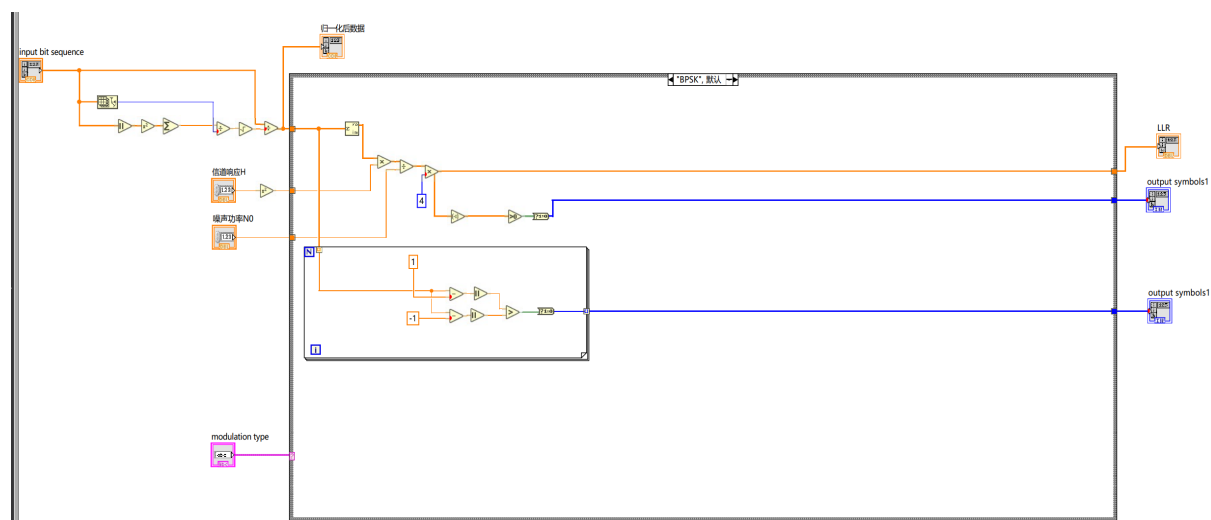
对于BPSK有:

$$LLR(b_{in}) = \frac{4|H|^2 y}{\sigma^2}$$

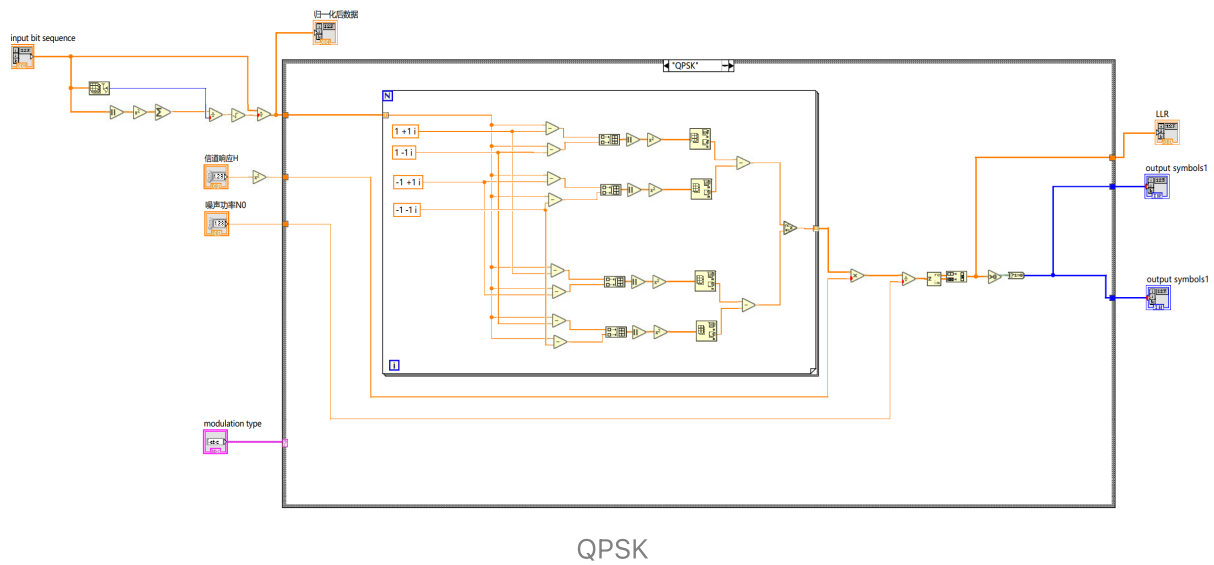
对于QPSK有:

$$LLR(b_{in}) = \frac{|H|^2}{\sigma^2} (\min(|y - a_i|^2) - \min(|y - a_0|^2))$$

程序框图:



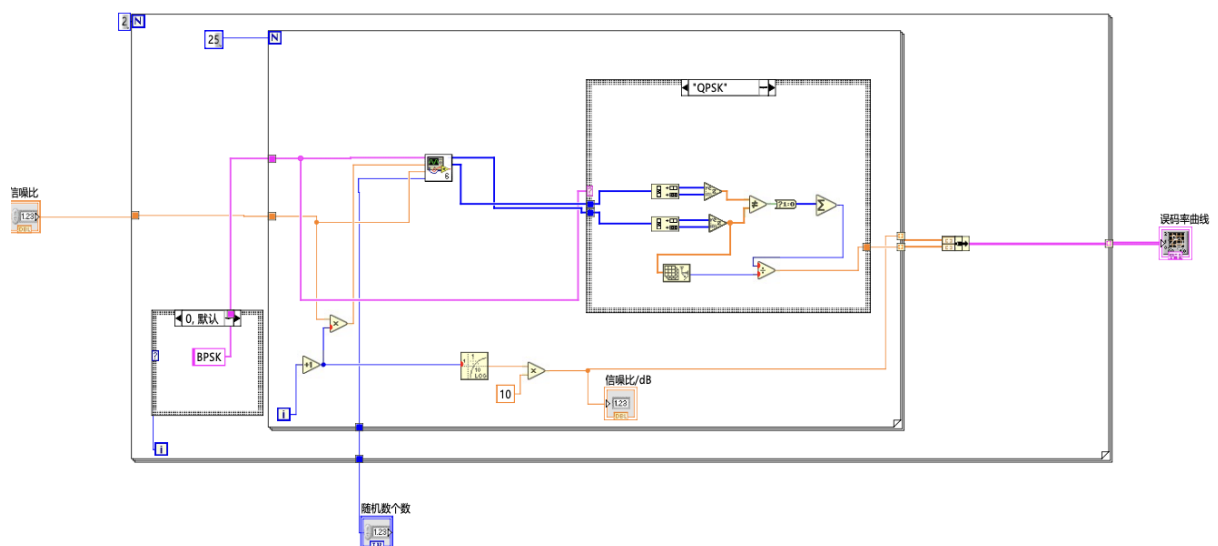
BPSK



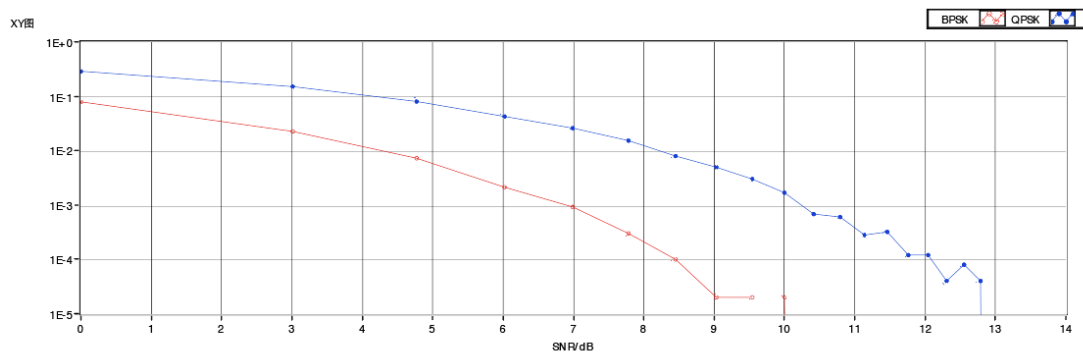
3. 将整个模块封装为一个输入信噪比，输出为误码率的vi，画出并比较BPSK/QPSK的误码率曲线。

程序框图：对于BPSK，这里直接对原信号和接收信号进行逐比特比较，将不相同的比特数目记录下来，与数据比特总长相除便可得到误码率。

对于QPSK，这里采用逐码元判别的方法，将不相同的码元数目记录下来，与数据码元总长相除便可得到误码率。



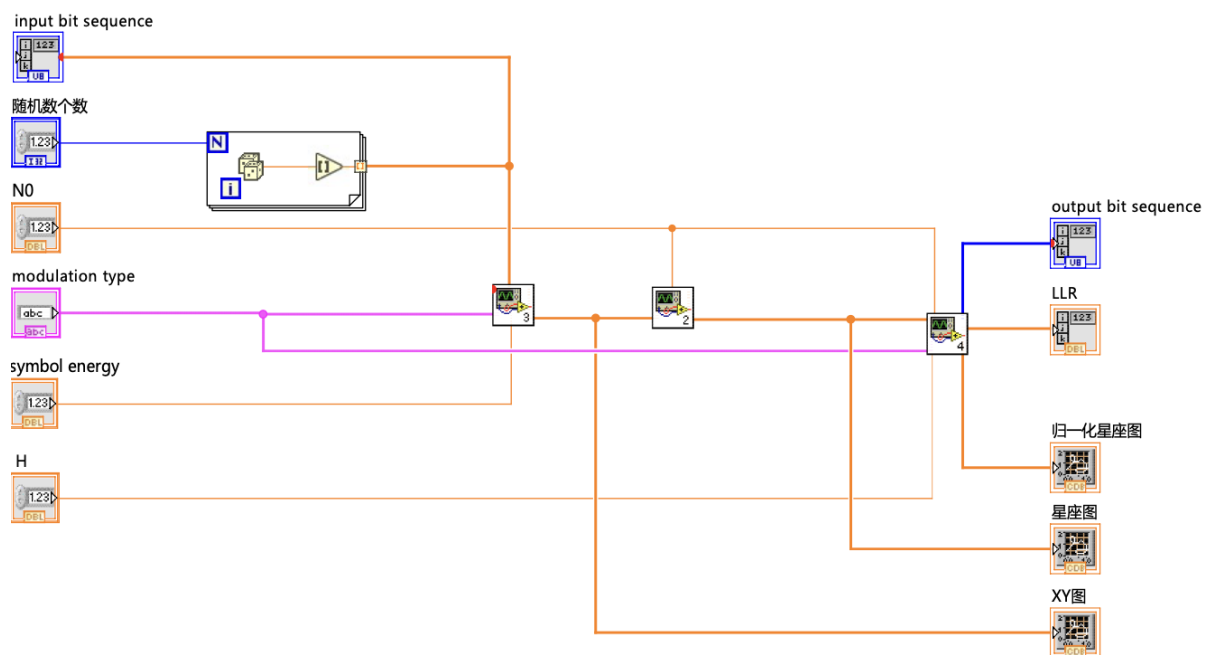
之后做一个25次的循环，每次循环改变信噪比，即可输出误码率曲线
误码率曲线



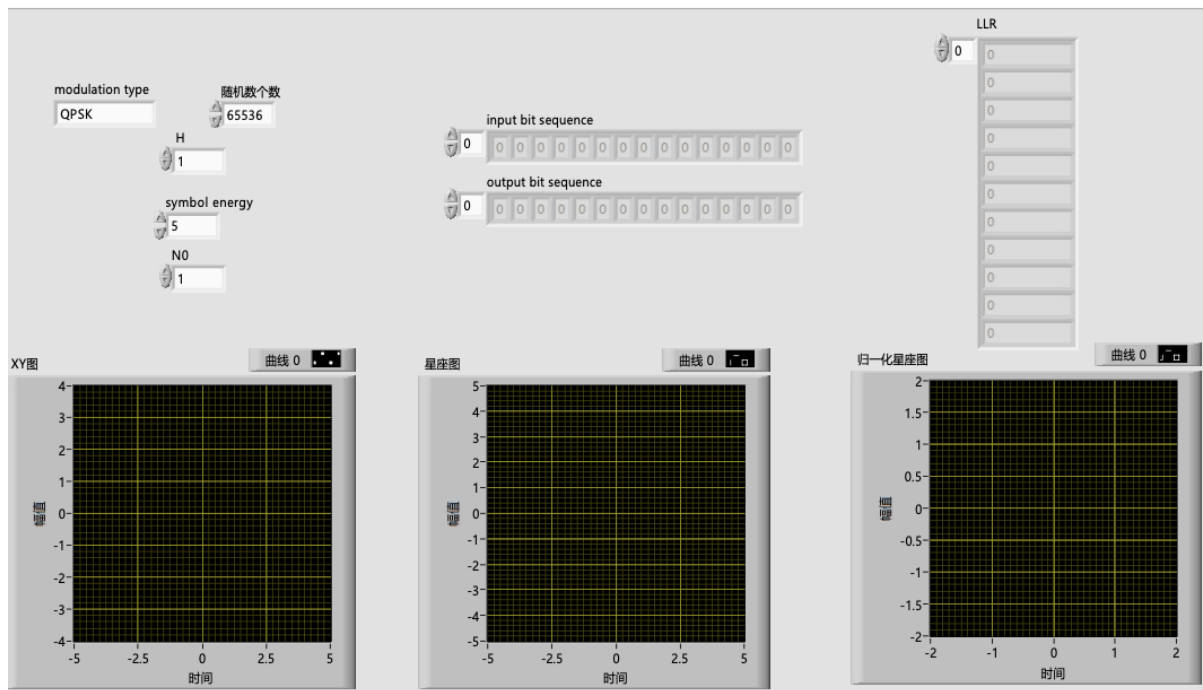
可以发现BPSK的抗噪声性能比QPSK好

5. 观察数字调制在AWGN信道下的星座图。

QPSK/BPSK调制解调程序框图

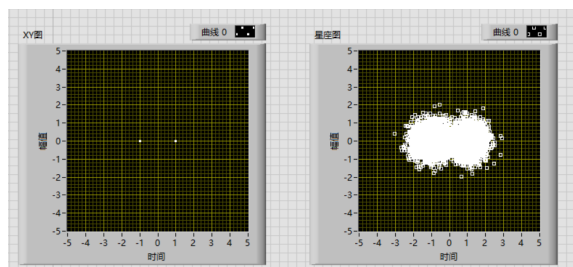


前面板：

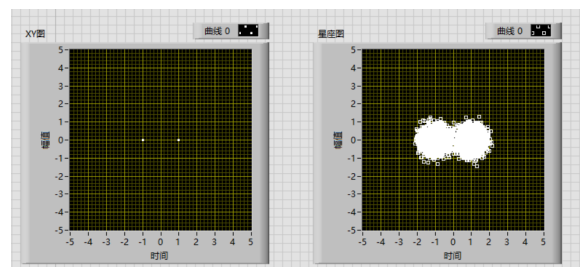


BPSK星座图：

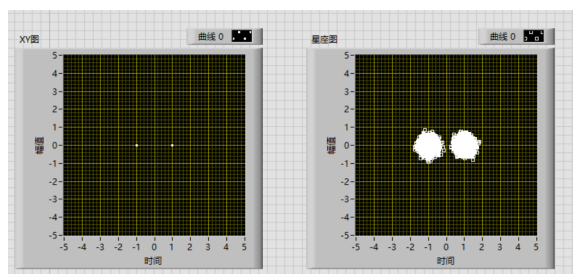
随机数个数设置为8192，symbol energy 设置为1，H设置为1，改变N0，从而改变信噪比



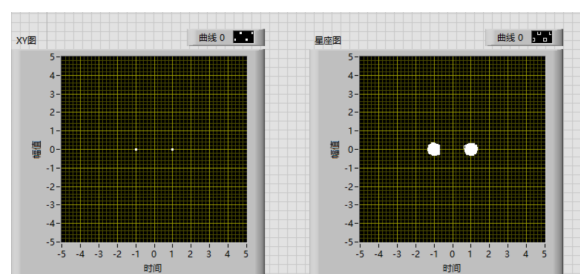
3dB



6dB



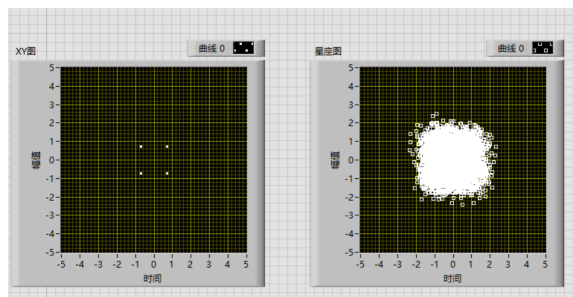
10dB



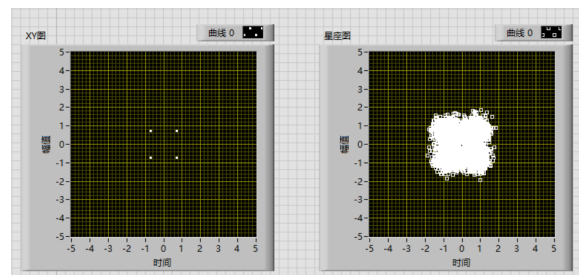
20dB

QPSK星座图：

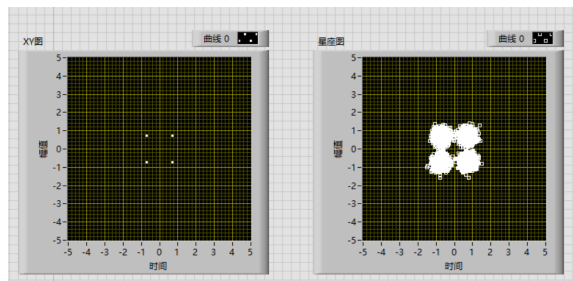
随机数个数设置为8192，symbol energy 设置为1，H设置为1，改变N0，从而改变信噪比



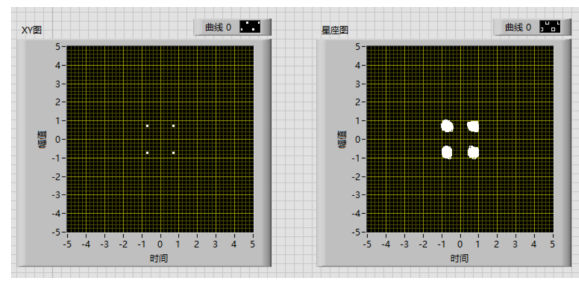
3dB



6dB



10dB



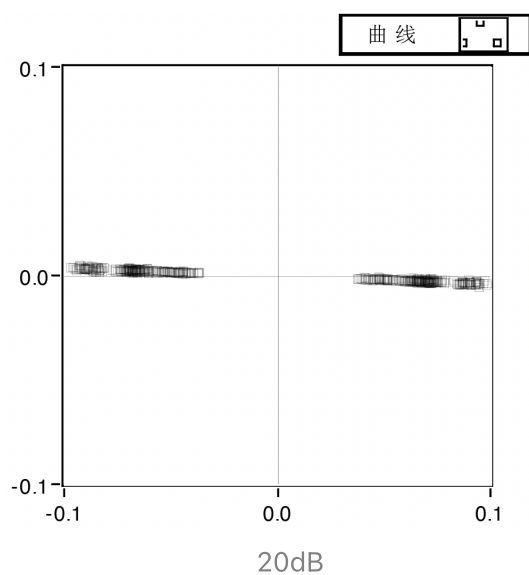
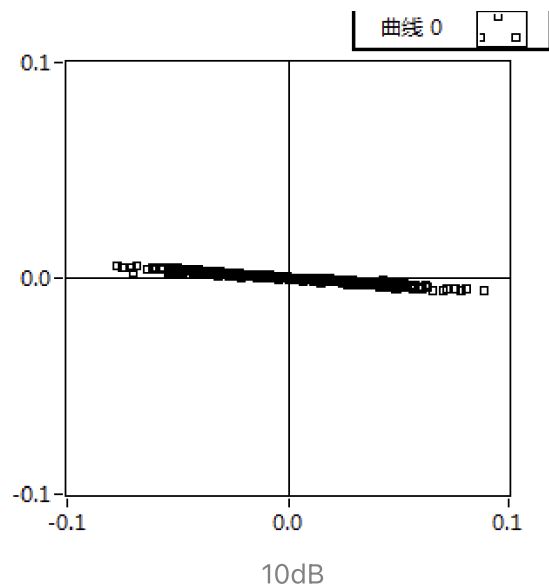
20dB

可以发现，提高噪声功率，信噪比减小，误码率会提高。从星座图可以很明显地看出小信噪比时，不同符号之间产生了重叠，接收机难以分辨信号的准确信息。直观来说，误码率提高了。而从数值上看，随着噪声功率的提高，误码率也在提高。

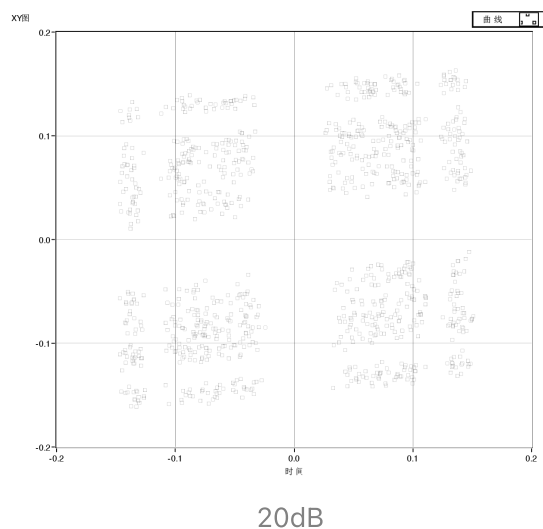
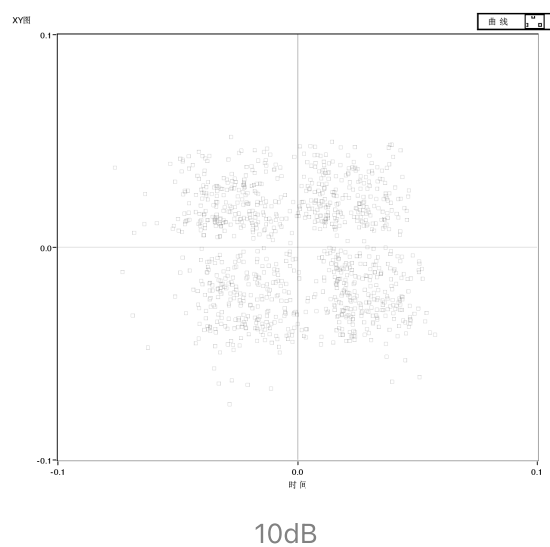
6. 连接USRP硬件，观察星座图的变化。

程序框图：

USRP发送机：



QPSK接收星座图

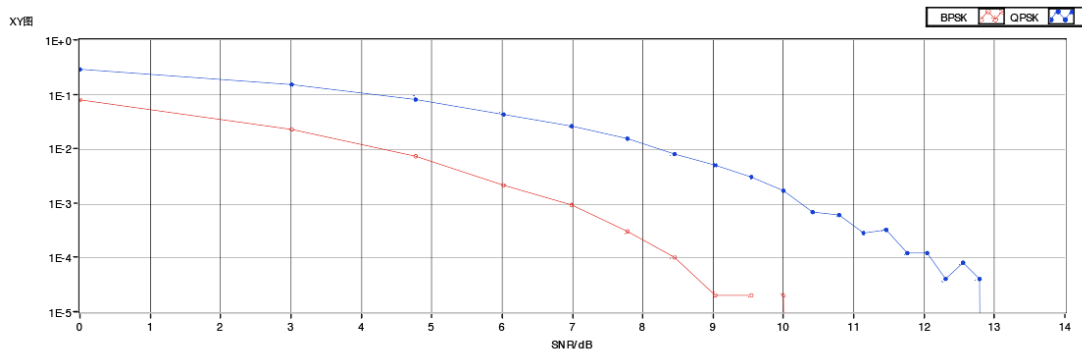


可以得到与仿真类似的结果，但数据点更分散，重叠情况更明显，说明实际中噪声情况更复杂。同时在实际实验中会发现，在调整USRP设备天线取向时，星座图中的点也会跟着旋转。

五、回答问题

验收要点：

1. 误码率曲线的观察和比较



由理论课学习的知识，可知

BPSK的误码率计算公式为： $\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{r})$

QPSK的误码率计算公式为： $\frac{3}{4}\text{erfc}(\sqrt{\frac{r}{5}})$

可以看出在相同的信噪比条件下，BPSK的误码率比QPSK要低。

2. 不同信噪比下星座图的观察。

答：信噪比改变对误码率的影响。提高噪声功率，信噪比减小，误码率会提高。从星座图可以很明显地看出，不同符号之间产生了重叠，接收机难以分辨信号的准确信息。直观来说，误码率提高了。而从数值上看，随着噪声功率的提高，误码率也在提高。

思考及回答问题：

1. 数字解调时为什么要进行符号能量归一化，对解调有什么影响？

答：是为了保证每个符号的平均能量为1，使接收点分布于归一化星座图的星座点附近，以保证解调的正确性，避免引入额外的误码。对于BPSK与QPSK的解调，符号能量归一化与否影响并不大，因为此时不管接收点的幅度多大，与它距离最小的星座点是不变的。但对于高阶QAM的解调，符号能量是否归一化的影响就很大了，因为此时随着接收点的幅度变化，距离它最近的星座点可能改变。所以此时解调出来的信号误码率可能会相应地变大。

2. 如何计算接收信号的噪声功率？

答：以BPSK为例，取某个星座点周围的所有接收点作为一个样本集合，由于接收点都是随机变量，所以样本均值和样本方差也是随机变量，分析知，该样本方差是总体方差的一个无偏估计且它是渐进有效的，而总体方差即为需要计算的噪声功率，从而可以利用样本方差来估计接收信号的噪声功率。但是此方法不适用于噪声功率比较大的情况，因为噪声越大时，噪声功率的估计值与真值的偏差会越大。

3. 此次试验去掉了成型滤波/匹配滤波，对实际传输有什么影响？过了USRP之后呢？

答：成型滤波器的作用是控制发送信号的带宽，抑制高次谐波并减少码间串扰。匹配滤波器的作用是使得抽样时刻上输出信噪比最大的线性滤波器。

如果去掉成型滤波，则发送信号即未经成型滤波的基带信号，相当于是一个冲激串序列，频域带宽无限，其经过带限信道后带宽将会削减，从而可能会导致信号失真、码间干扰和谐波的产生。

如果去掉匹配滤波，因为在AWGN信道环境下，系统的误码率与判决时刻的信噪比有关，判决时刻信噪比越大，则误码率越低。所以判决时刻信噪比将恶化，从而误码率将会升高。

补充问题：

1. 需要使用什么手段，才能获得比特软判决的输出的软信息带来的好处？

在实现重复编码的系统中，通过概率信息即对于接收到的码元的每位比特求其对数似然比，依据每位比特的对数自然比进行判决信道解码，会优于直接使用判决得到的比特序列进行解码的方案。

2. 信噪比有哪几种定义？不同定义下BPSK和QPSK的SNR-BER曲线呈现出怎样的不同？

一般常用的信噪比定义为平均功率信噪比，瞬时功率信噪比和偏移信噪比

平均功率信噪比：

$$SNR = 10 \log \frac{\frac{1}{T} \int_T s^2(t) dt}{\langle v^2(t) \rangle}$$

瞬时功率信噪比：

$$SNR = 10 \log \frac{s^2(t)}{\langle v^2(t) \rangle}$$

偏移信噪比：

$$SNR = 10 \log \left[\frac{\langle x(t) \rangle - \langle v(t) \rangle}{(\sigma_x - \sigma_v)/2} \right]$$

其中 $\langle x(t) \rangle, \langle v(t) \rangle$ 表示信号的均值以及噪声的均值。

由计算式可以发现对于瞬时功率信噪比，其计算的仅仅是某一时刻的信号功率，会产生一些偏差，可能会使SNR-BER曲线变得陡峭。而对于偏移信噪比，其依据信号的统计特性进行计算，其值小于按照平均功率和瞬时功率的信噪比，可能会使SNR-BER曲线在SNR方向上产生压缩。（暂时没有成功画出图像）

3. 对于QPSK/QAM调制，逐比特判决和逐码元符号判决有什么不同？

对于QPSK/QAM调制，每个码元含有多个比特，逐比特判决是对一个码元符号中的每一位比特单独进行判决后，根据判决结果再对码元正体结果进行判决，而逐码元符号判决则是直接对整个码元符号进行判决。

课后习题：

1. 从4-QAM星座图(如图1所示)，给出该调制符号的能量。

答：从图中可以看出星座点到原点的距离为1，即该调制符号的能量为1。同时根据公式可计算出

$$\frac{1}{4} \sum_{m=0}^3 |s_i|^2 = \frac{4}{4} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] = 1$$

2. 考虑如何计算解调4-QAM调制信号的软信息。

答：可以先计算QAM的对数似然比：

$$LLR(b_{in}) = \ln \frac{\sum_{a=1} P(y_i|a)}{\sum_{a=0} P(y_i|a)}$$

利用近似式：

$$\ln(\sum \exp x_i) = \max(x_i)$$

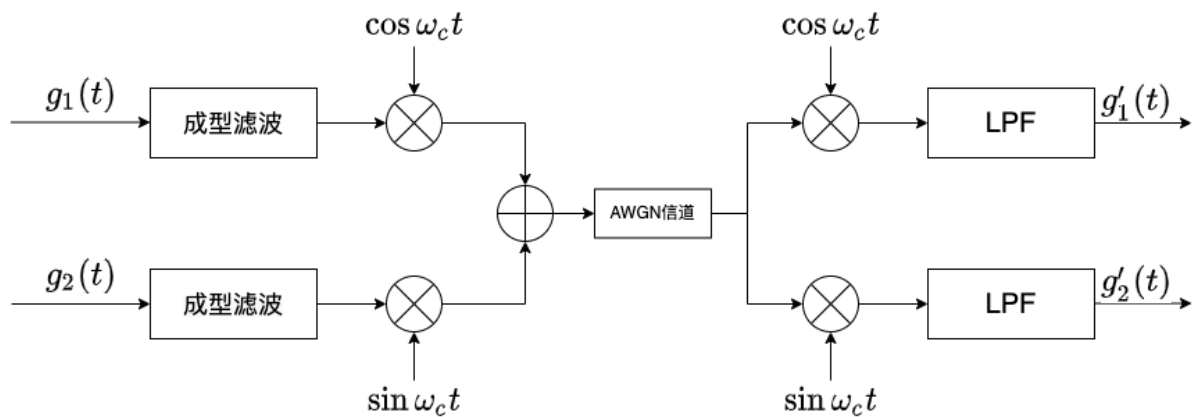
得到：

$$LLR(b_{in}) = \frac{|H|^2}{\sigma^2} (\min(|y - a_i|^2) - \min(|y - a_0|^2))$$

然后比较LLR与0的大小即可进行比特判别。

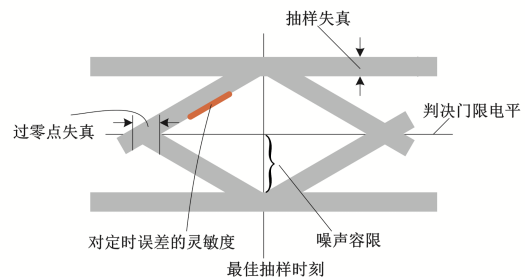
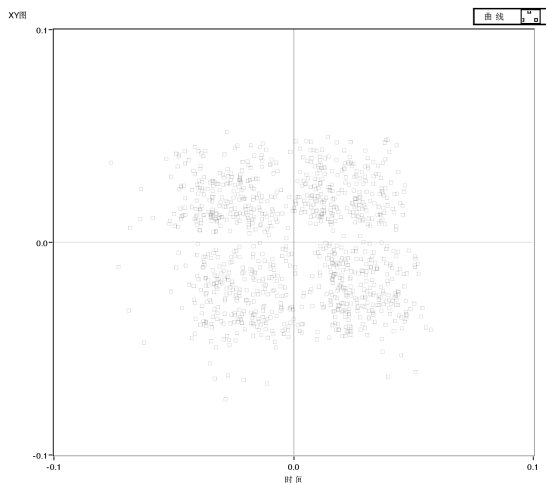
3. 分析除比较欧几里得距离外，其余的QAM解调方式。

答：QAM信号可以用正交相干解调方法进行解调，通过解调器将QAM信号进行正交相干解调后，用低通滤波器LPF滤除乘法器产生的高频分量，输出抽样判决后可恢复出的两路独立电平信号，最后将多电平码元与二进制码元间的关系进行转换，将电平信号转换为二进制信号，经并/串变换后恢复出原二进制基带信号。



4. 分析噪声对星座图和眼图的影响。

答：由于实验中是白噪声干扰，噪声随机，星座图上显示的落点会围绕理想值成云状分布，即围绕理想值有很多分散的点，由实验结果可知，信噪比越小，散点越分散。



而对于眼图来说，存在噪声时，阴影区的垂直高度畸变会变大，信号曲线变粗，“眼睛”变小。

5. 思考当信道存在衰减时如何进行解调。

信道衰落可以分为小尺度衰落和大尺度衰落以及平坦衰落和频率选择性衰落。

由于Turbo乘积码具有优异的性能、较低的编译码复杂度以及短的译码延时，而且码字内部具有自交织结构，可以有效对抗衰落，因此可将其应用于具有衰落信道的无线通信系统，故可以在调制时进行编码，解调时加入解码，从而减少信道衰减的影响。

或者可以增加采样率，在解调时使符号能量归一化后，信道衰衰减带来的信号幅值改变就被消除了，便可进行正常的解调。

六、心得体会：

本次实验为实现BPSK和QPSK的调制、解调模块，同时编写AWGN信道模块。

BPSK、QPSK的数字调制解调实验原理较之前的模拟调制实验较为直观，但是在进行程序编写时，我们仍遇到了一些问题。BPSK调制投影到两点，所需要产生的随机序列可以用随机数直接产生，但是QPSK由于需要投影到四个点，不能利用直接产生的随机序列，而需要进行序列重新组合运算，而形成符合有四个不同取值的序列，如何生成此序列我们思考了很久。

并且由于前几次实验我们接触到的都是模拟调制，通信原理理论课又是上学期开展的，我们一开始进行数字调制的时候有些不熟悉，甚至已经记不清符号代表的是什么意义，如何计算符号能量，如何定义信噪比等等。最终在耐心看完实验指导书和通信原理课本，并询问请教了同学之后才重拾这些知识。

从怎样产生符合调制需求的随机数序列，如何将随机序列一一对应投影到复平面上，怎样进行符号解调并计算误码率.....本次实验我们经过了长时间的回顾、理解和思考，同时也让我们对数字通信系统的认知也加深了许多。在实现BPSK和QPSK的调制、解调模块以及编写AWGN信道模块过程中，我们对LabVIEW软件的使用方法有了更加深刻的理解，能更加熟练掌握运用软件工具帮助我们直观地体会通信系统的魅力。相信在今后的实验中，我们会将前几次的实验经验加以总结和运用，更顺利地完成任务的编写，学习更多的知识！