

# 通信原理第二次实验报告

实验小组成员：汪奕晖（19302058），马知行（19302045）第43组 9.5

实验分工：共同完成

实验日期：2022年 2 月 25 日

班级：2019级信息工程

## 第3章 模拟fm调制解调系统

### 一、实验目的

1. 利用LabVIEW实现FM信号的调制和解调。
2. 理解并掌握FM调制和解调的基本原理及FM调制中各参数的含义。
3. 利用非相干解调法实现对FM调制信号的解调。
4. 利用USRP 2920型号的软件无线电设备解调实际FM广播信号。

### 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. 角度调制：

角度调制可分为FM和PM，即载波的频率或相位随基带信号变化的调制方式。如果载波的频率变化量与调制信号电压成正比，则称为FM；如果载波的相位变化量与调制信号电压成正比，则称为调相。由于载波频率的变化和相位的变化都表现为载波总相角的变化，因此将调频和调相称为调角。

本次实验假设基带信号为正弦波信号： $m(t) = \sin(2\pi f_b t)$ ，角度调制的一般原理可表示为： $s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi(t))$ 。

其中 $\omega_c t + \varphi(t)$ 为已调信号的瞬时相位； $\varphi(t)$ 为已调信号的瞬时相位偏移； $\omega_c + \frac{d\varphi(t)}{dt}$ 为已调信号的瞬时角频率； $\frac{d\varphi(t)}{dt}$ 为已调信号的瞬时角频率偏移。

频率调制满足的要求是已调信号的瞬时角频率偏移随基带信号 $m(t)$ 线性变换，即：

$\frac{d\varphi(t)}{dt} = K_{FM} m(t)$ ，其中 $K_{FM}$ 为频率偏移系数。

故FM调制信号可表示为：

$$s_{FM} = A \cos(\omega_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

最后利用采样进行离散化即可，得到：

$$s_{FM}[i] = A \cos(2\pi f_c \frac{i}{f_s} + K_{FM} \sum_{k=0}^i \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s})$$

## 2. FM解调

FM解调采用非相干包络检波方法。

首先先对接收到的信号进行求导运算：

$$\frac{ds_{FM}(t)}{dt} = -A(\omega_c + K_{FM}m(t)) \sin(\omega_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

然后将信号经过希尔伯特变换：

$$H(\frac{ds_{FM}(t)}{dt}) = -A(\omega_c + K_{FM}m(t)) \cos(\omega_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

把希尔伯特运算前后的值分别输入到复数信号的实部和虚部，然后取该信号的幅值，得到：

$$m_k(t) = A(\omega_c t + K_{FM}m(t))$$

最后对其去除直流，并进行归一化幅值处理即可得到m(t)。

## 3. IQ调制

IQ调制的本质是使用两路正交的载波。基带处理单元在复数域上生成两路独立的基带信号作为复数信号的实部和虚部，再分别将两路基带信号调制在正交的同频载波上发送。

对经FM调制的带通信号

$$s_{FM}(t) = A \cos(2\pi f_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

改写为复指数形式 $s(t) = \text{Re}[s(t)e^{j\omega t}]$ ,则由 $s(t) = I(t) + jQ(t)$ ,可得到正交的两个信号为:

$$I(t) = A \cos(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau))$$

$$Q(t) = A \sin(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau))$$

将两个信号离散化得到:

$$I[n] = A \cos(K_{FM} \sum_{k=0}^n \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s})$$

$$Q[n] = A \sin(K_{FM} \sum_{k=0}^n \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s})$$

#### 4. IQ解调

由于接收到的I、Q信号的包络不包含调制信号的信息,无法用希尔伯特变换法求解,故采用先对I、Q信号的商求正切角

$$h[n] = \arctan(\frac{Q[n]}{I[n]}) = K_{FM} \sum_{k=0}^n \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s}$$

再对该式求差分即可得到调制信号:

$$m_1[n] = K \sin(2\pi f_b \frac{n}{f_s})$$

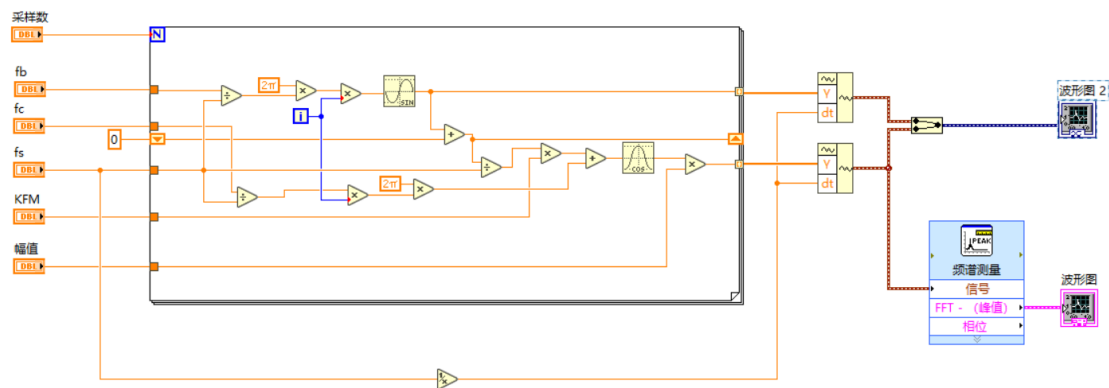
其中K为比例系数

## 四、实验内容

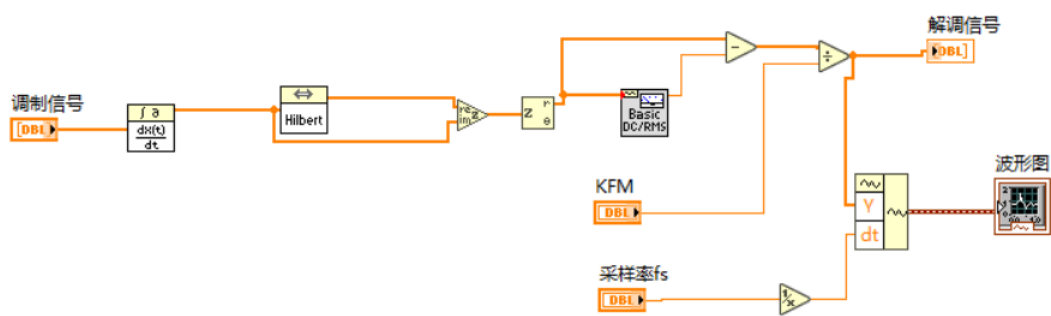
### 1. FM信号调制与解调

程序框图

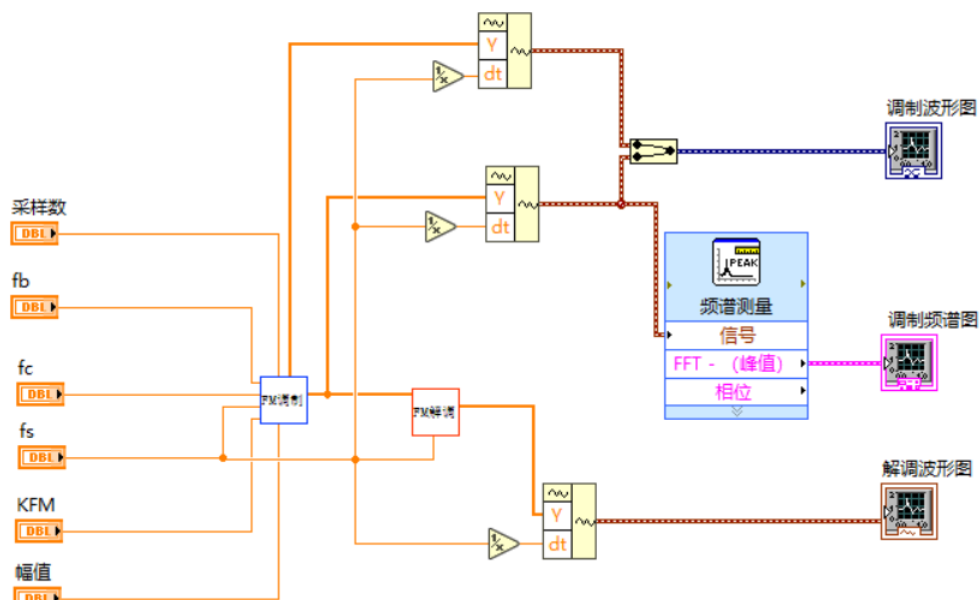
在实验中不改变幅值A, 一直使用A=1



调制

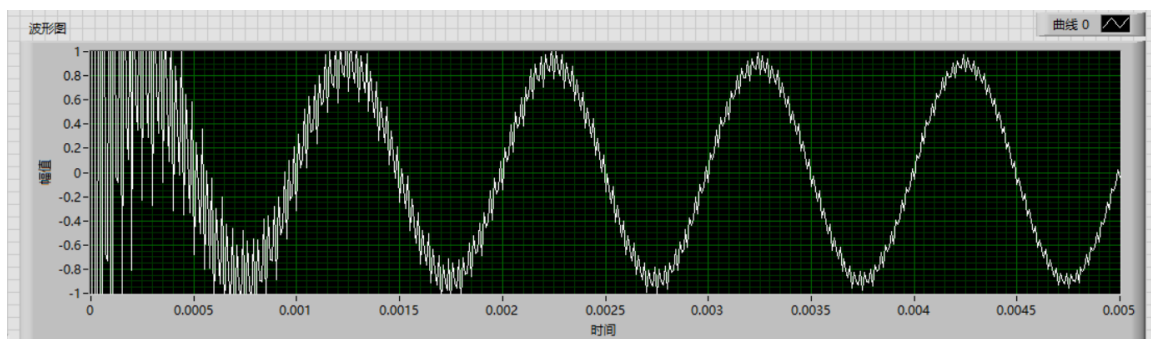
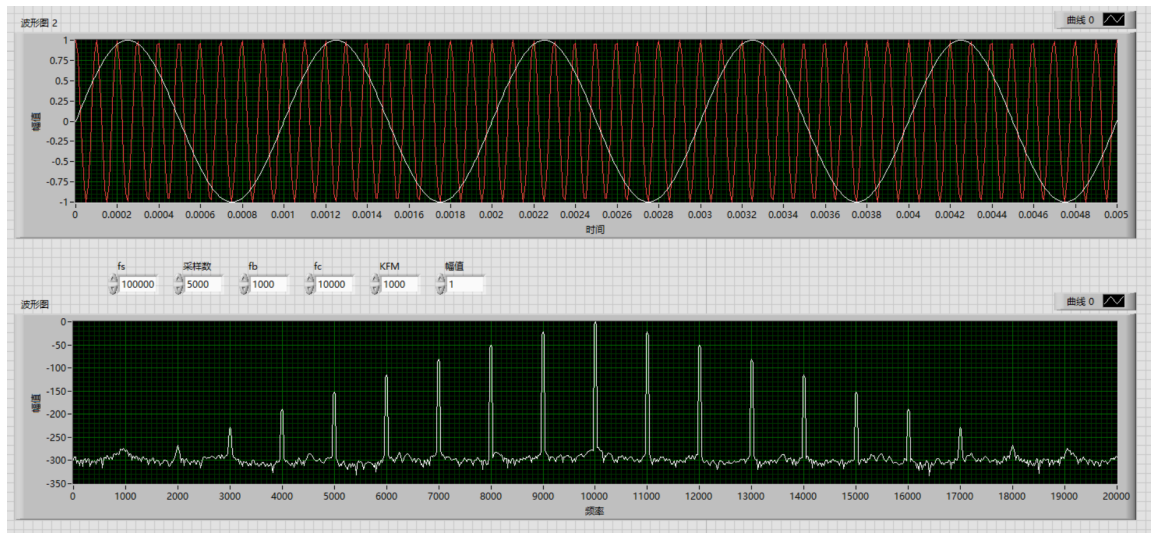


解调



汇总

观察调制波形的生成情况

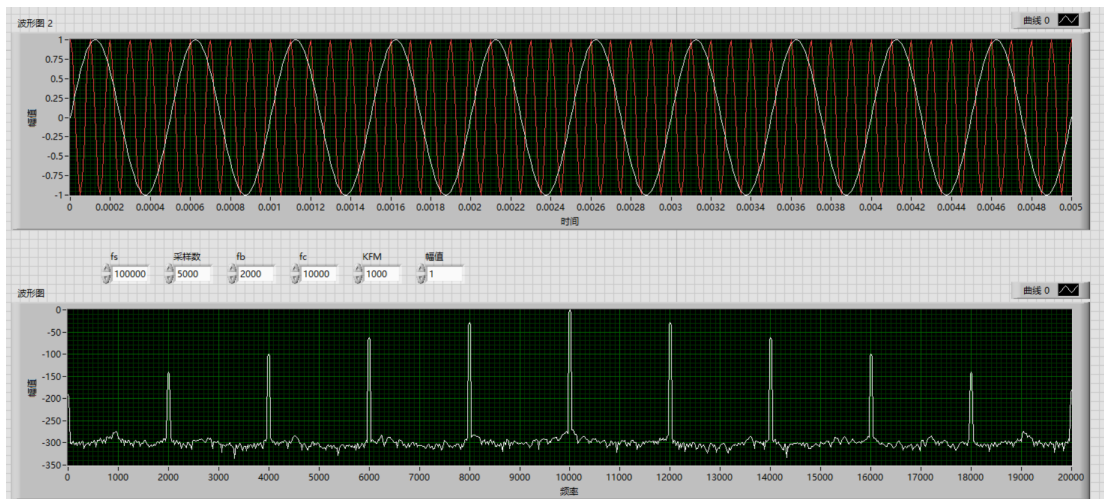


解调

可以发现解调波形图大致符合原信号，噪声可能是求导过程的不连续造成的。

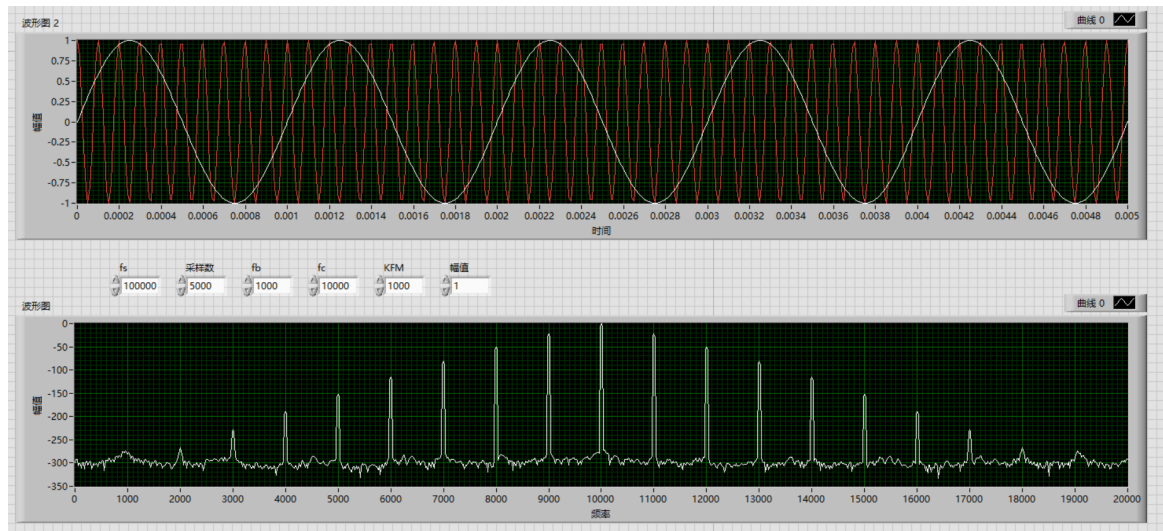
a. 改变基带频率

基带频率较大



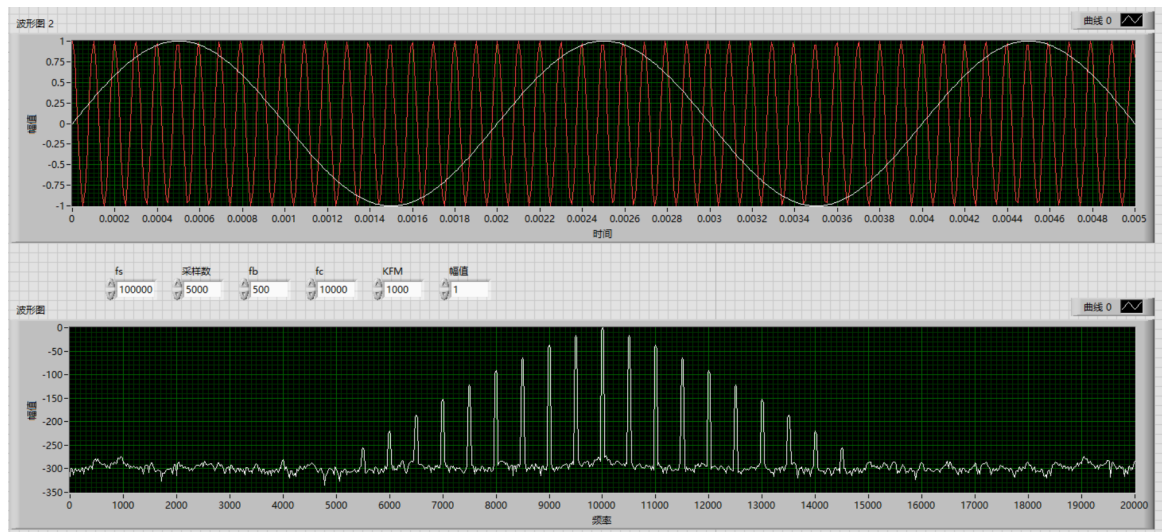
$f_b = 2000$

基带频率中等时



$f_b = 1000$

基带频率较小时

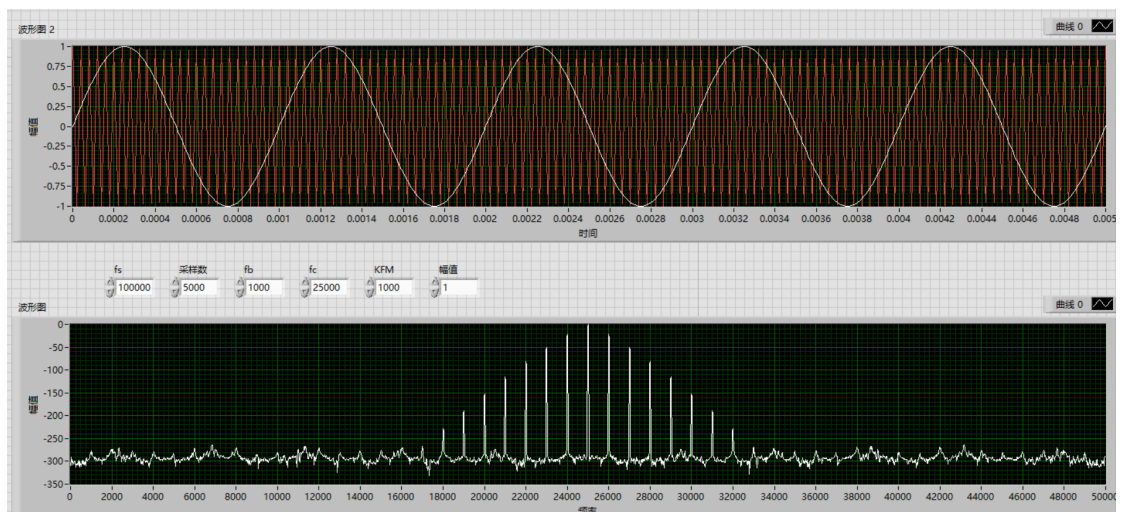


$f_b = 500$

所以基带频率影响调频波的频率变化快慢。基带频率较大时，调频波的频率变化率更大，频谱延伸更窄。

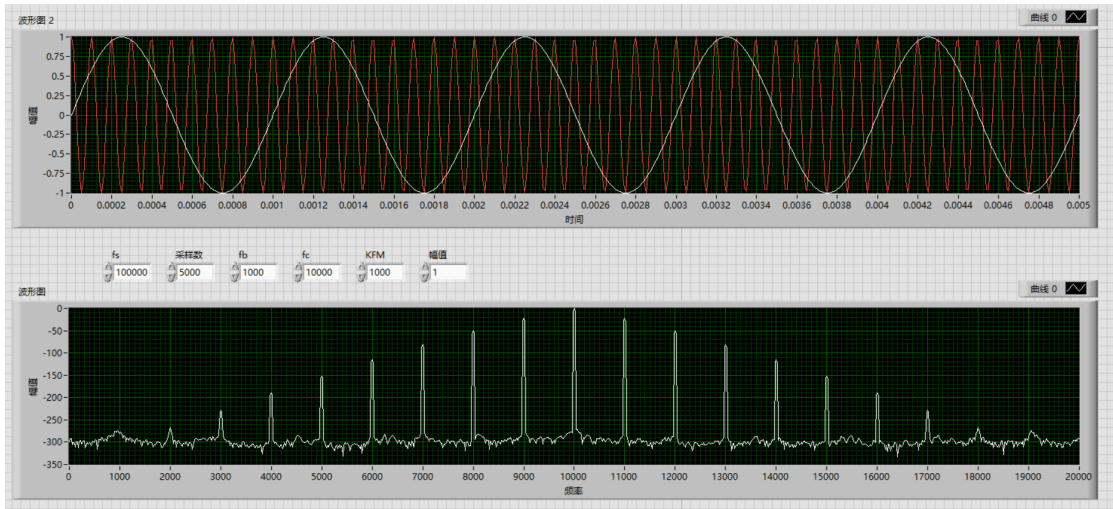
## b. 改变载波频率

当载波频率较大时

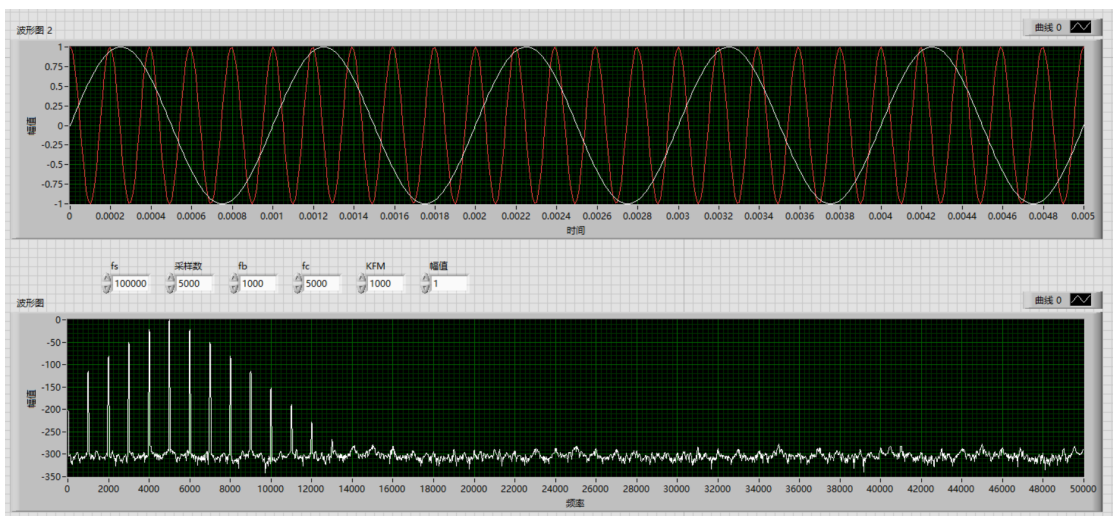


$f_c = 2500$

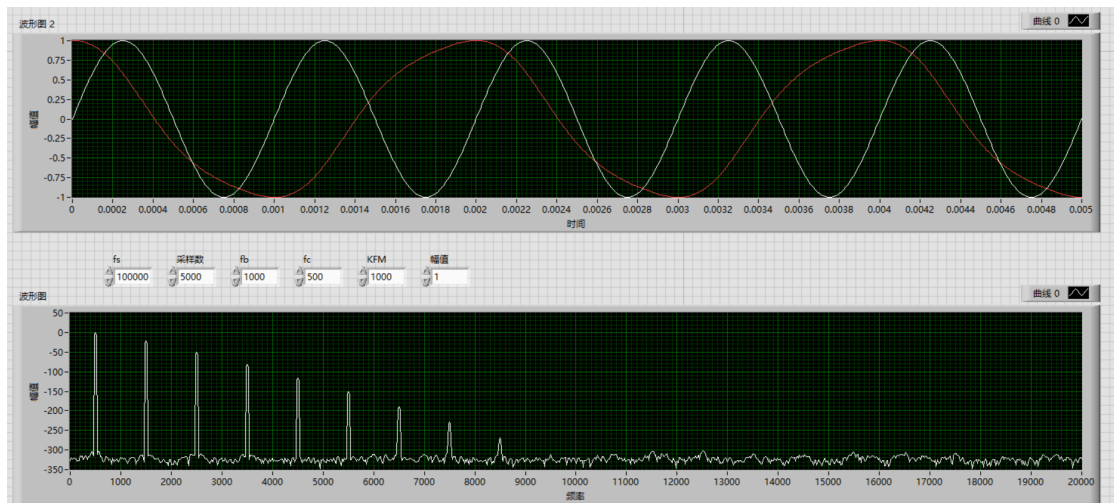
当载波频率中等时



当载波频率较小时







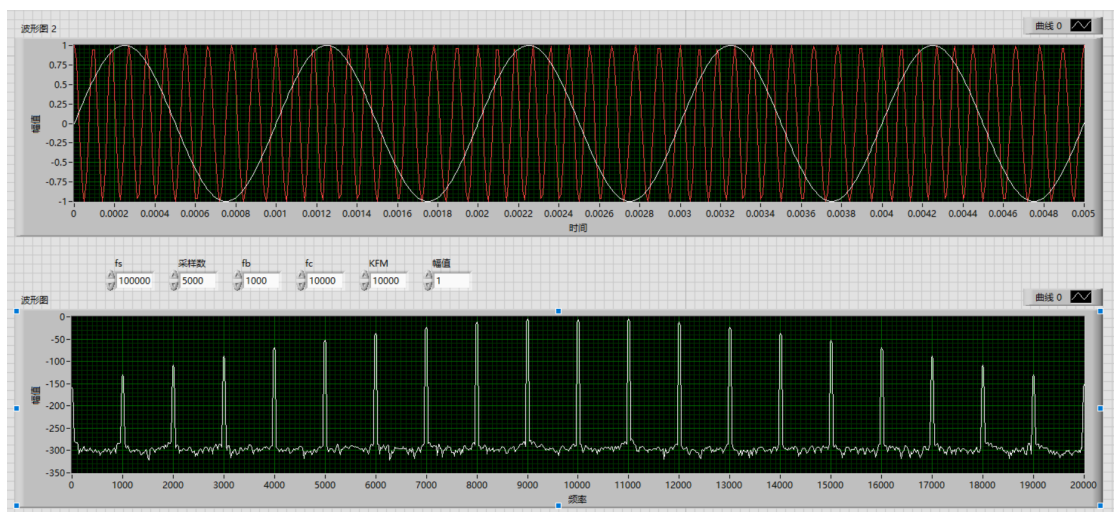
$f_c = 500$

此时波形出现了失真

因此，当载波频率较小时，FM调频波调制失败，调频波失真。在正常调频的前提下，载波频率越小，调制效果越明显，频谱上中心频率有所改变。

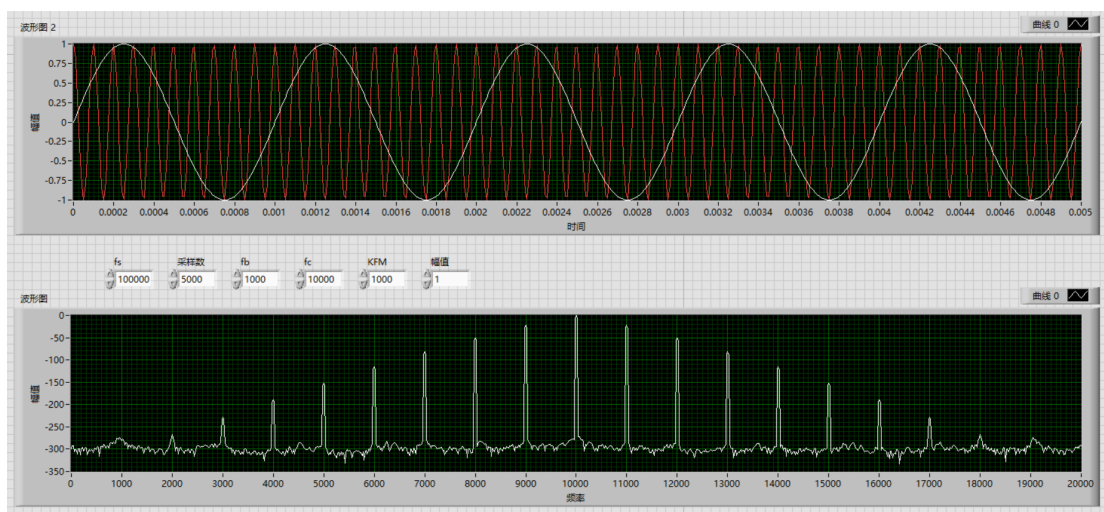
### c. 改变频率偏移系数

当频率偏移系数较大时



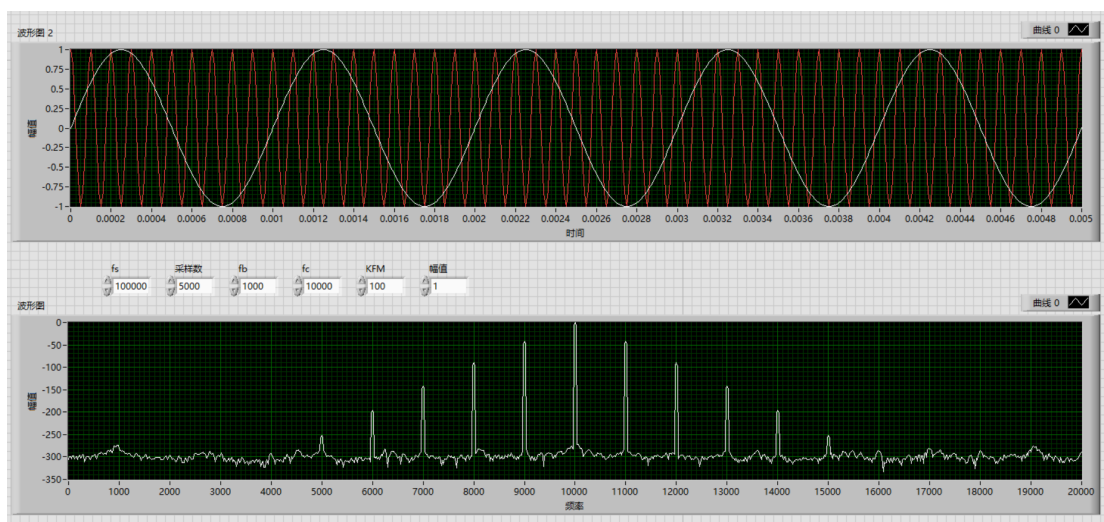
KFM = 10000

当频率偏移系数中等时



KFM = 1000

当频率偏移系数较小时



KFM = 100

教材上提到频率偏移指数最好为0.5~0.8倍的载波频率，有上述结果可知，似乎无需严格遵守该要求

由频谱图可以发现，随着频率偏移指数的增大，信号带宽也随之增大，时域波形没有太大区别。

由窄带调频的定义可知，当

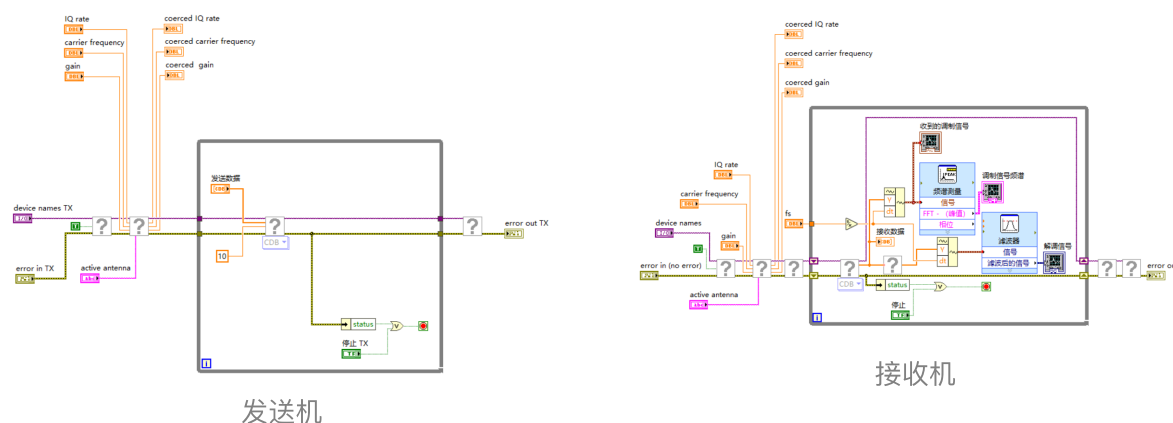
$$\left| K_f \int m(\tau) d\tau \right| \ll \frac{\pi}{6}$$

FM信号的频谱宽度比较窄，称为窄带调频。不满足该式时，称为宽带调频。

采样率和采样点数的影响已经在第一次实验中讨论过，即采样频率越高波形越平滑，这里不再附图赘述。

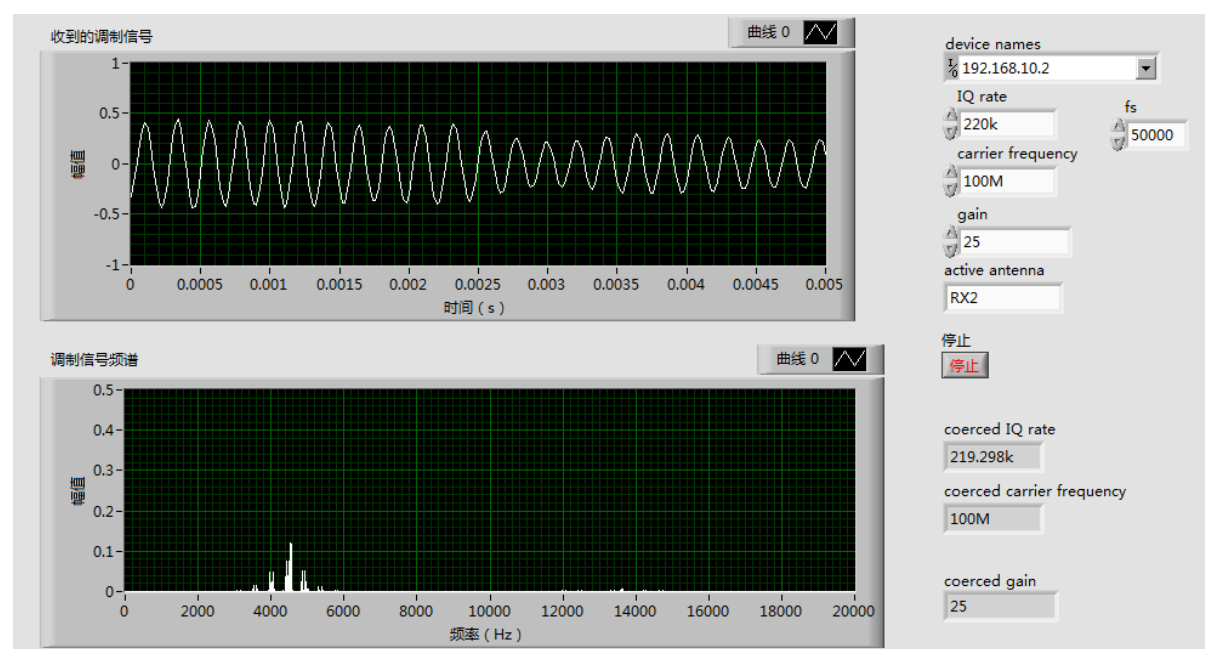
## 2. 利用USRP实现对FM广播信号的解调

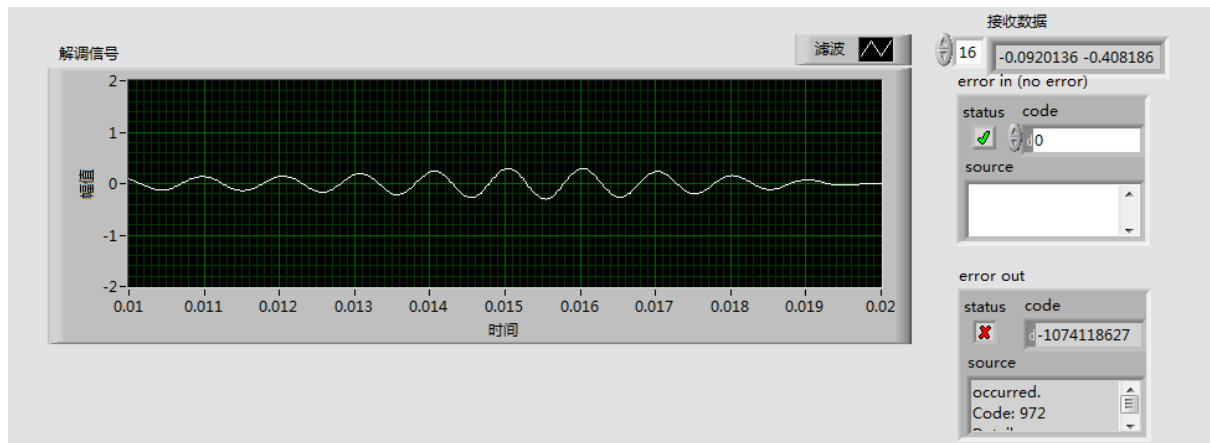
实现IQ调制下的FM解调，使用单台2920设备（最低70M）设置成接收机，接收课堂本地的FM广播信号，并使用计算机声卡播放出来



其中绿色问号组件为USRP相关组件，由于自己的电脑没有连接USRP，故显示为问号。

在发送模块中2信号的调制和发送以后，再通过usrp进行接收，经过对天线的调整以后，得到图形如下：

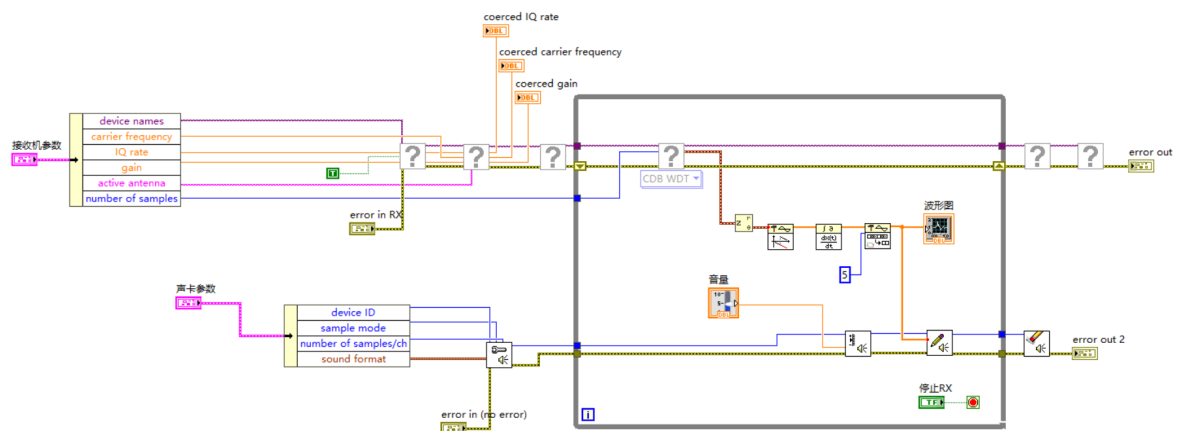




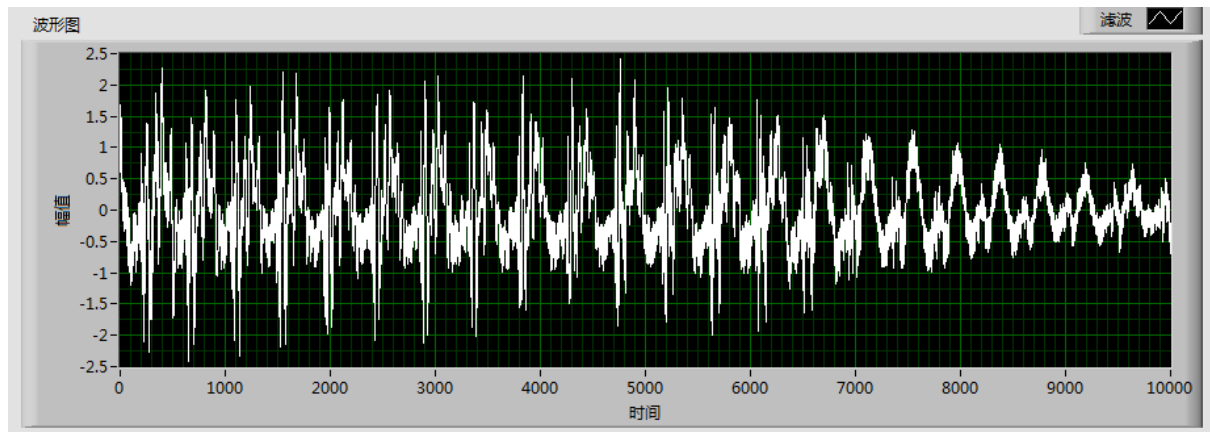
信道的噪声对调制信号产生了影响，导致波形略有起伏（放大看可以发现），但波形的大致趋势满足实验要求。

## 2. 接收广播信号

程序框图



接收广播信号时选取的电台频率为101.7M，通过不断调整天线角度，最后基本接收到广播中的语音信号。



声卡参数

设备ID: 0

采样模式: 连续采样

每通道采样数: 5000

声音格式

采样率(S/s): 44100

通道数: 2

每采样比特数: 16

错误输入 (无错误)

状态	代码	源
✓	0	

错误输出

状态	代码	源
✓	0	

coerced IQ rate: 240.385k

coerced carrier frequency: 101.7M

coerced: 35

音量: 100, 75, 50, 25, 0

error in RX

status	code	source
✓	0	

error out

status	code	source
✓	0	

停止RX: 停止

接收机参数

device names: 192.168.10.2

carrier frequency: 101.7M

IQ rate: 240k

gain: 35

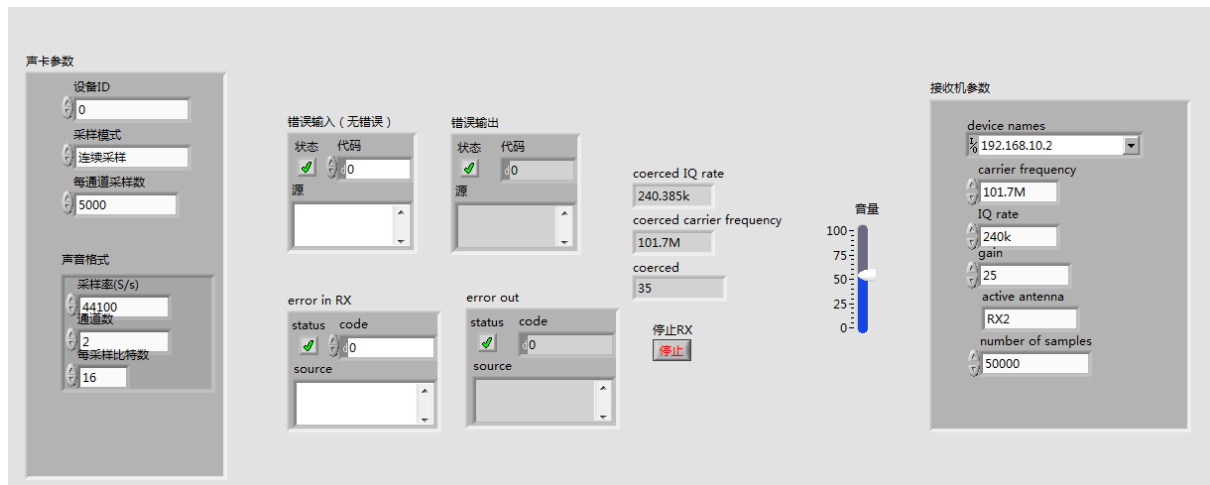
active antenna: RX2

number of samples: 50000

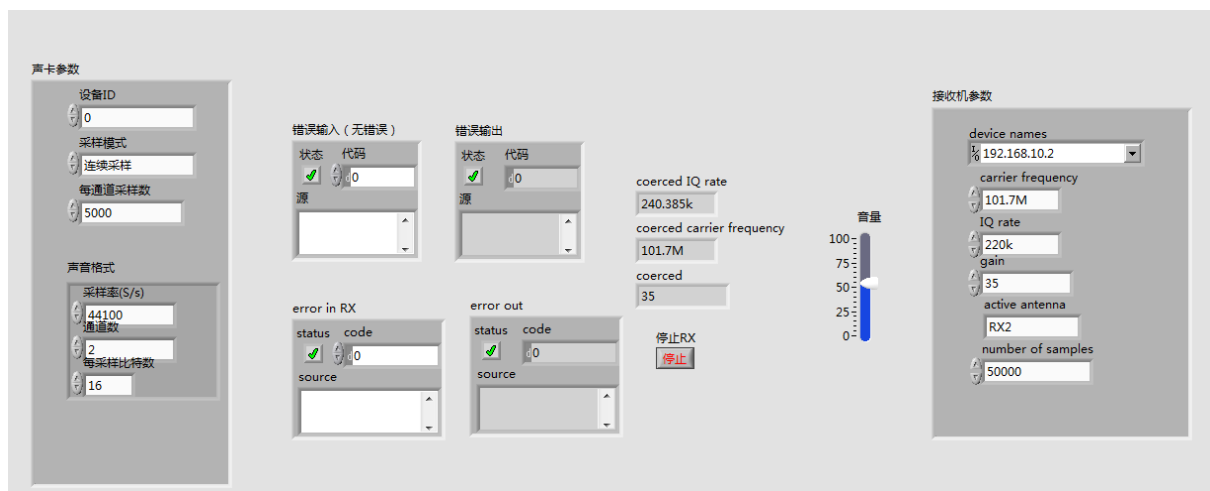
对于听到的音频信号，其噪声较大，且声音存在段落感，猜测原因如下

1. 实验室中usrp设备较多，相互可能产生影响.
2. 实验室电脑陈旧，通过耳机输出的音频信号质量不佳
3. usrp设备处于室内，在密闭的环境下接收能力有限

在合适的范围内调整IQ rate 和gain后，可以发现音频信号变得稍微清晰



改变gain 为25



改变IQ rate 为220k

## 五、回答问题

实验注意：

### 1. 数据类型怎么匹配？

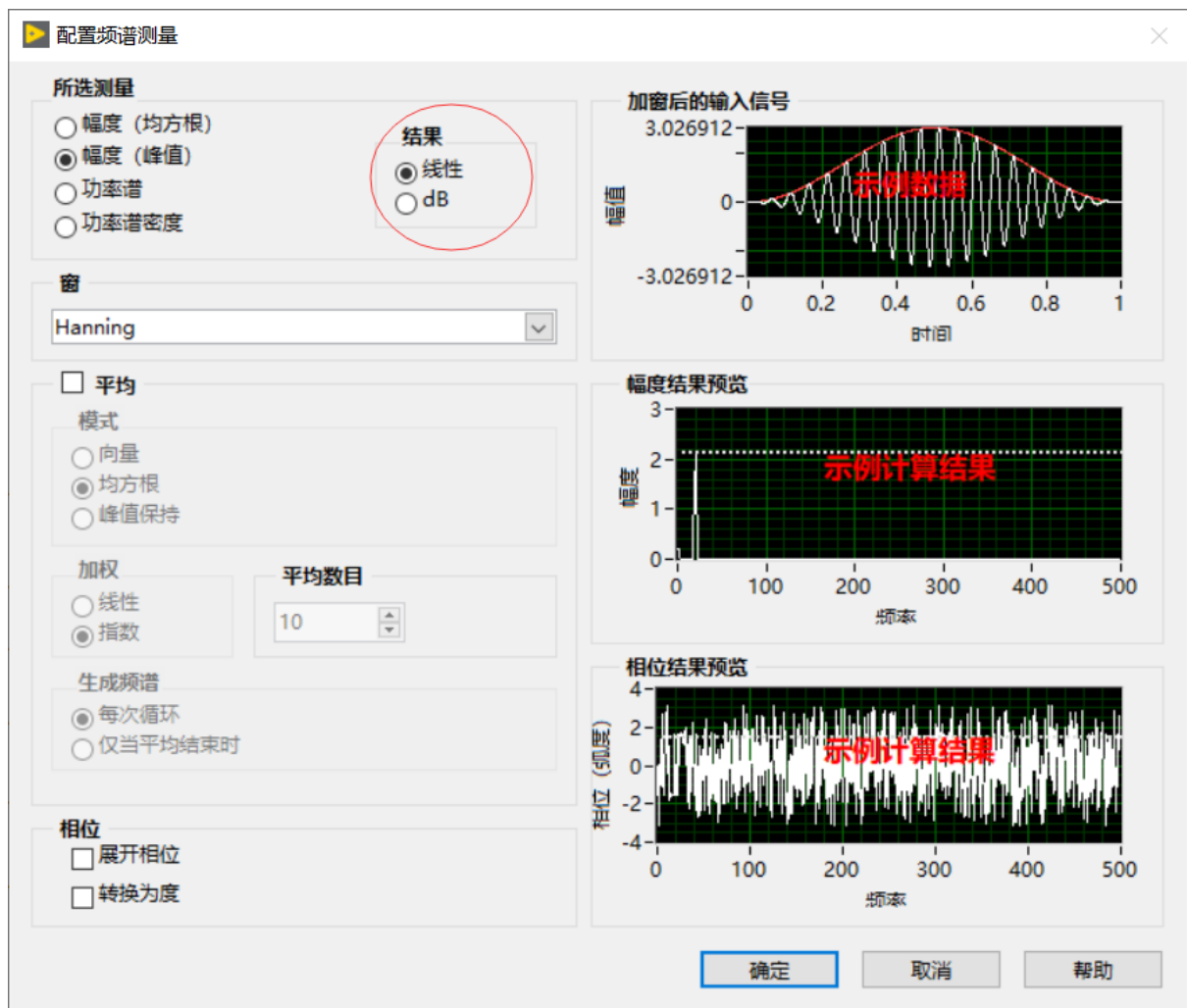
根据各个组件的接口处的颜色可以初步判断所需的数据类型，或者直接由接口引出连线新建一个输入组件，会自动匹配相符的数据类型。

### 2. 为什么要使用移位寄存器，如何声明

移位寄存器可以将循环结构中的上一个循环的结果作为下一个循环的输入，在FM解调中作为信号求和的构建。

在循环框图的边界右击数据输入连线即可改变成移位寄存器

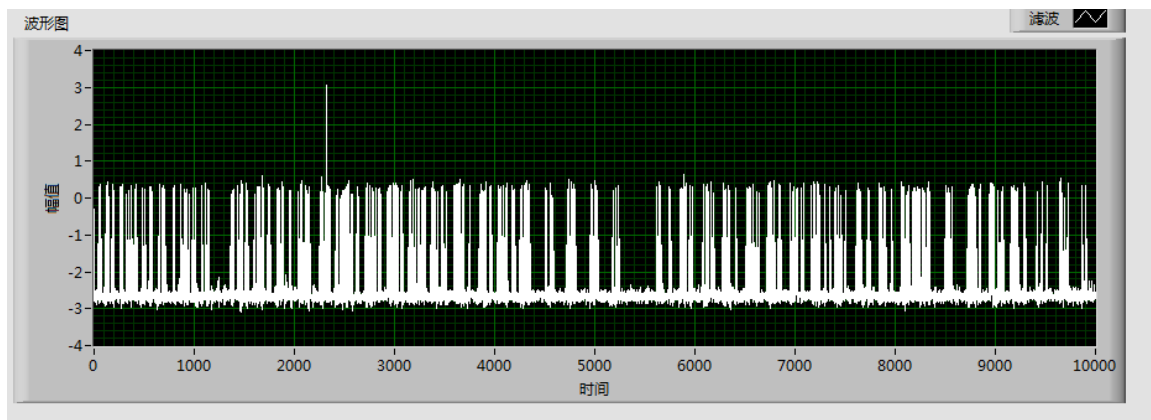




4. 为何需要声卡控件，不播放声音有没有办法验证接收到广播的正确性？

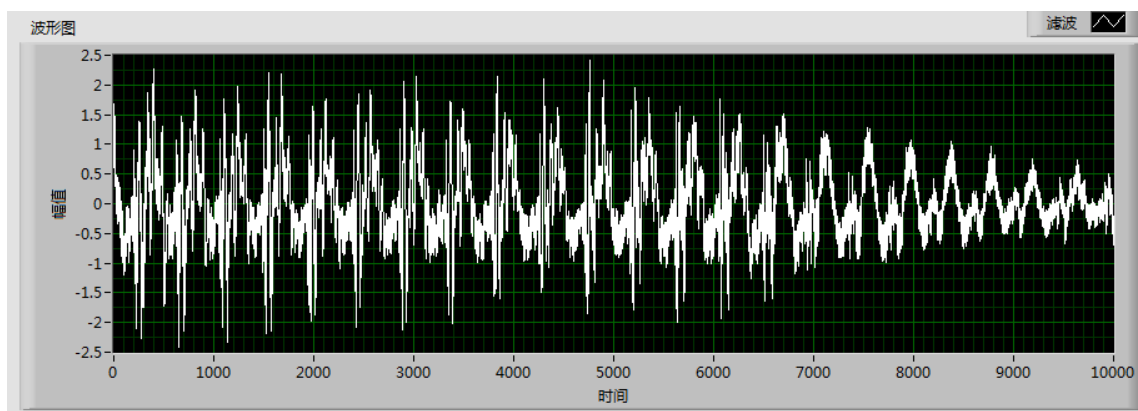
需要声卡的参数将收到的FM信号转换成声音信号输出。

若不播放声音，在波形上可以进行验证，若没收到正确的FM广播信号，波形图中全是噪声信号，与收到正确的FM广播信号有明显区别。



虚假的广播





真实的广播

可以清晰发现，虽然都存在噪声，但广播信号明显可以看出有一定的波形。

### 考核提问：

#### 实验一：

##### 1. FM和PM之间的关系

FM调制：指瞬时频率偏移随调制信号成比例变化：

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = K_f m(t)$$

PM调制：指瞬时相位偏移随调制信号成比例变化：

$$\varphi(t) = K_p m(t)$$

单音FM信号：

$$s_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + K_f A_m \int \cos \omega_m \tau d\tau] = A \cos[\omega_c t + m_f \sin \omega_m t]$$

单音PM信号：

$$s_{PM}(t) = A \cos[\omega_c t + K_p A_m \cos \omega_m t] = A \cos[\omega_c t + m_p \cos \omega_m t]$$

PM与FM的区别仅仅在于，PM是相位偏移随调制信号线性变化，FM是相位偏移随调制信号的积分线性变化。

如果将调制信号先微分，而后进行调频，则得到的是调相波，这种方式称为间接调相。

如果将调制信号先积分，而后进行调相，则得到的是调频波，这种方式称为间接调频。

## 2. 窄带调频与宽带调频的条件（课后问题1）

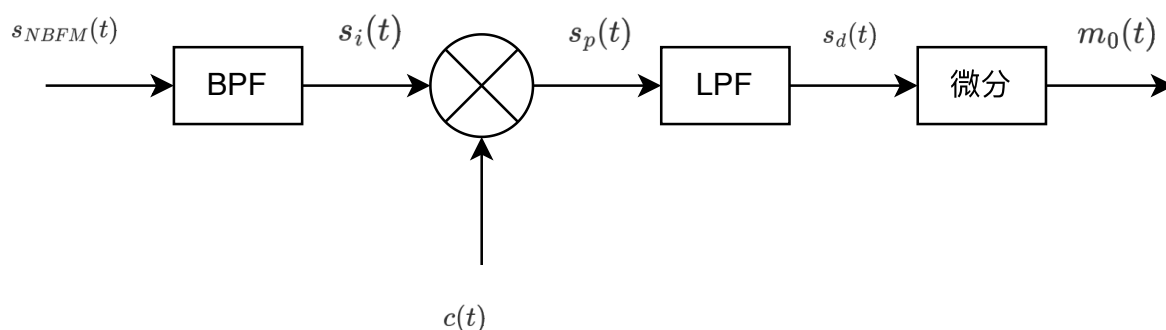
当FM信号的最大瞬时相位偏移满足：

$$\left| K_f \int m(\tau) d\tau \right| \ll \frac{\pi}{6}$$

时，FM信号的频谱宽度比较窄，称为窄带调频。不满足该式时，称为宽带调频。

## 3. 思考如何对FM信号进行相干解调（课后问题2）

相干解调仅适用于NBFM，线性调制中的相干解调，如下图所示：



设窄带调频信号为

$$s_{NBFM} = A \cos \omega_c t - A \left[ K_f \int m(\tau) d\tau \right] \cdot \sin \omega_c t$$

相干载波为

$$c(t) = -\sin \omega_c t$$

相乘器的输出为

$$s_p(t) = -\frac{A}{2} \sin 2\omega_c t + \frac{A}{2} [K_f \int m(\tau) d\tau] (1 - \cos 2\omega_c t)$$

经过低通滤波器得到低频分量

$$s_d(t) = \frac{A}{2} K_f \int m(\tau) d\tau$$

微分后即可得到解调输出

$$m_0(t) = \frac{AK_f}{2} m(t)$$

4. 仿真时与USRP在真实信道中传输，接收解调后的波形有什么不同？最主要的原因是什么？可以采用哪些方法来减小信号失真？

仿真时候的解调波形非常完美，能够无失真的恢复基带信号，而USRP的解调波形会有很大的噪声。在对USRP输出数据进行解调后发现时域波形不是很好辨认出是否有清晰的信号，但是通过频谱可以发现在所设的基频除有一个幅度较大的分量，也就是说通过频谱能够辨认基带信号是存在的，而且幅度比其他噪声要大。我们认为主要的原因在于电脑仿真是非常理想的情况，而现实的场景中，存在着许多的噪声，USRP内部的电路可能有一定的混频电路，导致信号没有很好的解调。当然可能也存在着一定的干扰杂波信号。其次，仪器本身的参数和天线的角度设置也会某种程度上使得噪声更加明显。在信号输出的时候再将信号通过一个低通滤波器，能减小信号失真，或尝试将输出信号的频偏系数调小。

实验二：

1. IQ调制原理是什么？

IQ调制的本质是使用两路正交的载波。基带处理单元在复数域上生成两路独立的基带信号作为复数信号的实部和虚部，再分别将两路基带信号调制在正交的同频载波上发送。

对经FM调制的带通信号

$$s_{FM}(t) = A \cos(2\pi f_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

改写为复指数形式 $s(t) = \text{Re}[s(t)e^{j\omega t}]$ ，则由 $s(t) = I(t) + jQ(t)$ ，可得到正交的两个信号为：

$$\begin{aligned} I(t) &= A \cos(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau)) \\ Q(t) &= A \sin(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau)) \end{aligned}$$

将两个信号离散化得到：

$$I[n] = A \cos(K_{FM} \sum_{k=0}^n \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s})$$

$$Q(t) = A \sin(K_{FM} \sum_{k=0}^n \sin(2\pi f_b \frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s})$$

2. 角度调制是线性还是非线性调制，为什么：

角度调制是非线性调制，因为角度调制都表现为调制信号使载波瞬时相位的变化，已调信号的频谱不再是原调制信号频谱的线性搬移，会产生与频谱搬移不同的新的频率成分。

3. 与AM相比，FM的频带利用率更高还是更低：

AM调制的传输带宽为 $2f_m$ ，FM的传输带宽为 $2(m_f + 1)f_m$ ，可见，FM的频带利用率更低

4. 与AM相比，FM的抗噪声性能更好还是更差，为什么

AM的信噪比为 $\frac{1}{3}(\frac{S_i}{n_o f_m})$ ，FM的信噪比为 $\frac{3}{2}m_f^2(\frac{S_i}{n_o f_m})$ ，故而FM的抗噪声性能更好。

## 课后习题

课后习题1、2已在上面回答过

3. 思考IQ率在FM调制中起的作用，比较使用基于IQ调制方式FM调制信号的生成和传统模拟FM调制信号生成过程的不同

IQ rate 的定义为 $\frac{1}{\tau}$ ， $\tau$ 为相邻采样时间间隔，IQ rate决定了USRP硬件对信号的发送速度，等效于对信号进行采样发送，应该根据计算机处理速度和信号频率等参数取值，若设置过大可能导致USRP缓存溢出报错。

IQ调制的信号生成过程为：对经FM调制的带通信号

$$s_{FM}(t) = A \cos(2\pi f_c t + K_{FM} \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

改写为复指数形式 $s(t) = \text{Re}[s(t)e^{j\omega t}]$ ，则由 $s(t) = I(t) + jQ(t)$ ，可得到正交的两个信号为：

$$I(t) = A \cos(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau))$$

$$Q(t) = A \sin(K_{FM} \int_{-\infty}^t \sin(2\pi f_b \tau d\tau))$$

FM调制信号的生成过程为

$$s_{FM}(t) = A \cos[\omega_c t + K_f A_m \int \cos \omega_m \tau d\tau] = A \cos[\omega_c t + m_f \sin \omega_m t]$$

1. 如何更改程序使用USRP进行发送和接收，在基于USRP的平台上调试程序，分析差错原因，记录调试中发生的故障及其排除方法。

在FM调制解调模块添加USRP发送控制组件（USRP发送数据VI、USRP接收数据VI、RX运行接收和停止接收VI）

最初在我们按照书上的指导连接USRP发送与接收模块后，得不出相应的波形。经调试发现是因为我们在输出波形时没有使用波形生成工具，没法将波形的幅值与dt联系起来，在使用工具后得到了相应的波形。

## 六、实验心得

本次实验分为两个部分：使用LabVIEW编写FM信号调制与解调程序、利用USRP实现对FM广播信号的解调。

编写FM调制和解调程序的过程并不顺利，虽然在通信原理的理论课上学习过FM调制和解调的基本思路和实现方法，但实际使用LabVIEW编程来实现它时，却仍有些无从下手；LabVIEW的图形化编程带来了许多便利，但是同时也要求同学们对软件的使用更加熟悉，如果没有做好课前预习，许多控件和函数的位置难以找到，会大大增加实验的时间成本。

利用USRP实现对FM广播信号的解调，更是令我们直呼“痛苦”。首先，我们选择试验台时没有注意台上的USRP型号是2922，老师强调要使用2920后，我们才临时更换座位，原本上课前连了一半的LabVIEW FM接收机程序也由于忘记带U盘没有拷贝下来，只能更换电脑重新连接。其次，USRP硬件果然如老师说的一样事故频出，我们的电脑就算设置好了网络依然搜索不到USRP，就算运气较好搜索成功，打开编好的程序也依然接收不到信号。无奈之下只能选用邻座同学的电脑，却发现同样的程序居然成功接收到了信号，才总算是验收成功。本次实验告诉了我们，做实验要做好课前预习，就算碰到问题也不要着急，也许就和老师说的一样是“运气不好”，多试几遍也许就能成功。