



基带传输系统实验

Simulink 仿真实验

在数字通信中，有一种不经载波调制而直接传输数字基带信号的系统，称为数字基带系统。日常生活中常见的以太网（网线中的信号）、USB 信号、HDMI 信号等等都是以数字基带的形式传输，在这些系统中，都不可避免的涉及到成形滤波技术和位同步技术，在本实验中，我们就将利用 Simulink 建立一个数字基带传输的仿真模型。

大连理工大学 电子信息与电气工程学部

信息技术实验中心



实验背景知识

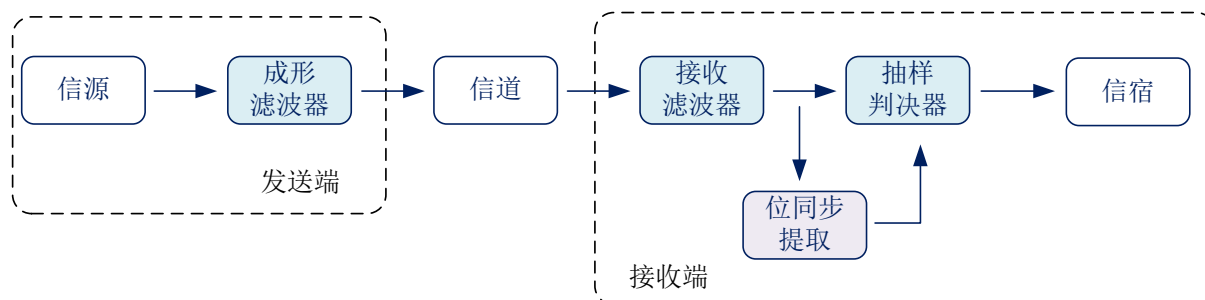
数字基带的定义

数字基带信号：未经调制的数字信号所占据的频谱是从零频或很低频率开始。

数字基带系统：不经载波调制而直接传输数字基带信号的系统。

数字基带传输系统

一个典型的数字基带传输系统由信源、成形滤波器、信道、接收滤波器、位同步提取、抽样判决器和信宿构成。本实验的重点放在成形滤波器和位同步提取上，因此在进行实验之前，希望同学们能够复习一下通信原理课程中的相关知识。



下面是本实验涉及到的相关知识点

1. 数字基带传输系统——数字基带信号及其频谱特性
2. 数字基带传输系统——无码间串扰的基带传输特性
3. 数字基带传输系统——眼图
4. 数字信号的最佳接收——最佳基带传输系统
5. 同步原理——码元同步
6. 网上查找 Gardner 位同步方法的理论知识



实验内容

1. 测量数字逻辑信号的频谱

在这里，我们通过测量一个双极性的数字逻辑信号的频谱开始，了解成形滤波器的第一个功能。我们需要在 Simulink 里新建一个双极性随机信源的仿真模型，具体内容如图 1 所示。图 1 中单位延迟模块左侧的 4 个模块构成了一个双极性随机信源，产生比特率为 19.2Kbps 的二极性数字脉冲信号。单位延迟模块在这里完成了一个过采样的功能，它的设置如图 1-b 所示，从它的采样时间可以看出，它对数字信源进行了 6 倍速采样率的采样，这样做的目的是为了在后序的数字滤波可以顺利进行。

从图 1-c 中可以看到这个双极性随机信源只有两个值+1 和-1，而且分布是随机的。大多数数字通信系统中的信源都是这种性质的。

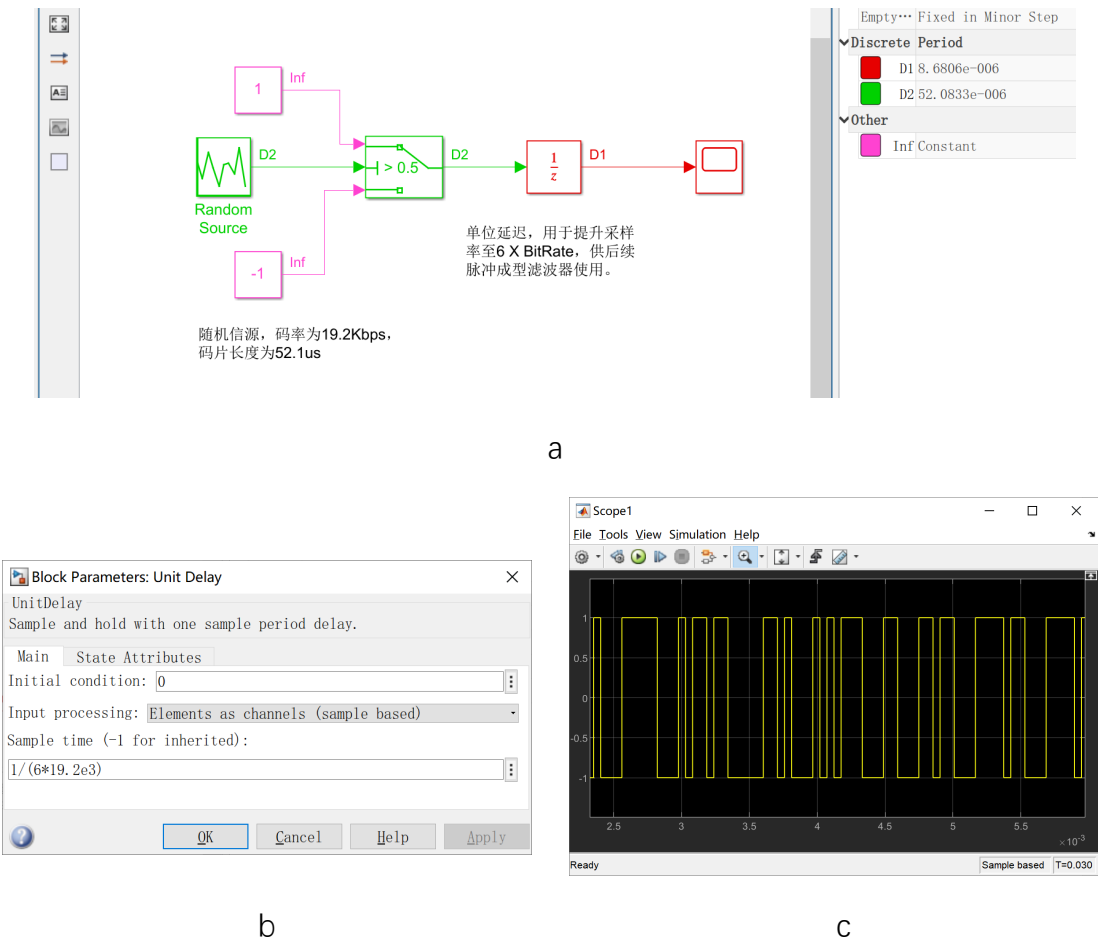


图 1



下面我们在这个仿真模型中加入一个频谱分析的模块，这个模块位于 DSP System Toolbox->Sink->Spectrum Analyzer。将这个模块的输入与图 1 (a) 中示波器的输入相连，之后使用这个打开这个模块，点击运行，就可以看到双极性随机信号的频谱分布了，如图 2 所示。

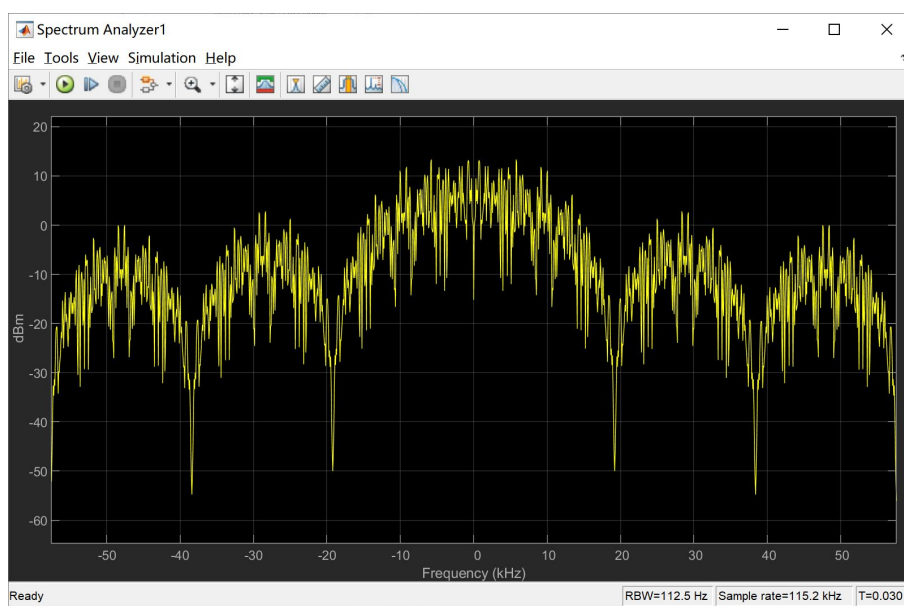


图 2

从图 2 中可见，双极性随机信号的频谱中，能量大部分集中在 0~19.2KHz 的带宽内，但 19.2KHz 以上频率范围内也有不少的旁瓣，旁瓣峰值与主瓣峰值大概相差 10dB。这个差值并不算大，在后续实验中，同学们会看到加入成形滤波器后基带信号的频谱，一般旁瓣和主瓣的峰值能相差 40~60dB。

2. 设计成形滤波器

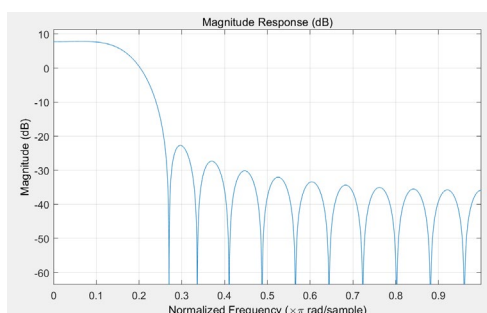
我们使用 MATLAB 中的 `rcosdesign` 函数来设计一个升余弦型的成形滤波器。该函数的具体使用方法可以查阅相关的联机文档。用于设计成形滤波器的代码如图 3 所示。

```
1 clear
2 Symbol_Rate = 19.2;
3 Sample_per_Symbol = 6;
4 Number_of_Symbol = 4;
5 alpha = 0.5;
6 Filter_sqrt = rcosdesign(alpha, Number_of_Symbol, Sample_per_Symbol, 'sqrt');
7 fvtool(Filter_sqrt, 'Analysis', 'impulse')
```

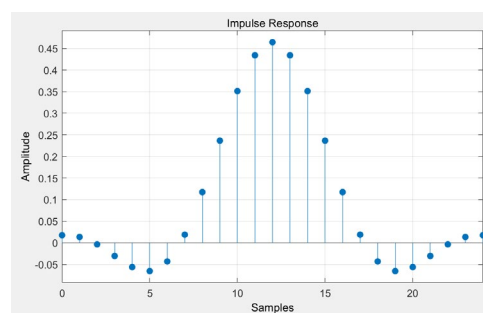
图 3



代码中第 2 行设置了信源的码率。第 3 行设置了过采样率，就是每个码元被采样成了几个点。第 4 行是时域响应的宽度，这里是 4 个码元，每个码元是 6 个点，总计 24 个点，这也是 FIR 滤波器的阶数。这里有一个要求：过采样率与码元数的乘积要是个偶数。第 5 行设置的滚降因子 $\alpha = 0.5$ 。第 6 行的代码是升余弦滤波器的设计函数的调用，*rcosdesign* 函数的前三个参数在前面已经有说明，第 4 个参数是决定这个升余弦滤波器是普通升余弦滤波器还是平方根升余弦滤波器。'sqrt' 这个字符串是设计平方根升余弦滤波器，'normal' 的话是设计普通升余弦滤波器。这个函数的返回值是一个 25 (24+1) 个元素构成的向量，也就是 FIR 滤波器的 25 个系数。第 7 行调用了滤波器分析函数，图 4 是 ftool 这个函数对滤波器的分析结果，图 4-a 是幅频响应，图 4-b 是单位冲击响应。从单位冲击响应可以看出，这是一个 sinc 函数。整个单位冲击响应是由 25 (4*6+1) 个点组成的。这是由前面设置的过采样率 (Sample_per_Symbol) 和码元数量 (Number_of_Symbol) 决定的。



a 幅频响应



b 单位脉冲响应

图 4

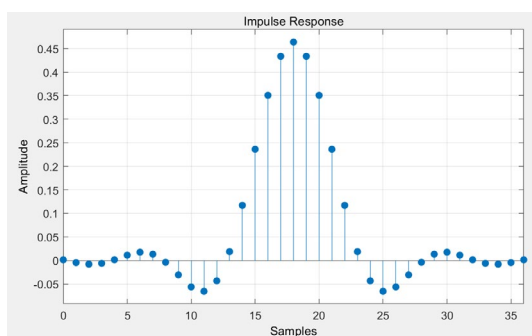
思考一下：普通升余弦滤波器与平方根升余弦滤波器有什么区别？图 5 是用同一组参数（见图 5-a）设计的两个成形滤波器的单位冲击响应（图 5-b 和图 5-c），一个是普通升余弦滤波器，另一个是平方根升余弦滤波器。请同学根据相关理论知识，判断出 b 和 c 两个图哪一个是平方根升余弦滤波器的单位冲击响应，为什么？

实验报告内容

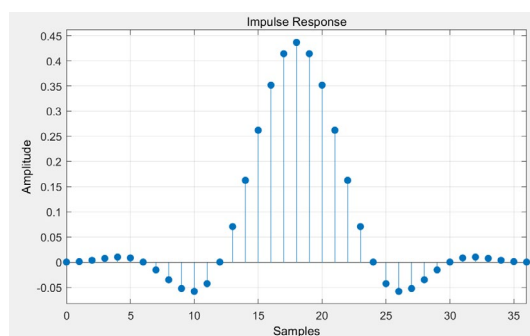
```
clear
Symbol_Rate = 19.2;
Sample_per_Symbol = 6;
Number_of_Symbol = 6;
alpha = 0.5;
Filter_sqrt = rcosdesign(alpha,Number_of_Symbol,Sample_per_Symbol,'sqrt');
fvtool(Filter_sqrt,'Analysis','impulse')

hold on
Filter_normal = rcosdesign(alpha,Number_of_Symbol,Sample_per_Symbol,'normal');
fvtool(Filter_normal,'Analysis','impulse')
```

a



b



c

图 5

3. 测量成形滤波器输出的基带信号频谱

在完成成形滤波器之后，我们把它加入到第 1 步设计的仿真模型中。首先需要在模型中加入一个 FIR 滤波器（DSP System Toolbox -> Filtering -> Filter Implementations -> Discrete FIR Filter）模块，按图 6 的方式与原有模块连接。

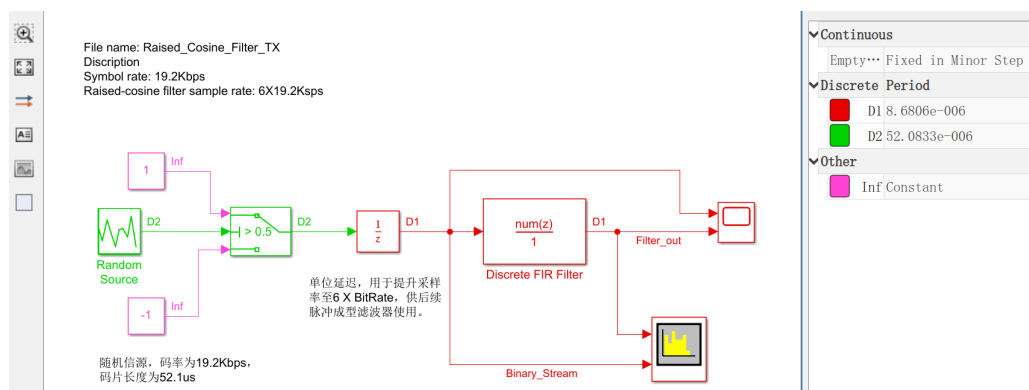


图 6

之后我们需要为这个 FIR 滤波器指定滤波器的系数。我们在第 2 步中调用 *rcosdesign* 函数得到了一个 FIR 滤波器系数的向量 *Filter_sqrt*，这个向量都被保存



在 MATLAB 的工程空间中，如图 7-a 所示。此时打开新加入的 FIR 滤波器模块的属性页，在 Coefficients (系数) 选项中，输入变量 **Filter_sqrt** 的名称，如图 7-b 所示，就把之前计算的 25 个系数赋给这个滤波器了。

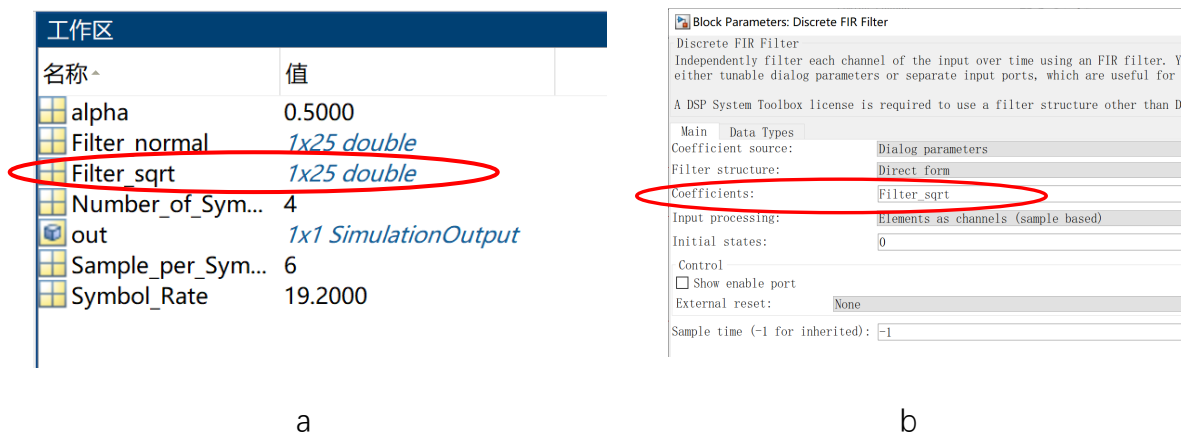


图 7

最后，打开频谱分析仪模块，运行仿真，可以看到双极性数字信号与成形滤波器输出的基带信号的频谱之间的区别，如图 8 所示。从频谱分析中可以看出，两个信号最大的不同在于 19.2KHz 以上频谱的强度，成形滤波器输出的基带信号的带外功率谱强度要远小于原始数字信号。

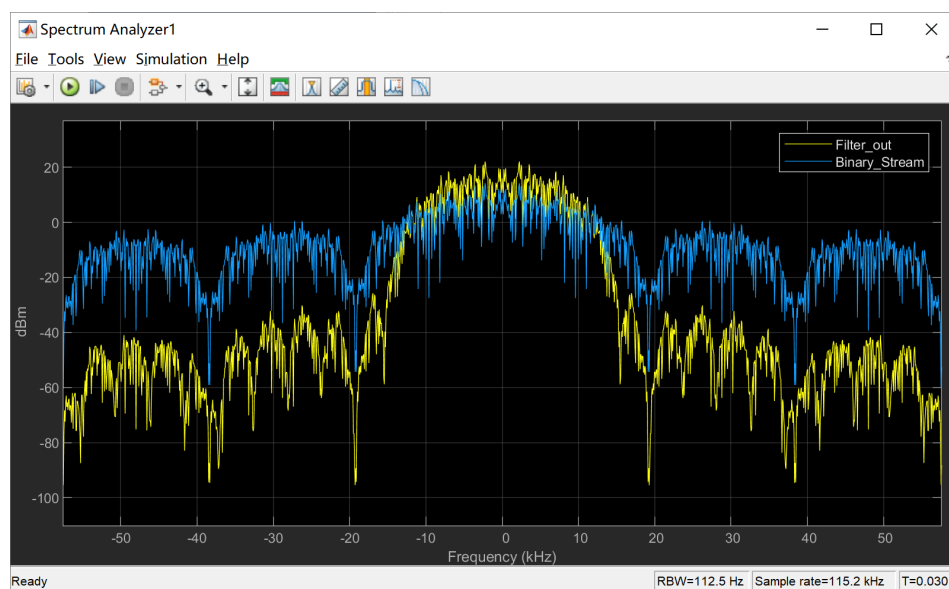


图 8

4. 观察滚降因子 α 对输出基带信号频谱的影响。

前面的实验中，我们使用了滚降因子 $\alpha = 0.5$ 来设计成形滤波器，并得到了之前的实验结果。那么下面需要同学们改变这个滚降因子的值，观察成形滤波器输出信



号的频谱有什么变化。

5. 绘制基带信号的眼图

眼图是通信中一个非常实用的工具，通过它可以直观的看出码间干扰。MATLAB/Simulink 中的通信工具箱中有一个眼图的模块，不过我们学校的 MATLAB 的 License 中没有给通信工具箱的使用许可。我们可以用 MATLAB 的代码写一个眼图的小程序，用来分析基带信号的质量。

要使用 MATLAB 代码的话，我们需要先把基带信号的数据导入 MATLAB 工作区。可以用 DSP System Toolbox -> Sinks -> To Workspace 模块将 Simulink 的仿真数据导入 MATLAB 的工作区中。之后就可以用 MATLAB 的脚本文件读取工作区中的数据来画眼图了。

眼图程序的设计思想就是将从 Simulink 中导出基带信号（一维向量）分成若干段，每段的长度是码元长度的整数倍。之后将这些段数据依次绘制在同一个图表中，就形成了眼图，如图 9 所示。

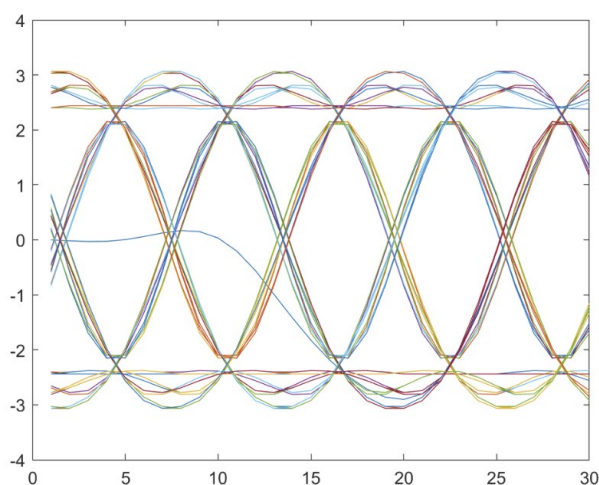


图 9

这项任务需要同学自己完成相关的 MATLAB 代码，在写实验报告的时候将代码和运行结果（眼图）附到实验报告中。并在图中指出理论上的最佳判决时刻。

6. 位同步提取功能实现

实验报告内容

我们把在接收端产生与接收码元的重复频率和相位一致的定时脉冲序列的过程称为码元同步或位同步。在对接收滤波器输出的基带信号进行抽样判决时，这个脉冲序列可以给出正确的判决时刻。位同步的方法有很多种，在本实验中我们使用



Gardner 位同步算法。

Gardner 算法是一种基于过零检测的定时误差检测环结构, 基主要应用于二进制的基带信号位时钟同步。该环路实现结构简单, 不需要预先知道载波相位。其基本结构如图 10 所示。

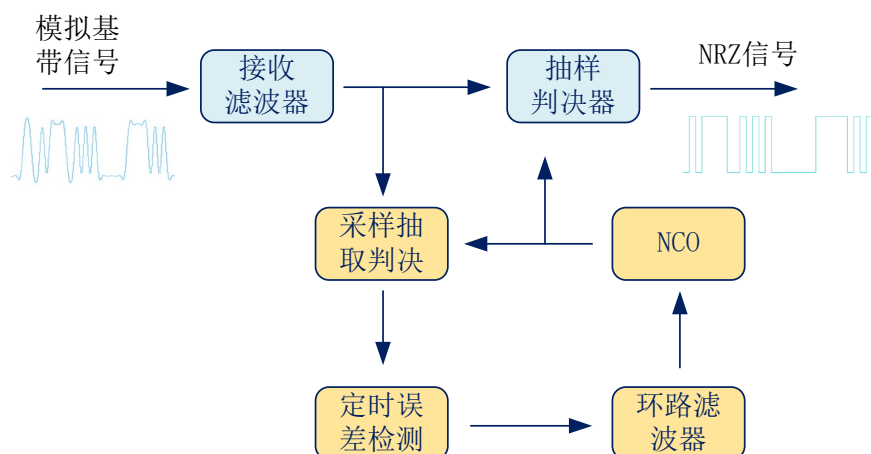


图 10

定时误差检测是通过计算相邻码元采样判决点以及过渡点的值来实现的, 如图 11 所示。两个判决点是 $y(r)$ 和 $y(r-1)$, 过渡点是 $y(r-1/2)$ 。

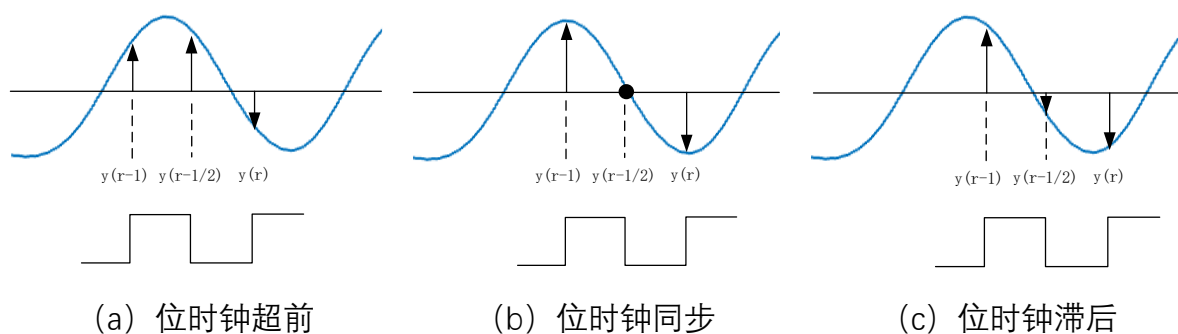


图 11

这里定义相位误差为

$$\text{error} = y(r-1/2) [y(r) - y(r-1)] \quad (1)$$

对于位时钟同步的情况, $y(r-1/2) = 0$, 误差计算结果为 0; 对于位时钟超前的情况, 误差计算结果为负; 对于位时钟滞后的情况, 误差计算结果为正。以上分析是对相邻码元符号产生跳变的情况而言的, 对于相邻两个码元相同的情况, 误差为 0, 此时不会对位时钟进行调整。

使用 Simulink 实现的时候, 可以使用采样保持模块 (DSP System Tollbox -> Signal



Operation -> Sample and hold) 来暂存某一采样时刻的信号值, 如图 12 所示是一个求相位误差的 Simulink 实现。图中左侧是基带信号输入端, 右侧是相位误差信号的输出端。

环路滤波器的设计可以参考实验一中的环路滤波器设计过程。之后自主完成后面的 Gardner 环的设计, 最终完成对成形滤波器输出信号的位同步。

实验报告内容

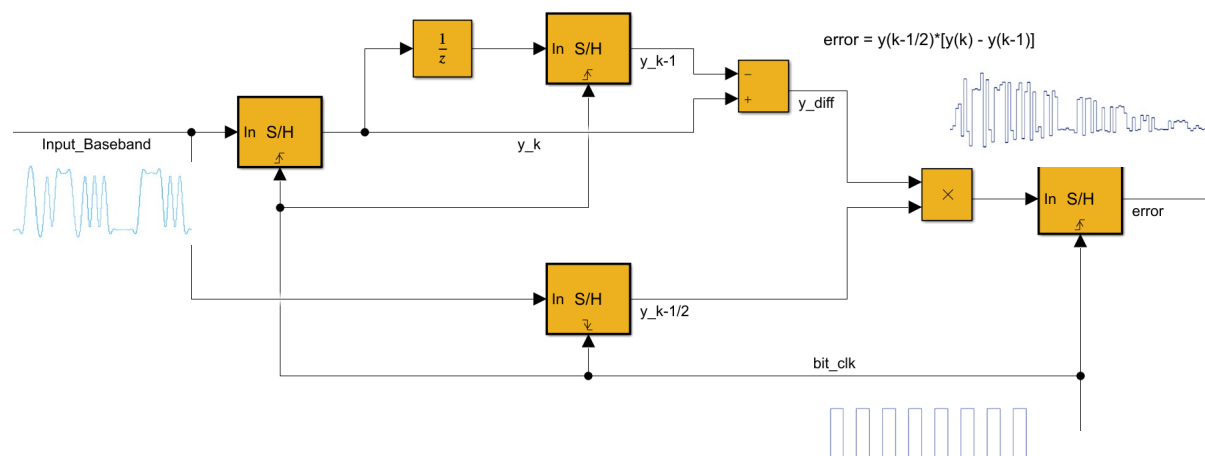


图 12

对于位同步实验, 最终要达到的要求是:

1. 位同步环的输入为成形滤波器的输出信号。
2. 位时钟应为 NRZ 信号, 可采用对 NCO 输出的正弦信号进行阈值化得到。
3. 位同步后, 位时钟的有效沿 (上升沿或下降沿) 应位于最佳判决时刻。