



中国石油大学 (华东)
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

实验七：数字通信综合实验

探究同一二进制数字调制系统
不同解调方式的抗噪声性能的差异

学生姓名：_____刘增运_____

学 号：_____1808030220_____

专业班级：_____通信 1802 班_____

指导教师：_____卢晓轩 蔡丽萍_____

目录

一、实验目的.....	1
二、实验原理.....	1
2.1 2FSK 调制与解调	1
2.2 PCM 编解码	3
2.3 最佳接收机.....	4
三、实验方案.....	5
3.1 系统设计.....	5
3.2 不同解调方式抗噪声性能的探究.....	11
3.3 不同信噪比条件下抗噪声性能的对比探究.....	11
3.4 同一系统三种解调方式恢复效果比较.....	12
四、实验现象与分析.....	13
4.1 不同解调方式抗噪声性能分析.....	13
4.2 不同信噪比条件下抗噪声性能分析.....	14
4.3 同一系统三种解调方式恢复效果比较分析.....	15
五、结论与体会.....	15
5.1 实验结论.....	15
5.2 实验心得体会.....	16
参考文献.....	18

一、实验目的

1. 自主设计实验方案，按照方案搭建二进制数字调制系统。
2. 对比最佳接收机和传统接收机的抗噪声性能。
3. 结合理论得出结论，完成探究过程。
4. 探究并总结系统中影响抗噪声性能的因素。
5. 拓展任务：两端加入一路或者两路模拟信号数字化传输功能。

二、实验原理

2.1 2FSK 调制与解调

二进制频移键控 (2FSK) 是通过对两个不同载波信号进行变换使其成为数字信号来完成信息传输的。在 2FSK 中，载波的频率随着二进制基带信号在 f_1 和 f_2 两个频率点之间变化，利用载波频率的变化来表征被传信息的状态的，被调载波的频率随二进制序列 0、1 状态而变化。其表达式为： $e_{2FSK}(t) = s_1(t)\cos\omega_1 t + s_2(t)\cos\omega_2 t$ ，2FSK 调制就是使用两个不同频率的载波信号来传输一个二进制序列。用二进制“0”对应载频 ω_1 ，“1”对应载频 ω_2 ，这个过程可以通过受矩形脉冲序列控制的开关电路，来对两个不同的独立频率源 f_1 、 f_2 进行选择性地导通。^[1]

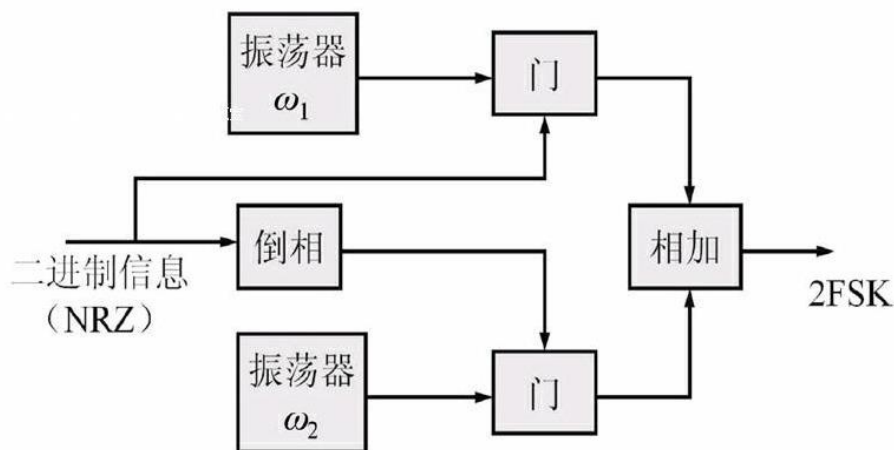


图 1 2FSK 调制原理

在接收端，信号可以通过相干解调法和非相干解调法进行解调：

相干解调法将经过调制后的 2FSK 数字信号通过两个通频带不同的带通滤波器 BPF1、BPF2 滤除带外频率成分，然后将这两路信号分别与相应的载波 ω_1 、 ω_2 相乘进行相干解调，再分别经过低通滤波器，最后用抽样信号进行抽样判决即可得到输出信号。

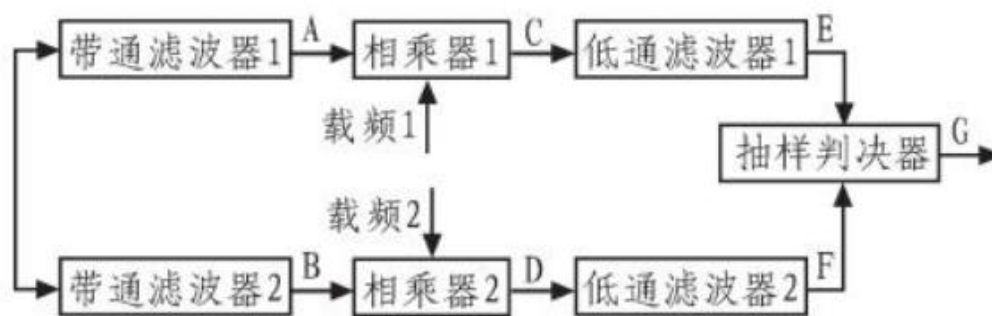


图 2 2FSK 相干解调

非相干解调首先将得到的信号进行带通滤波后滤除载波频率以外的噪声以及干扰，使得信号可以完整的通过，再经过全波整流器输出正极端的包络曲线，然后经过低通滤波器或者整流模块输出基带包络信号，再经过抽样判决器输出基带二进制信号。^[2]

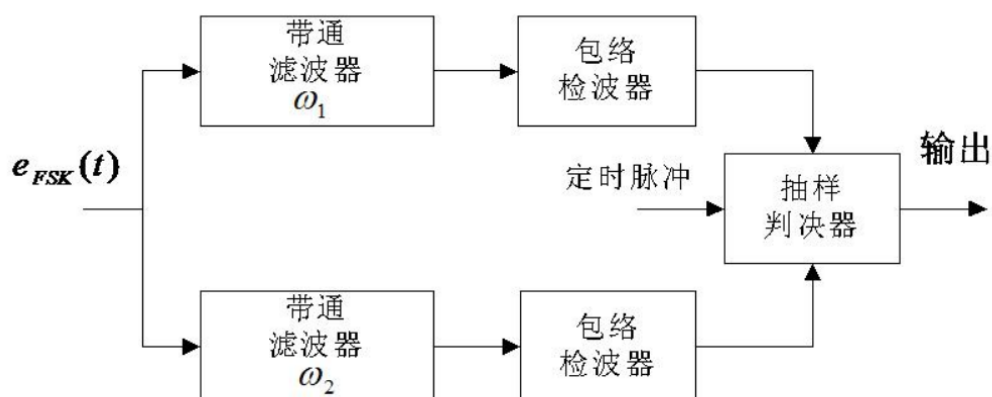


图 3 2FSK 非相干解调

2.2 PCM 编解码

PCM（脉冲编码调制）就是把一个时间连续，取值连续的模拟信号变换成时间离散，取值离散的数字信号后在信道中传输。脉冲编码调制就是对模拟信号先抽样，再对样值幅度量化，编码的过程。^[3]

抽样，就是对模拟信号进行周期性扫描，把时间上连续的信号变成时间上离散的信号，抽样必须遵循奈奎斯特抽样定理。该模拟信号经过抽样后还应当包含原信号中所有信息，也就是说能无失真的恢复原模拟信号。它的抽样速率的下限是由抽样定理确定的。

量化，就是把经过抽样得到的瞬时值将其幅度离散，即用一组规定的电平，把瞬时抽样值用最接近的电平值来表示，通常是用二进制表示。

量化误差：量化后的信号和抽样信号的差值。量化误差在接收端表现为噪声，称为量化噪声。量化级数越多误差越小，相应的二进制码位数越多，要求传输速率越高，频带越宽。为使量化噪声尽可能小而所需码位数又不太多，通常采用非均匀量化的方法进行量化。非均匀量化根据幅度的不同区间来确定量化间隔，幅度小的区间量化间隔取得小，幅度大的区间量化间隔取得大。

一个模拟信号经过抽样量化后，得到已量化的脉冲幅度调制信号，它仅为有限个数值。

编码，就是用一组二进制码组来表示每一个有固定电平的量化值。然而，实际上量化是在编码过程中同时完成的，故编码过程也称为模/数变换，可记作 A/D。

13 折线编码的基本思想如下：首先对输入信号限幅，使幅值保持在-1 和 1 之间，然后判断信号极性码，大于 0 输出 1，小于 0 输出 0。实现语句为：接下来求段落码，然后是段内号。为得到非均匀压缩，可将幅值不均匀的分为 8 份，其段落号—幅值最大值分别对应 1-1/128, 2-1/64, 3-1/32, 4-1/16, 5-1/8; 6-1/4, 7-1/2, 8-1。根据幅值所在范围求段落码时，若果判断出他在哪个段号所在的幅度范围内，则依次输出它的（段落号-1）所对应的二进制编码，如落在 8 的区间范围内，则输出 111。接下来是判断它的段内码。由前面所得的段落号可得他的段落起点值，又因为在每个段内是按照均匀平分为 1/16，所以根据信号幅值和他

说在段落的起始值和结尾值能够判断出它所在的段内码，并将段内码输出，完成 13 折线的编码运算。

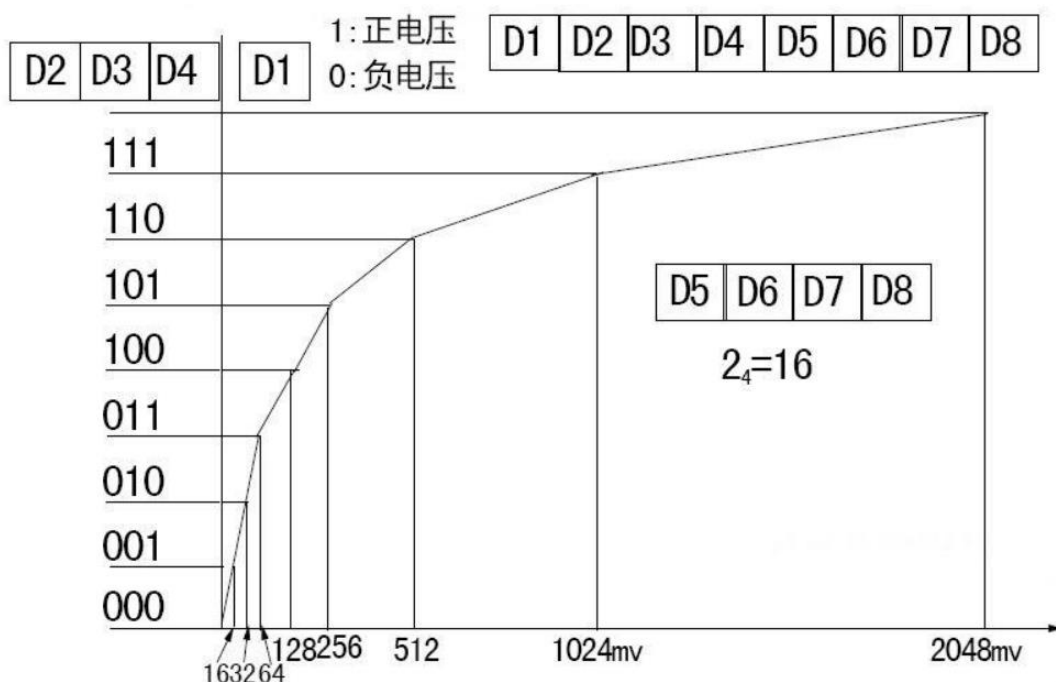


图 4 A 律 13 折线压缩示意图

2.3 最佳接收机

由于数字通信系统传输质量的主要指标是错误概率，因此，将错误概率最小作为“最佳”的准则。在分析数字信号的接收过程中可知，接收端对波形的检测并不重要，重要的是在噪声引起的误差下正确的判断该波形所携带的信息。^[4]

最佳接收机主要是由积分器和比较判决器构成。在积分器的作用下，高斯白噪声的积分值几乎趋近于零，对接收信号进行相应的处理后，将输出的波形提供给判决电路，以便判决电路对接收信号中所包含的发送信息做出错误尽可能小的判决。

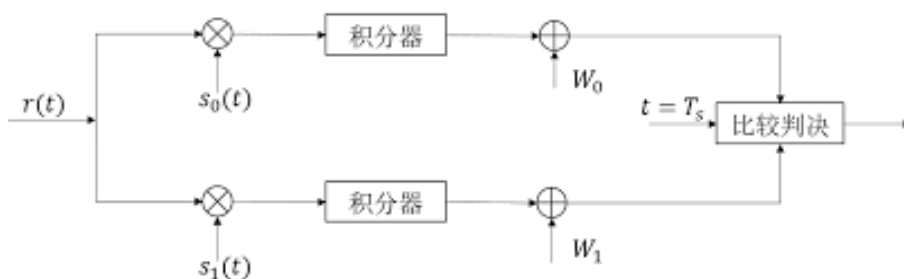


图 5 最佳接收机

三、实验方案

3.1 系统设计

3.1.1 整体框架设计

设计一个单向通信系统，在发送端输入一路随机信号，经过低通滤波之后取出低频模拟信号，将其经过 PCM 编码转换为数字信号后，再通过 2FSK 调制将其送入带有加性高斯白噪声的信道。在接收端，将信号分别利用相干解调、非相干解调、最佳接收机三种方式进行解调并计算三种解调方式下的误码率，再将解调后的信号进行 PCM 解码，输入示波器进行对比，观察三种解调方式下输出波形的差异，结合误码率对三种解调方式的抗噪声性能进行评判。

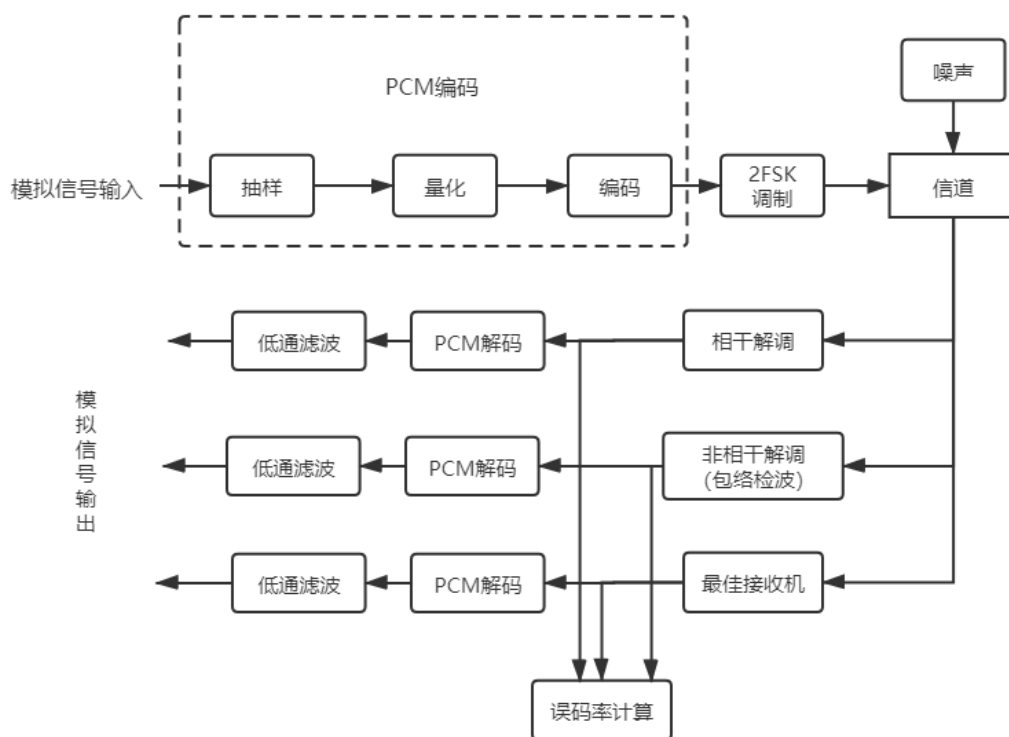


图 6 系统框架设计

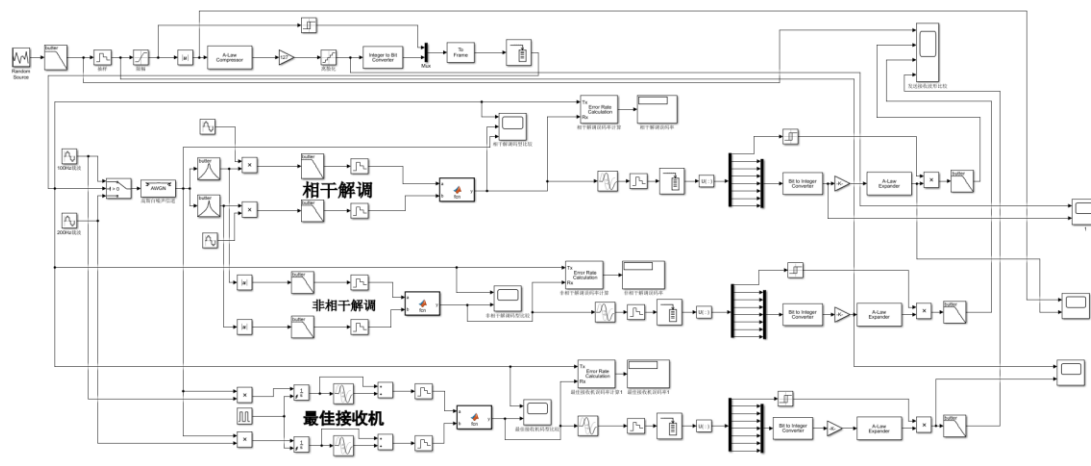


图 7 Simulink 仿真框架图

3.1.2 PCM 编码设计

随机信号经过低通滤波之后得到低频模拟信号,对模拟信号进行抽样、限幅、压缩、扩张、量化编码、缓存。

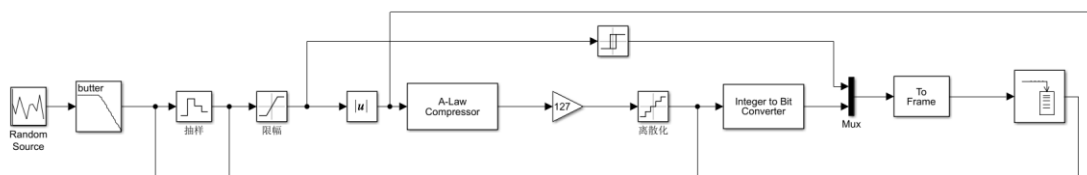


图 8 PCM 编码

部分重要模块的参数设置如下：

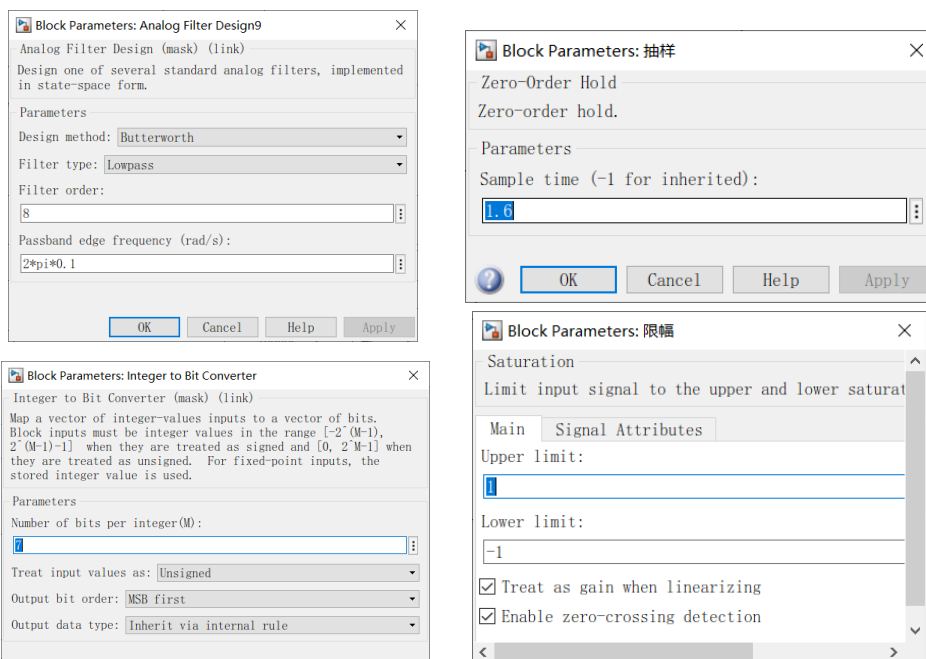


图 9 PCM 编码部分参数

其中，模拟信号频率为 0.1HZ 及以下，抽样频率为 0.625，满足奈奎斯特抽样定理，理论上可以完全恢复模拟信号。

3.1.3 2FSK 调制设计

通过键控法实现 2FSK 调制，正弦波发生器分别产生两种频率的信号（100Hz、200Hz），用于对数字信号进行调制；通过开关 switch 对数字信号进行调制，当输入 2 满足选定条件时，通过输入 1；否则，通过输入 3。参数如下：

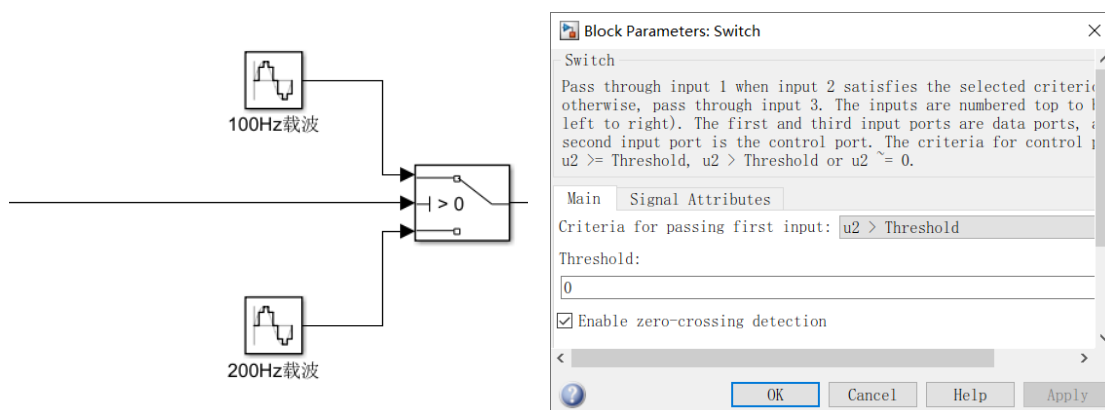


图 11 2FSK 调制

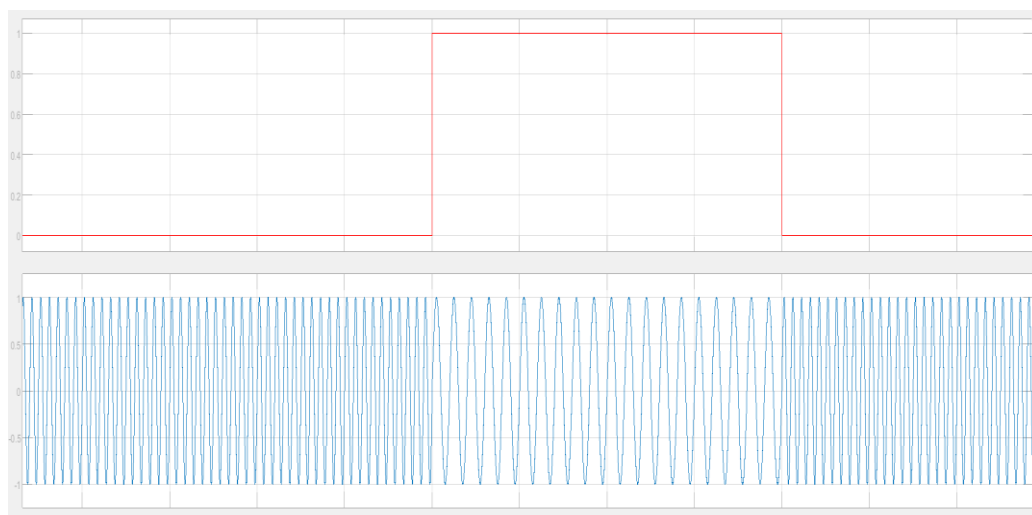


图 10 2FSK 调制前后波形对比

3.1.4 传统接收机设计

信号经过高斯白噪声信道之后，通过带通滤波，随后进行两种传统的解调方式。在相干解调中，分别用 100Hz 和 200Hz 的载波进行解调，随后低通滤波，

再进行抽样对比判决。在非相干解调中，直接通过取绝对值的方法对通过的信号进行全波整流，再低通滤波之后，抽样比较判决。

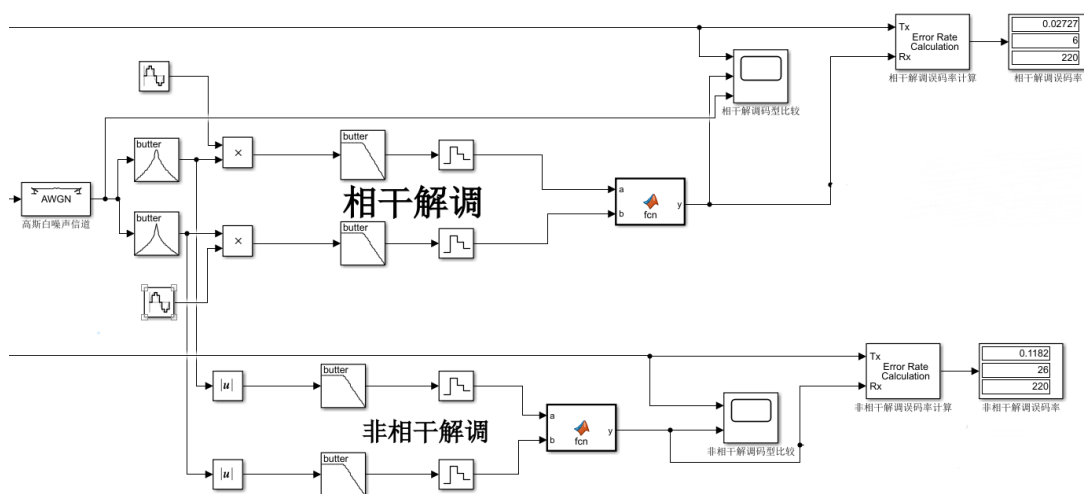


图 12 传统接收机设计

部分重要参数如下：

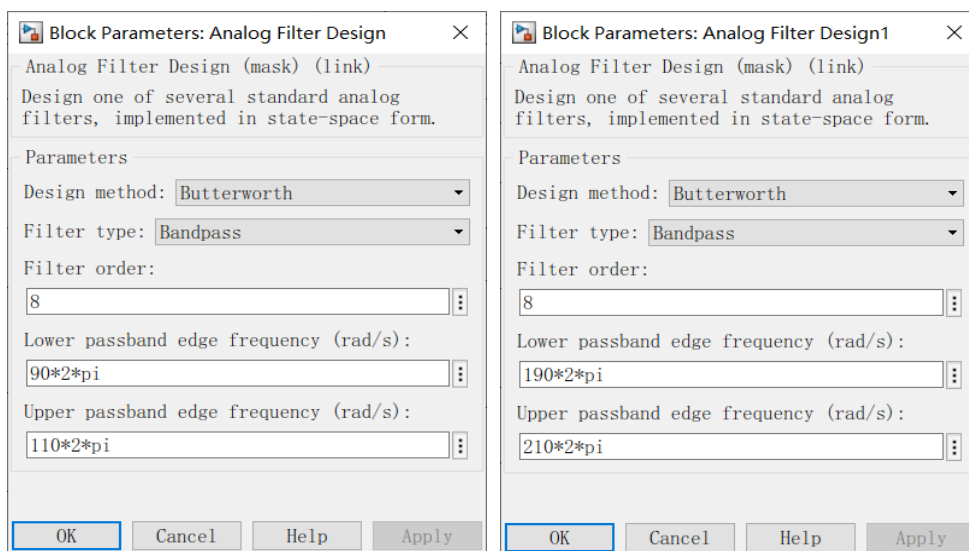


图 13 带通滤波器（分别取两路载频附近）

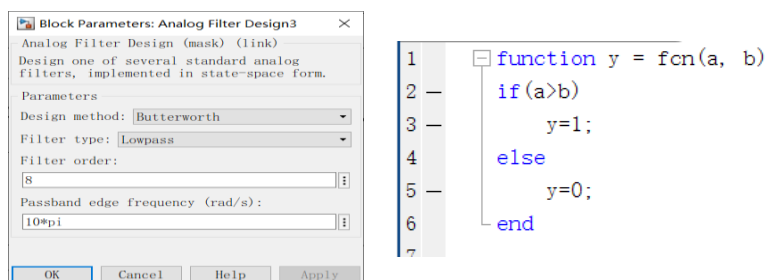


图 14 传统接收机参数

比较判决之后，通过误码率计算模块和显示模块，计算系统误码率并显示。

3.1.5 最佳接收机设计

通过积分器、脉冲发生器、传输延迟构建最佳接收机，积分器采用外部复位模式，用于对接收到的每一个码元在码元周期内做积分，复位信号由脉冲发生器产生；传输延迟用于在抽样时刻能够取到积分结果的最大值。

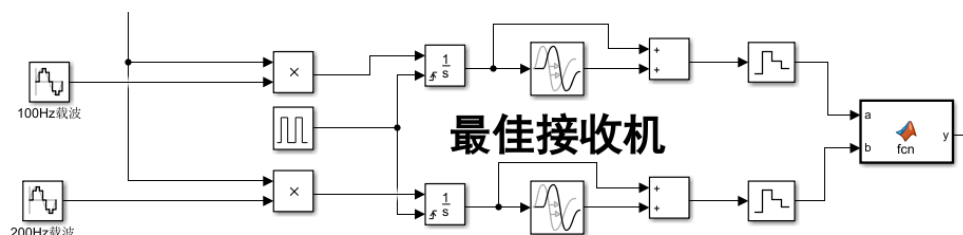


图 15 最佳接收机设计

部分重要参数及接收过程如下：

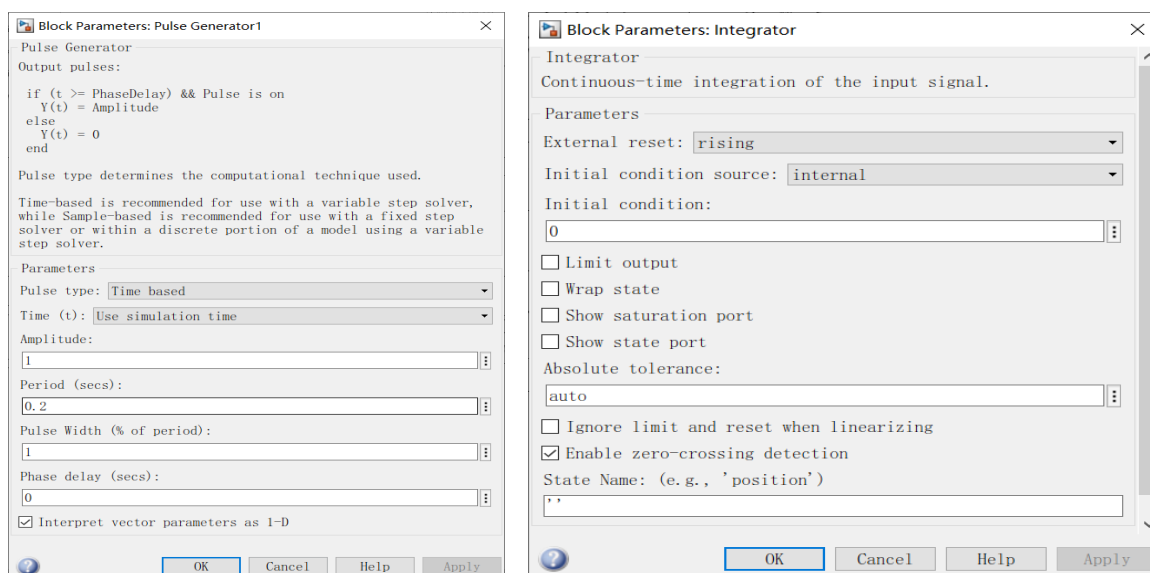


图 17 最佳接收机积分器参数

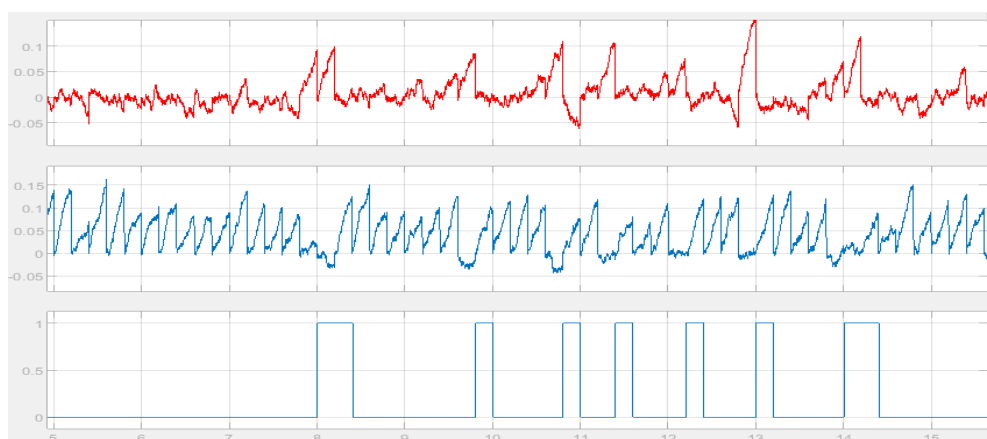


图 16 最佳接收机判决过程

3.1.6 PCM 解码设计

2FSK 解调之后的数字信号，先经过一个延时单元做伪码元同步，继而将数字信号八位一组送入缓存区，进行串并转换之后，再经过幅度压缩和 A 律扩张进行解码操作，最后将解码之后的信号经过低通滤波器之后，恢复为模拟信号。

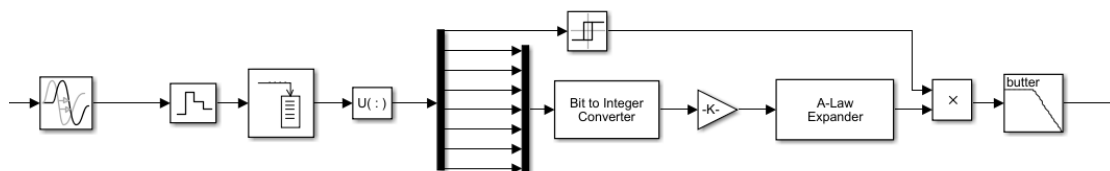


图 18 PCM 解码设计

部分重要参数如下：

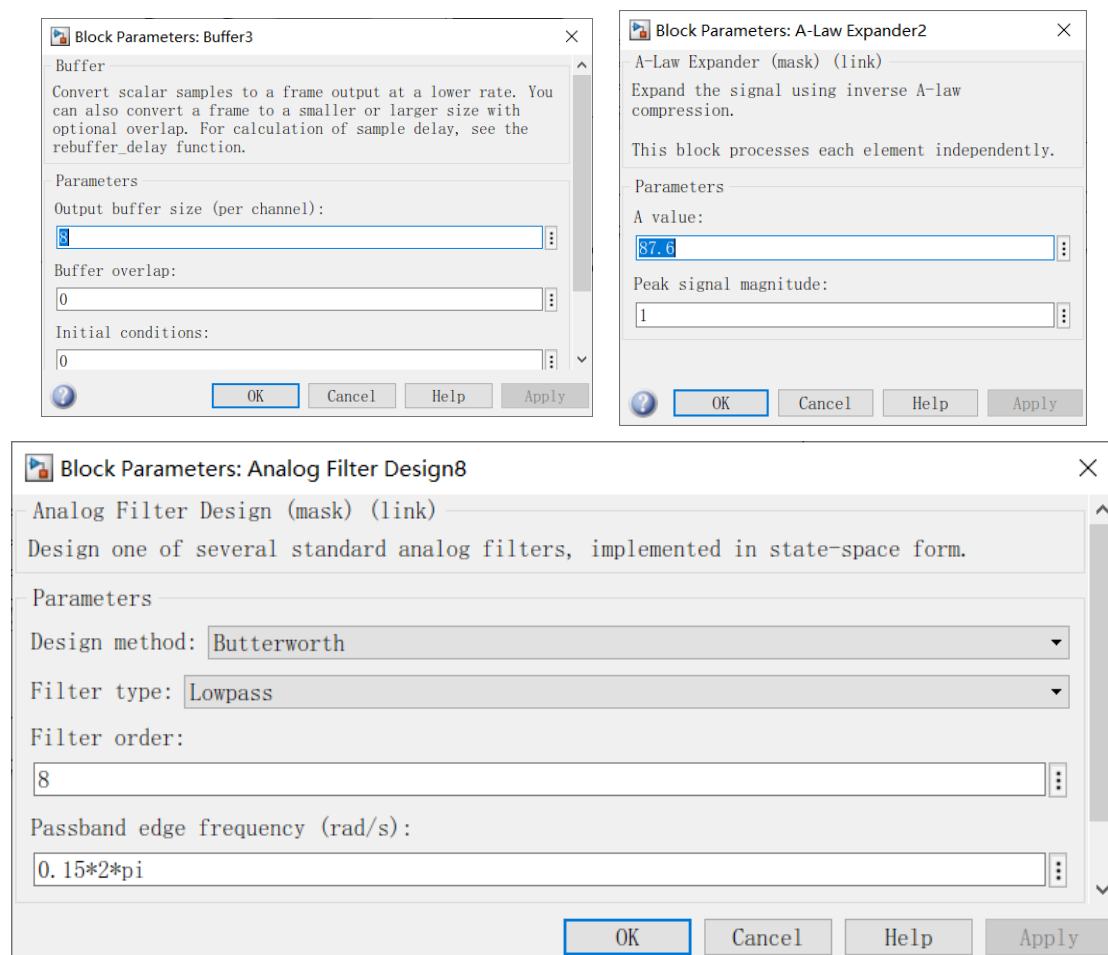


图 19 最佳接收机参数

3.2 不同解调方式抗噪声性能的探究

提出问题：

同一数字调制系统不同解调方式的抗噪声性能是否一样？

作出假设：

同一数字调制系统不同解调方式的抗噪声性能不一样，最佳接收机的抗噪声性能应该更优。

实验设计：

将调制后的 2FSK 信号输入经过带有高斯白噪声 $n(t)$ 的信道 AWGN，输出信号会因为噪声的干扰而使得部分码元产生误码。然后，让受噪声干扰的同一路信号分别通过两种传统接收机和最佳接收机，观察不同接收机下输出信号的误码率，最终得出传统接收机和最佳接收机的抗噪声性能。

本探究实验中控制解调方式为变量，在相同的调制系统之后进行不同的解调，应该保证每次实验三种解调方式的输入信号一致。本实验中先验概率相同，信道信噪比一致。

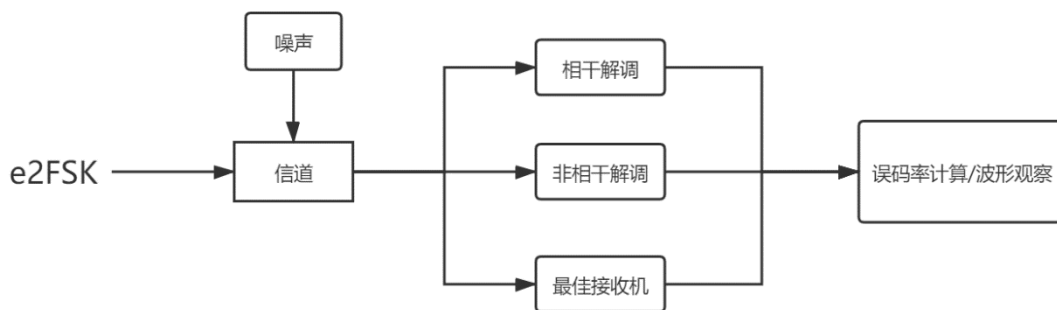


图 20 不同解调方式抗噪声性能的探究

3.3 不同信噪比条件下抗噪声性能的对比探究

提出问题：

不同信噪比下同一解调方式的抗噪声性能是否一样？

作出假设：

不同信噪比下同一解调方式的抗噪声性能不一样，信噪比越大，同一解调系统的误码率越低，抗噪声性能越好。

实验设计：

将调制后的 2FSK 信号输入经过带有高斯白噪声 $n(t)$ 的信道 AWGN，输出信号会因为噪声的干扰而使得部分码元产生误码。改变信噪比，对比信号解调后的误码率。

为了数据更加准确，本实验控制信噪比为变量，但是同时观察三种解调方式的误码率，相当于三路实验并行。本实验中应该保证信号的先验概率一致。

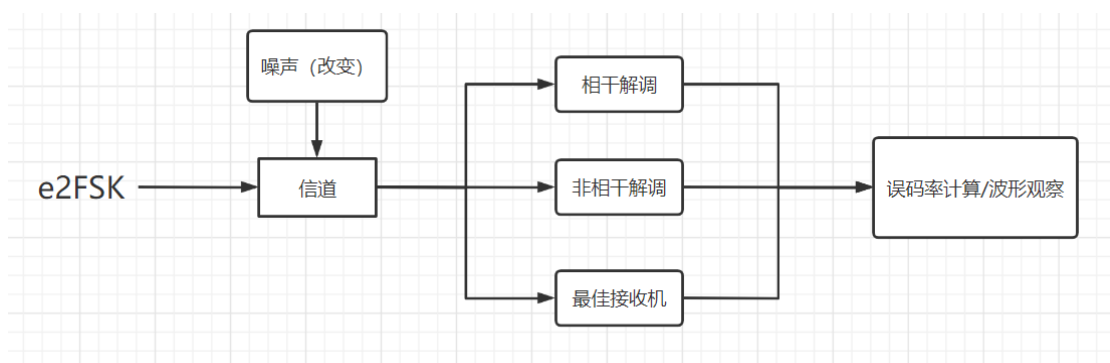


图 21 不同信噪比条件下抗噪声性能的对比探究

3.4 同一系统三种解调方式恢复效果比较

提出问题：

同一数字调制系统不同解调方式的模拟信号恢复效果如何？

作出假设：

同一数字调制系统不同解调方式的抗噪声性能不一样，最佳接收机的抗噪声性能应该更优，所以恢复出来的模拟信号也最好。

实验设计：

将调制后的 2FSK 信号输入经过带有高斯白噪声 $n(t)$ 的信道 AWGN，输出信号会因为噪声的干扰而使得部分码元产生误码。然后，让受噪声干扰的同一路信号分别通过两种传统接收机和最佳接收机，观察不同接收机下接收后恢复模拟信号的波形。

本探究实验中控制解调方式为变量，在相同的调制系统之后进行不同的解调，应该保证每次实验三种解调方式的输入信号一致。本实验中先验概率相同，信道信噪比一致，均设为-20dB。

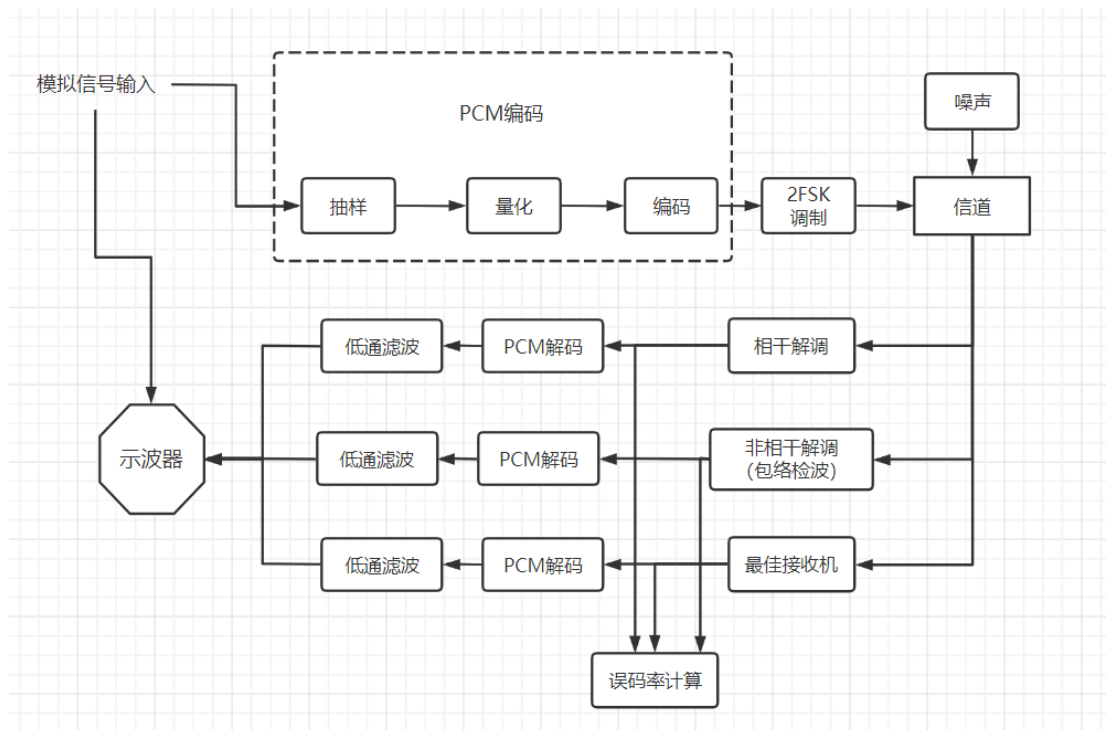


图 22 同一系统三种解调方式恢复效果比较

四、实验现象与分析

4.1 不同解调方式抗噪声性能分析

为保证偶然性误差等影响，在保证先验概率相同、信号信噪比一致（-18）对实验方案中的设计进行重复实验，结果如下：

表 1 -18dB 信噪比下不同解调方式误码率

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	均值
相干解调	0.0413	0.0407	0.0412	0.0421	0.0384	0.0407
非相干解调	0.1126	0.1131	0.1132	0.1209	0.1103	0.1140
最佳接收机	0.0038	0.0045	0.0041	0.0037	0.0036	0.0039

经过多次实验，可以看出每次实验以及最终均值均反映出：相同的信噪比的信道出来的信号，经过不同的解调方式后出现了不同的误码率。整体来看最佳接收机抗噪声性能最佳，相干解调的方式次之，非相干解调也就是包络检波的方式最差。^[5]

由此可以认为，实验方案中假设成立。

4.2 不同信噪比条件下抗噪声性能分析

经过实验，测得了不同信噪比下不同解调系统的误码率，数据和关系曲线如下：

信噪比/dB	-35	-30	-25	-20	-17	-14	-11
相干解调误码率	0.39	0.33	0.2	0.069	0.014	0.006	0
非相干解调误码率	0.46	0.43	0.37	0.173	0.054	0.014	0
最佳接收机误码率	0.33	0.26	0.12	0.024	0	0	0

经过实验，通过分析实验数据可以看出，不同信噪比下同一解调方式的抗噪声性能不一样，信噪比越大，同一解调系统的误码率越低。由于码元速率低，在信噪比达到-11dB 之后，三个解调系统的误码率都降到了 0，因此可以假设码元速率也影响抗噪声性能，待后续验证。

4.3 同一系统三种解调方式恢复效果比较分析

经过对比观察，在信噪比为-20dB 的条件下，原始模拟信号波形和三种解调方式恢复出来的波形如下所示：

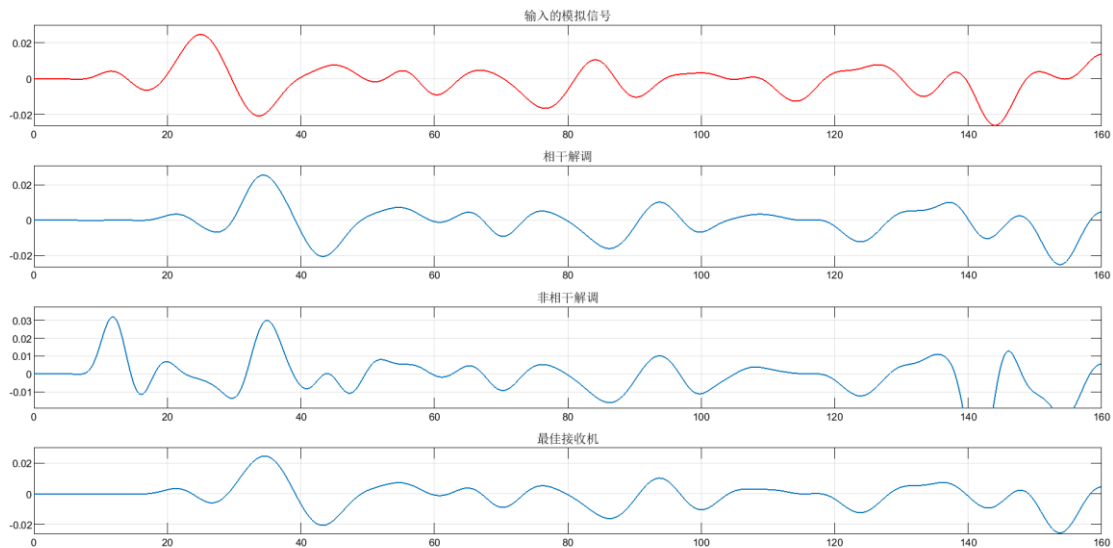


图 23 发送接收波形比较

经过观察分析，可以明显看出无论哪种解调方式，都会存在一定的传播时延，这些与滤波器等器件有关。同样显而易见的是，最佳接收机在误码率最低的情况下，理所当然的保证了最好的恢复效果，观察非相干解调方式，可以明显看出信号的失真。与实验假设结果完全一致。

五、结论与体会

5.1 实验结论

经过本次实验，搭建了基于 2FSK 调制和相干解调、非相干解调、最佳接收机的数字通信系统，通过加入高斯白噪声多径信道，仿真高频信号通过信道的过程，观察并分析信噪比和误码率的关系。进而在前后分别拓展加入 PCM 编解码模块，通过对模拟信号进行抽样量化编码后接入数字通信系统，接收端经过解码与低通滤波恢复出原始模拟信号，与原信号做对比，得出以下结论：

1、同一数字调制系统不同解调方式的抗噪声性能不一样，最佳接收机的抗噪性能应该更优。

2、不同信噪比下同一解调方式的抗噪声性能不一样，信噪比越大，同一解调系统的误码率越低，抗噪声性能越好。

3、同一数字调制系统不同解调方式的抗噪声性能不一样，最佳接收机恢复出来的模拟信号最好。

5.2 实验心得体会

通信原理第七个实验结束了，也意味着所有的通信原理实验结束，同时也说明这个学期接近了尾声。在大三这个忙碌的时间，上了通信原理的课程，做了大大小小七个实验，也算是有了一番不同的感受。

这一次实验面上看起来是给了三个星期，但实际操作起来才发现最近全部安排了期末考试，根本没有时间去做。再者，老师说可以拖后到考完试再做检查，但是我1月6日还安排了其他的事情，所以就不得不在拿到任务的前两周就必须做完。虽然过程比较坎坷，进展不太顺利，但最终还是提前完成了任务并对系统进行了一部分功能拓展。尽管不是做的最好的，但好歹也是自己一点一点搭起来的系统，每一个 Simulink 组件都是自己拖出来摆放的，算是非常有成就感的事情之一了。

第一周的时候，几乎没怎么搭建系统框架，而是先进行了系统的 Simulink 学习，因为上一次用还是大一学习 MATLAB 课程时，如今早就没了印象。同时也查阅了大量的文献资料，复习了基本的原理，最终经过和同学讨论衡量之后决定使用 2FSK 调制方式并且加上 PCM 编解码部分。第二周开始搭建系统，先是把调制部分打起来，然后打通三种解调方式，最终把 PCM 编解码加在前后构成整个系统。其实搭起来也不算很难，集中精力一两天就可以了。但到了最终检查的时候，在卢老师和蔡老师的指导下才发现还存在不小的问题，又历时一个下午不断调试，最终把实验完成。

这次实验中，我觉得收获最大的莫非两点，就是对原理的深入理解和对实验探究过程方法的掌握。前者是在实验开展之前感悟颇深，直到读了网络上的一些文章和文献之后才一步步确立起自己要做的系统模型；后者主要是在实验开展过

程中老师的指导上领悟的，我因为一个小错误无法调通，请卢老师和蔡老师帮忙进行单步调试，最终解决问题，这是一个我永远不会忘记的点。

本次实验已经做完，未来知识的学习和理论的实践还有更远的路要走！

参考文献

- [1]樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第7版)[M]. 国防工业出版社:北京, 2013:70-130.
- [2]任晶晶. 基于 MATLAB/Simulink 的 2FSK 调制解调系统仿真设计[J]. 太原学院学报, 2017, 35(2): 48-51.
- [3]youke-666. PCM 技术详解[EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_160ea90a90102w5wz.html, 2016-05-10.
- [4]魏书梅. 基于 ML 准则的广义高斯噪声信道下的最佳接收机的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [5]陆小菊, 李金平, 李鹏飞. 基于 simulink 的 2FSK 调制解调器设计与实现[J]. 北京联合大学学报, 2013, 27(1): 44-50.