

## 实验[2] 频率调制与解调

完成者姓名：冯绍庭

学号：520021911362

### 1. 实验目的

熟练掌握频率调制的基本原理和数学表达。  
通过实验加深对调频信号频域特性的认识和理解。  
建立关于数字调制的初步认知。

### 2. 实验主要器材和设备

电脑，LabVIEW 程序开发和应用环境。

### 3. 实验系统构成

虚拟仿真实验系统之构成如图 3.1 所示。我将调制与解调程序打包成一个子 VI。在主程序中，根据当前选项卡状态和输入参数产生调制信号，经过子 VI 处理得到我们想要的输出波形图和参数，延时两秒，程序无限循环运行。

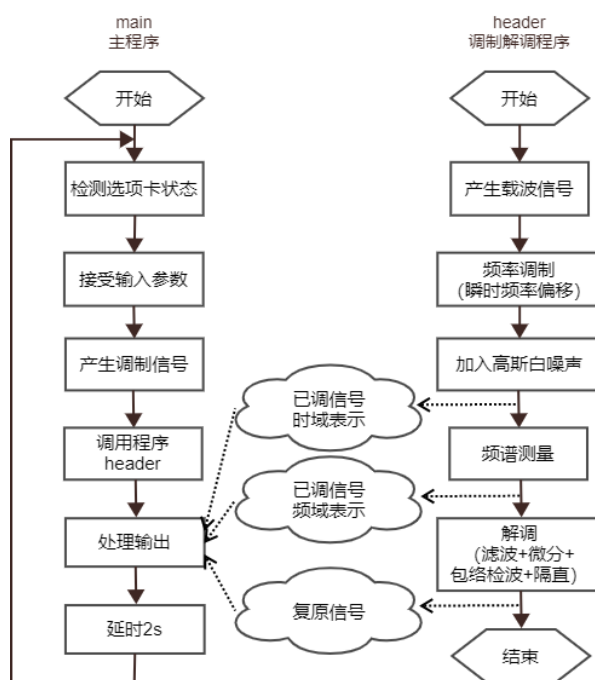


图 3.1 虚拟仿真实验系统之构成

### 4. 实验任务的完成情况

#### 4.1. 实验任务 2\_1

设计核心思路在于三角函数和差化积运算，已调信号可以转换为

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \cos(k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) - A_c \sin(2\pi f_c t) \sin(k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (1)$$

调制信号和已调信号在同一坐标系如图 4.1 中展示，可以发现已调信号疏密相间。以 1s 为周期，循环连续刷新。

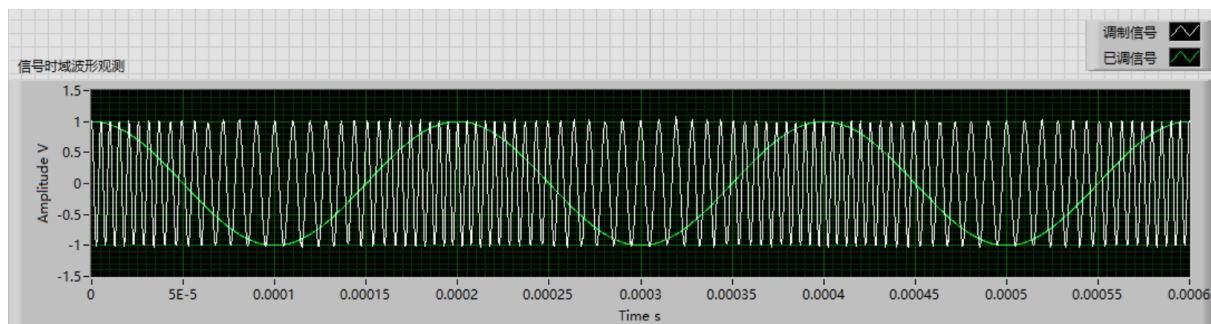


图 4.1 任务 2\_1 信号时域波形观测

已调信号频域波形观测如图 4.2 中展示。频域波形图横轴为频率，采用线性坐标；竖轴为幅度，采用对数坐标。

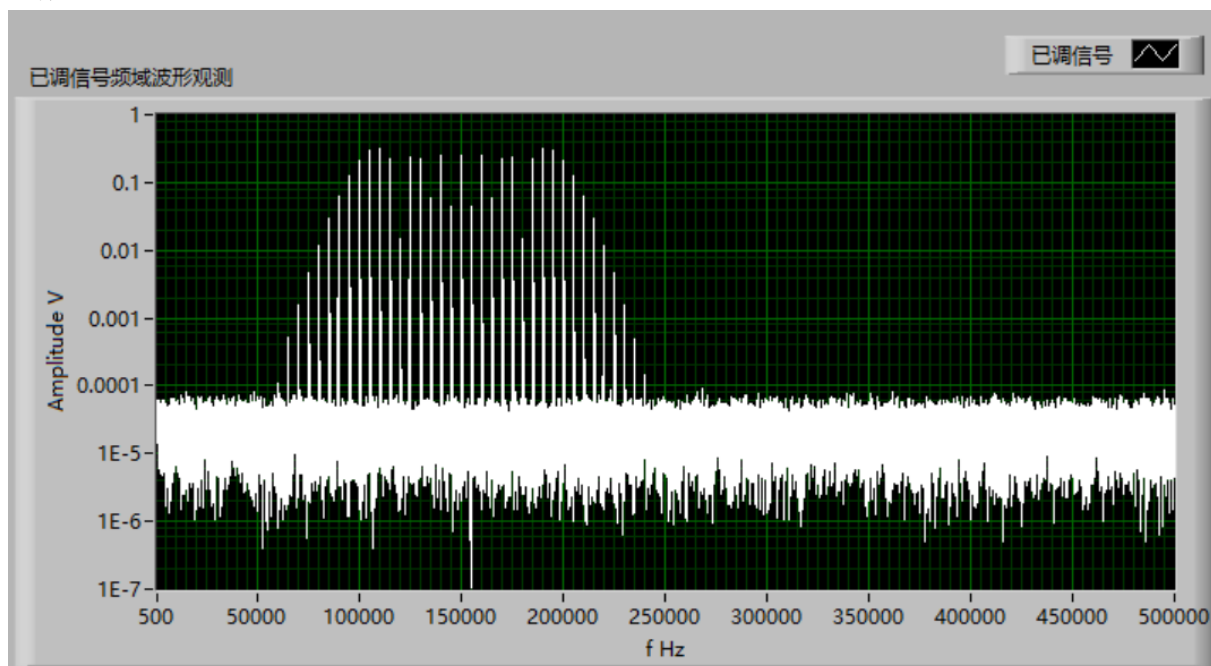


图 4.2 任务 2\_1 已调信号频域波形观测

可以看出已调信号频谱在 $f_c$ 两侧，以 $f_m$ 为间隔，产生多个脉冲。保留边带幅度为载波幅度 10% 以上的有用边带分量，测量带宽为 110kHz，与理论计算得到的带宽相同。首先计算载波幅度的 10% 作为阈值，再使用 VI 记录边带幅度大于阈值的数组下标，根据采样率和采样数，得到下标对应的频率值。这些频率值的值域就是带宽，我们只需要用记录到的最大频率减去最小频率即可得到带宽的实测值。使用的核心器件路径为：

Signal Processing/Sig Operation/Threshold Detector

Programming/Array/Max & Min

理论值为

$$B = 2 \left( \frac{A_m k_f}{2\pi f_m} + 1 \right) f_m \quad (2)$$

根据实验得出的已调信号带宽设置带通滤波器，也就是设置 Lower Cut-Off 为 205kHz，发现信号出现明显的失真，这说明我保留的频率分量太少了。但是如果把 Lower Cut-Off 设置得太高，就会出现噪声也就是毛刺。综合毛刺和失真，我把 Lower Cut-Off 设置为 280kHz。解调信号波形如图 4.3 所示，可明显观察到初始暂态现象。如果不加前置滤波器，信号毛刺（抖动）非常严重，是高斯白噪声影响，波形图如图 4.4 所示。

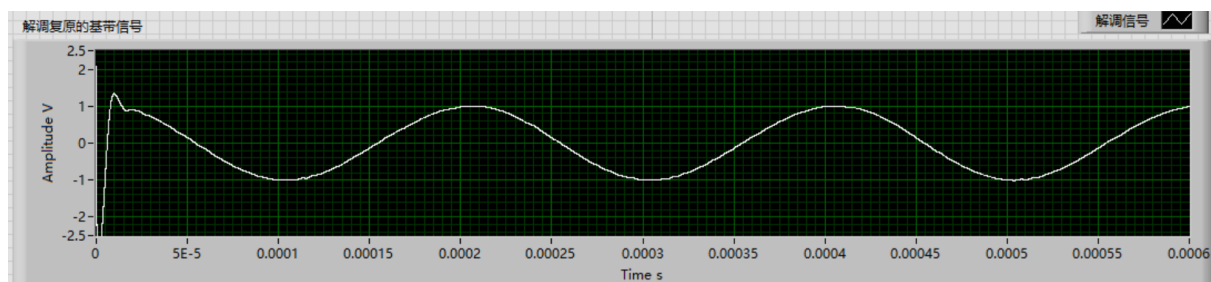


图 4.3 任务 2\_1 解调复原的基带信号（接前置滤波器）

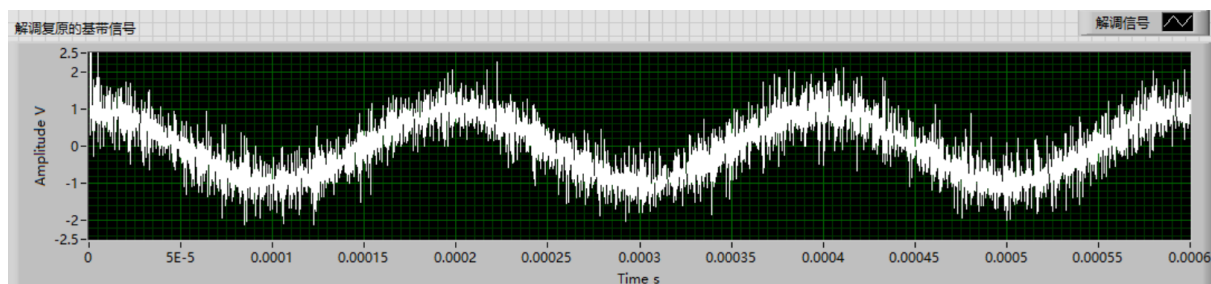
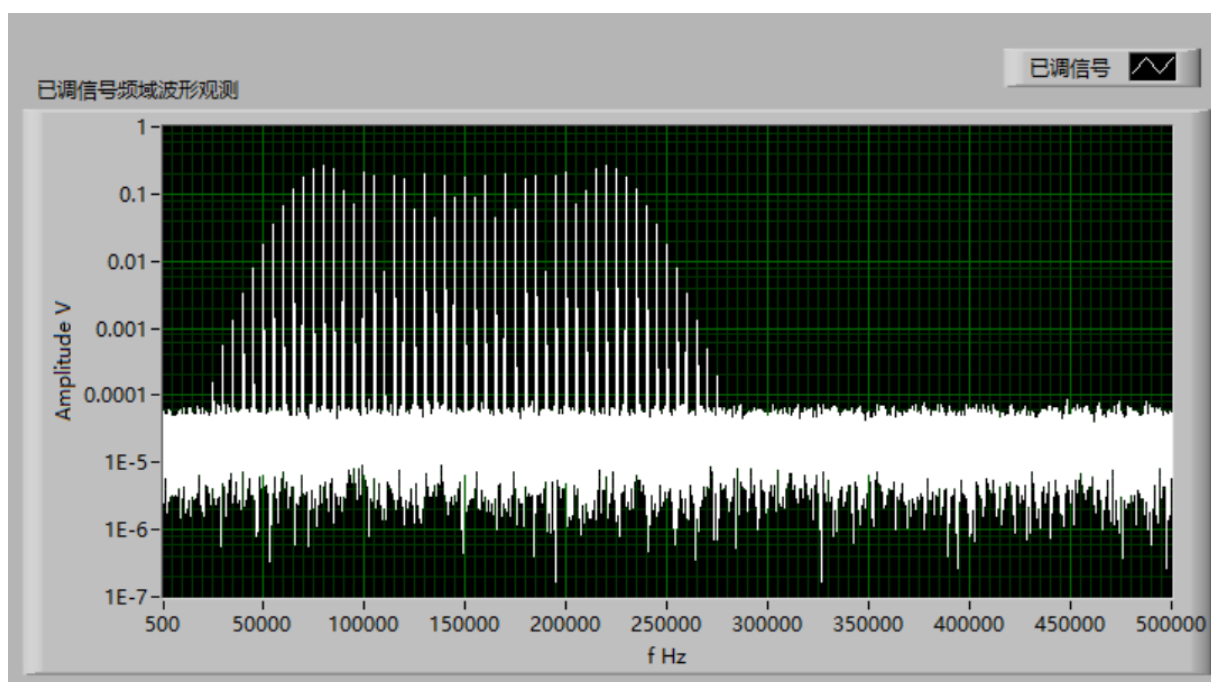


图 4.4 任务 2\_1 解调复原的基带信号（不接前置滤波器）

增大 $k_f$ 的值引起失真有两个原因：低通滤波频率未增加和频域混叠。我们先讨论低通滤波。

理论分析，增大 $k_f$ 的值， $\beta$ 增大， $J(\beta)$ 不可忽略的范围 $n$ 增大，带宽增大。如果低通滤波器 Lower Cut-Off 频率未相应增加，已调信号的部分信息被滤去，会发生失真现象，所以低通滤波器 Lower Cut-Off 频率需要相应增加。

图 4.5 任务 2\_1 已调信号频域波形 ( $k_f = 80\text{kHz/V}$ )

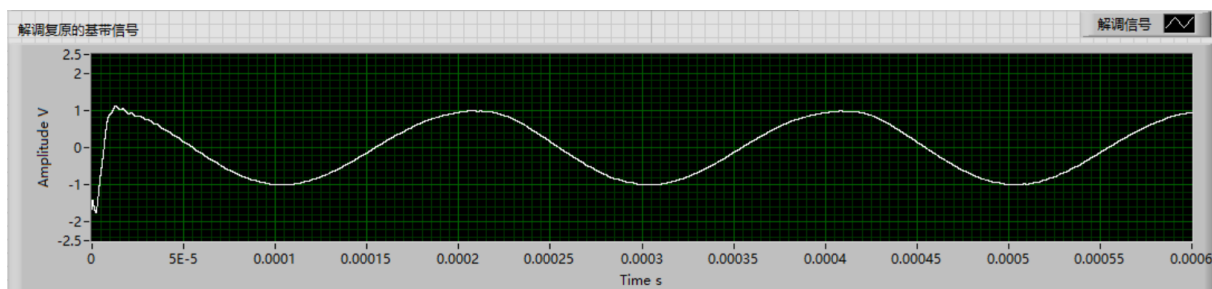


图 4.6 任务 2\_1 解调复原的基带信号 ( $k_f = 80\text{kHz/V}$ , 截止频率 280kHz)

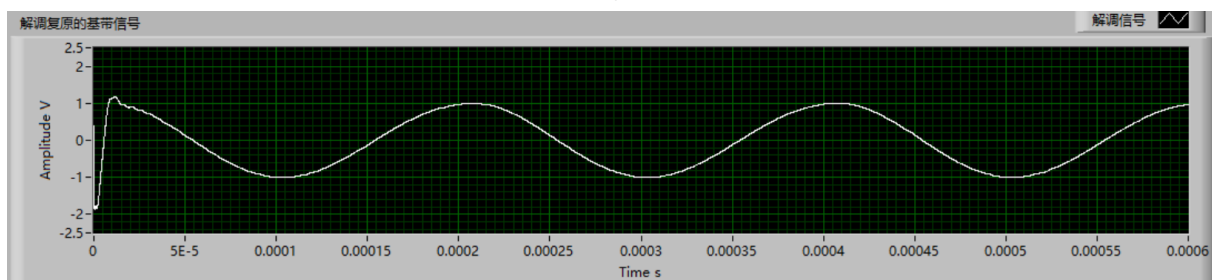


图 4.7 任务 2\_1 解调复原的基带信号 ( $k_f = 80\text{kHz/V}$ , 截止频率 300kHz)

图 4.5 展示了  $k_f = 80\text{kHz/V}$  的已调信号的频谱，不可忽略的边带范围扩大。如果不提高截止频率，图 4.6 的波峰会发生偏移（失真），图 4.7 提高了截止频率就解决了这个问题。接下来，我们都把低通滤波器截止频率调到合适的值。

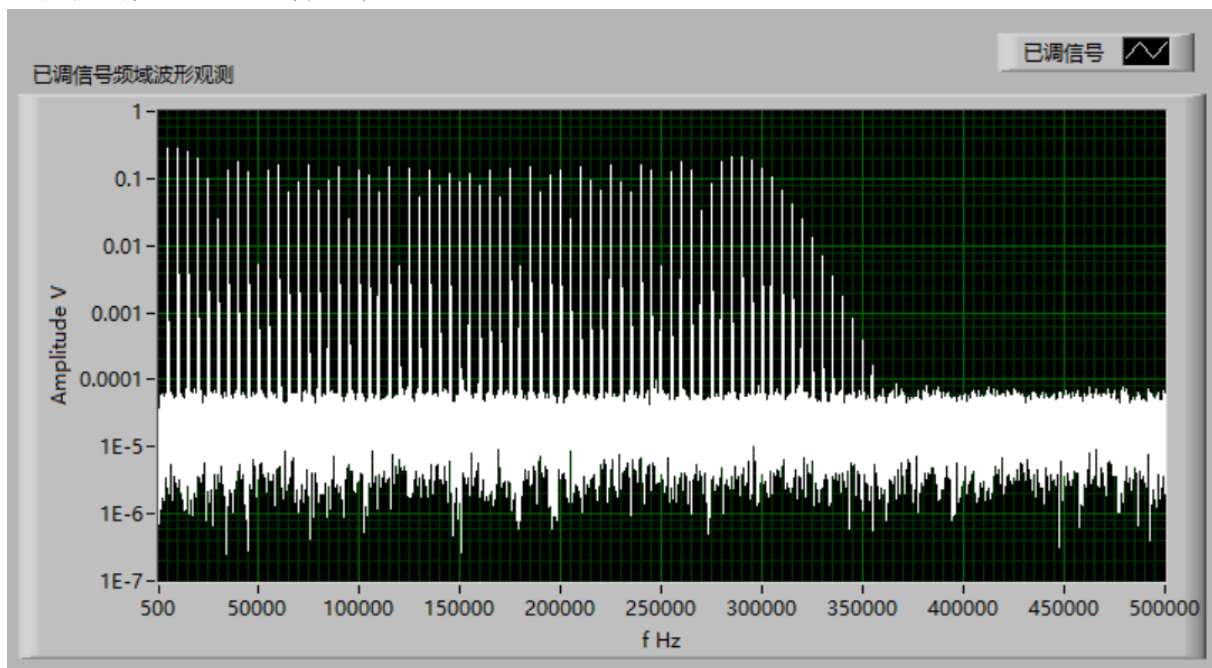


图 4.8 任务 2\_1 已调信号频域波形 ( $k_f = 150\text{kHz/V}$ )

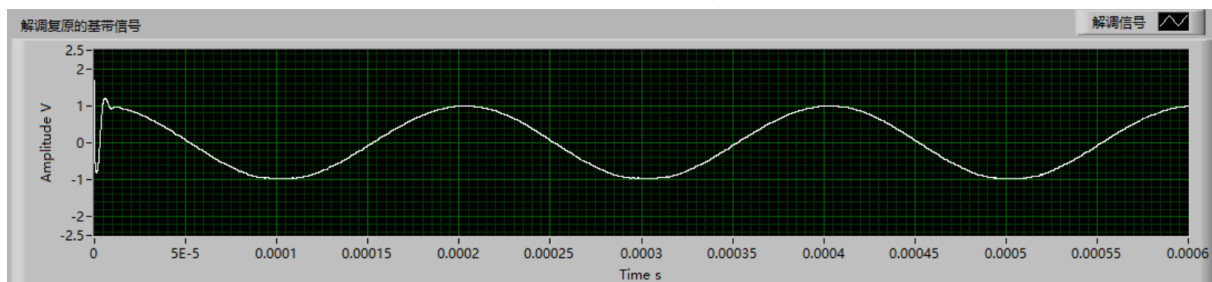
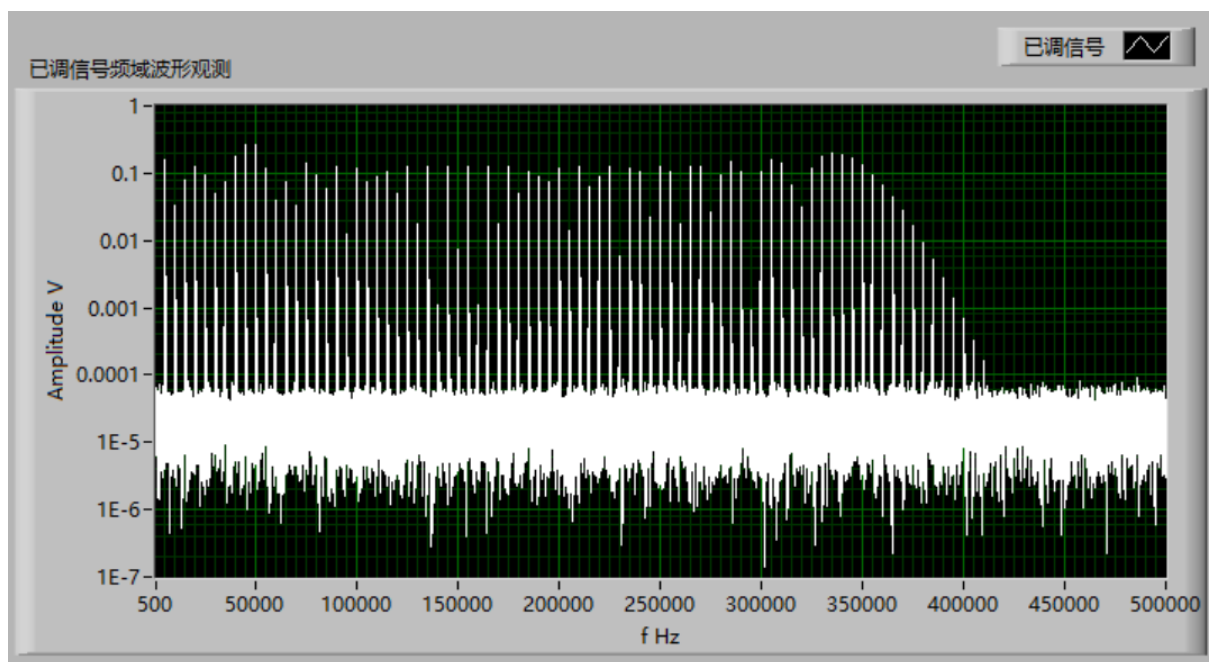
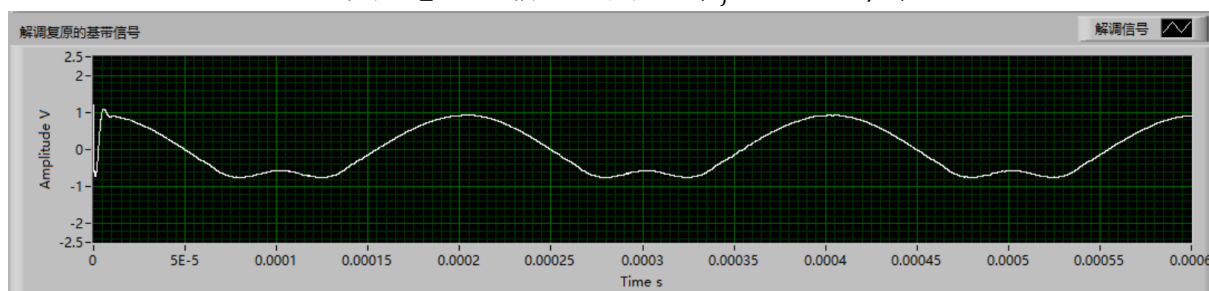


图 4.9 任务 2\_1 解调复原的基带信号 ( $k_f = 150\text{kHz/V}$ , 截止频率 450kHz)

图 4.10 任务 2\_1 已调信号频域波形 ( $k_f = 200\text{kHz/V}$ )图 4.11 任务 2\_1 解调复原的基带信号 ( $k_f = 200\text{kHz/V}$ , 截止频率 500kHz)

观察图 4.8-4.11, 图 4.8 和图 4.10 都发生了频域混叠。具体来说, 带宽增加, 正负频域在  $f=0$  附近发生了重叠。我们计算一下发生按照带宽计算频谱混叠失真的阈值。

$$B = 2 \left( \frac{A_m k_{f0}}{2\pi f_m} + 1 \right) f_m = 2f_c \quad (3)$$

$$k_{f0} = \frac{2\pi \left( \frac{f_c}{f_m} - 1 \right) f_m}{A_m} \quad (4)$$

解出  $k_{f0} = 145\text{kHz/V}$  是阈值,  $k_f = 150\text{kHz/V}$  基本没有失真如图 4.9,  $k_f = 200\text{kHz/V}$  失真了如图 4.11。时域解释如图 4.12。

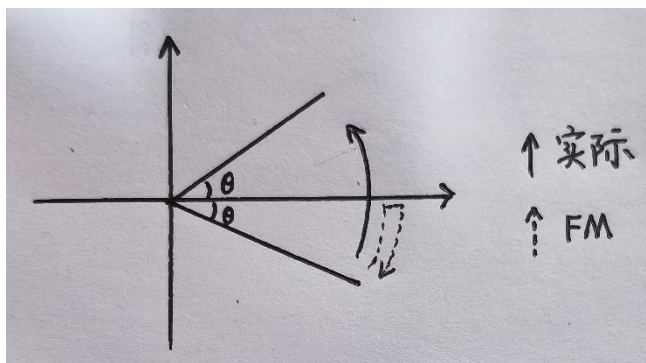


图 4.12 时域解释正负频谱混叠

频谱在载波频率右端没有问题，所以波峰没有问题；载波频率左端频谱混叠，所以波谷像是“翻了上去”。

4.2. 实验任务 2\_2

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图如图 4.13 中展示。已调信号频域波形观测如图 4.14。

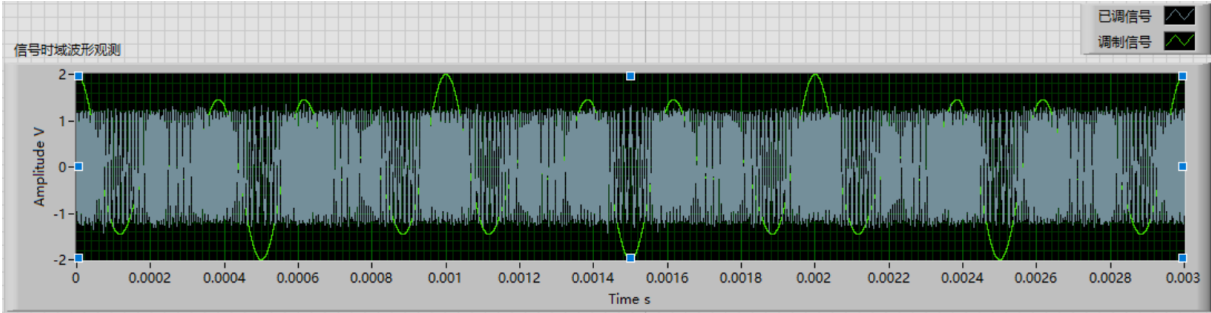


图 4.13 任务 2\_2 信号时域波形观测

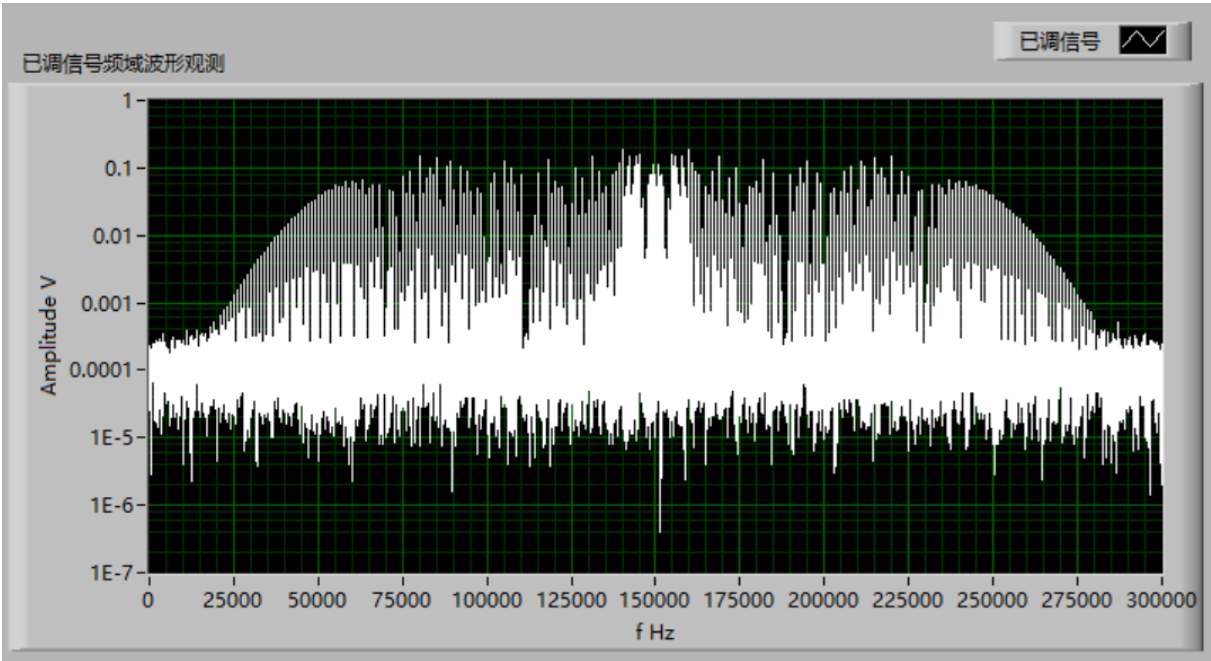


图 4.14 任务 2\_2 已调信号频域波形观测

如图 4.15 所示，解调信号的噪声引起的毛刺在有滤波器的情况下，仍然比较严重。目前的 Lower Cut-Off 频率选取为 330kHz，从频谱图中可以看出，这个频率不能设置得更低了，实验也验证了更低的截止频率会有明显的失真。噪声干扰严重主要是由于标准差比任务 2\_1 大了一个数量级。此外，也可明显观察到初始暂态现象。

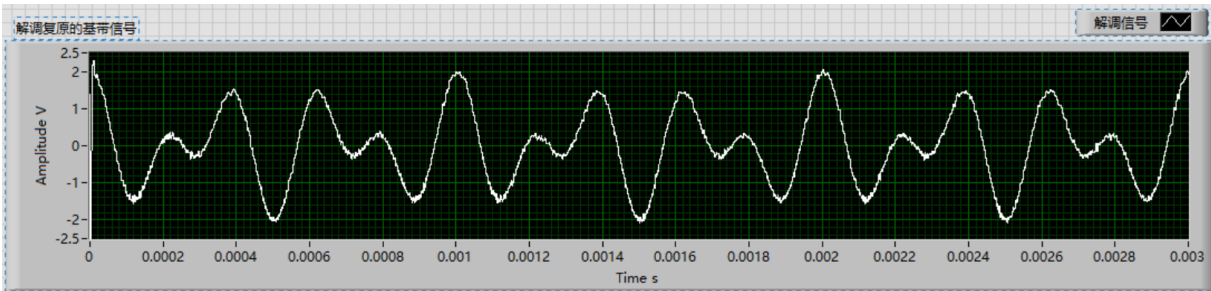


图 4.15 任务 2\_2 解调复原的基带信号



4.3. 实验任务 2\_3

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图图 4.16 中展示。已调信号频域波形观测如图 4.17。

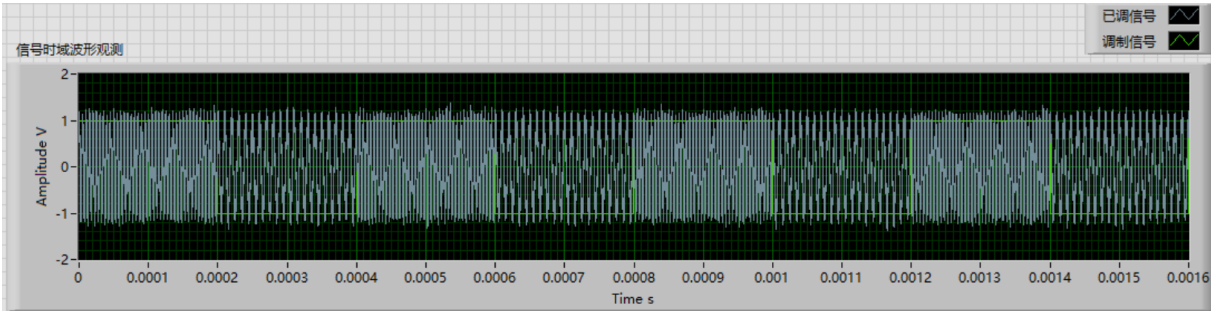


图 4.16 任务 2\_3 信号时域波形观测

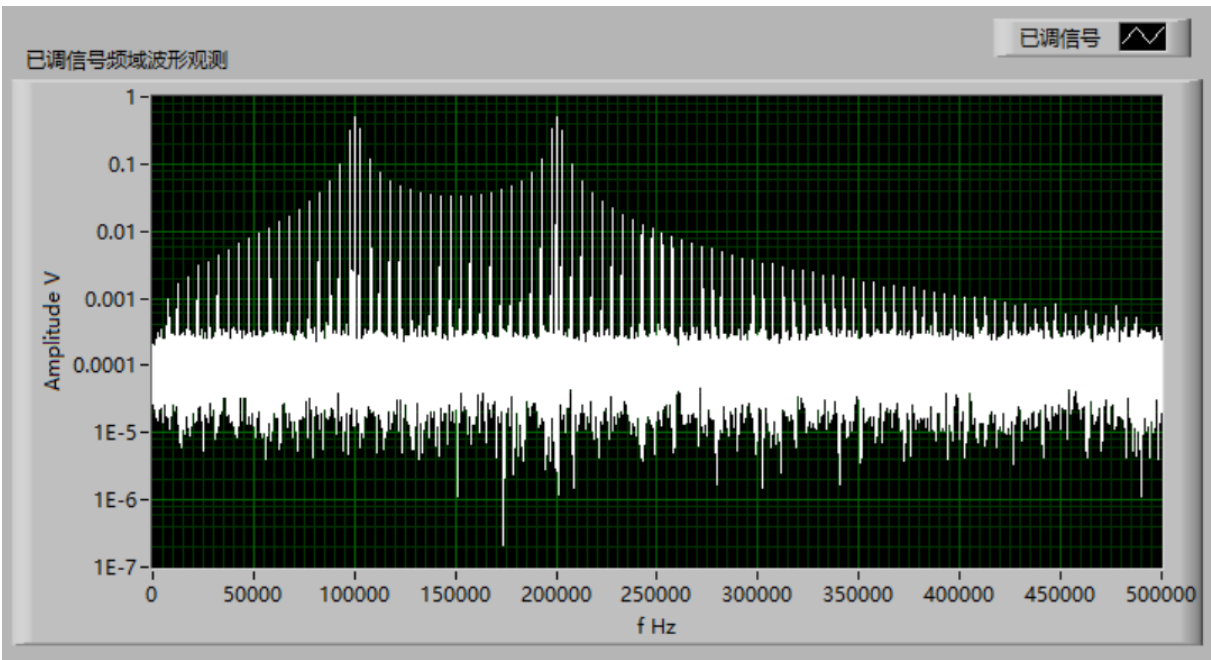


图 4.17 任务 2\_3 已调信号频域波形观测

如图 4.18 所示，解调信号与基带信号是三角函数时最大的差异是每次高低电平转换时，暂态效应都比较明显。调高截止频率可以减轻暂态效应，但是毛刺会大大加重。权衡后，我选择了 280kHz 作为截止频率。

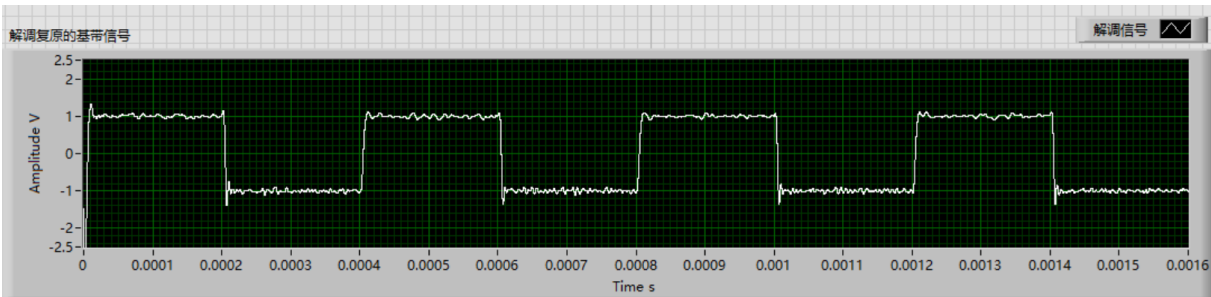


图 4.18 任务 2\_3 解调复原的基带信号

4.4. 实验任务 2\_4

基带信号可以由两个方波信号叠加而成，我们需要设置两个方波信号不同的 offset、phase 和

duty cycle，如图 4.19 所示。

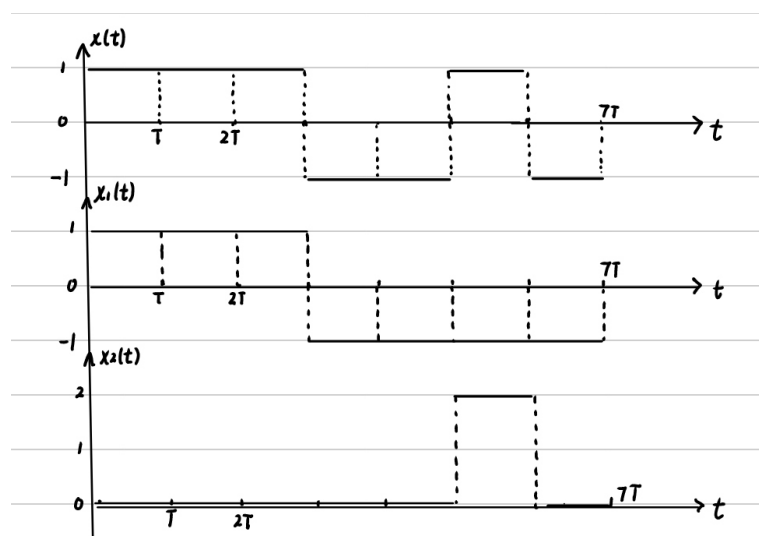


图 4.19 任务 2.3 基带信号的产生 ( $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ )

此外，由于我们的程序需要循环运行，两个方波发生器 VI 的 reset signal 也要设置为真。将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图图 4.20 中展示。已调信号频域波形观测如图 4.21。

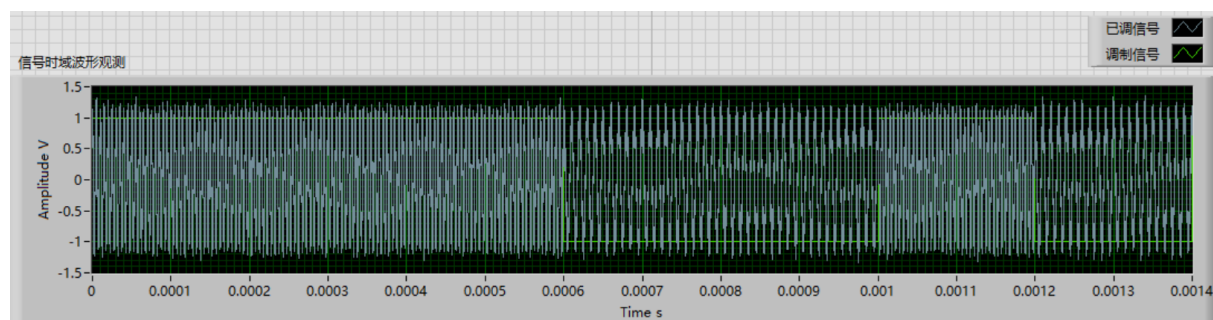


图 4.20 任务 2\_4 信号时域波形观测

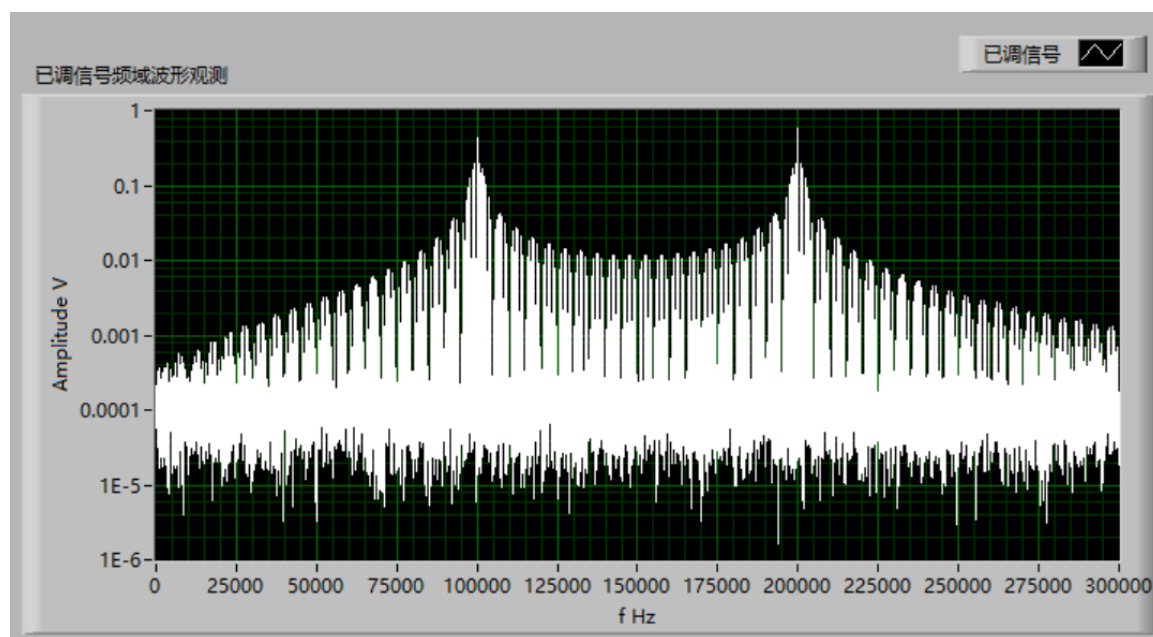


图 4.21 任务 2\_4 已调信号频域波形观测



复原的基带信号的时域波形如图 4.22 所示。截止频率选择 280kHz。

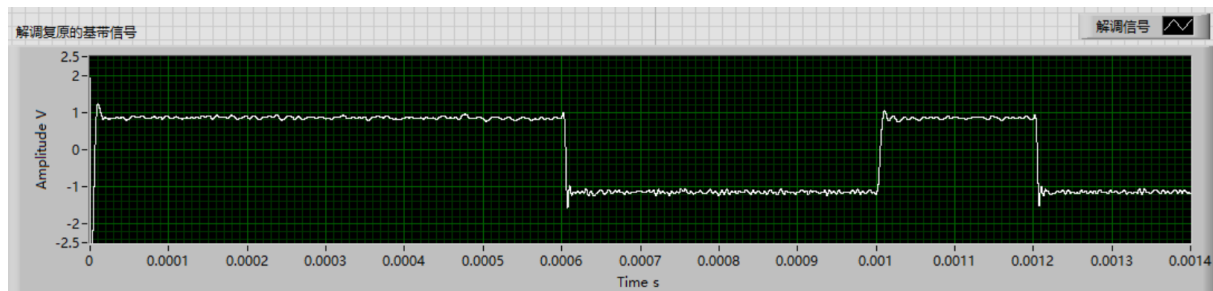


图 4.22 任务 2\_4 解调复原的基带信号

## 5. 系统前面板和主要程序框图

调制程序以图 5.1 为例，设计核心思路在于三角函数和差化积运算；解调程序以图 5.2 为例；带宽测量程序以图 5.3 为例；任务 2\_4 中基带信号的产生如图 5.4；打包后的程序面板如图 5.5。

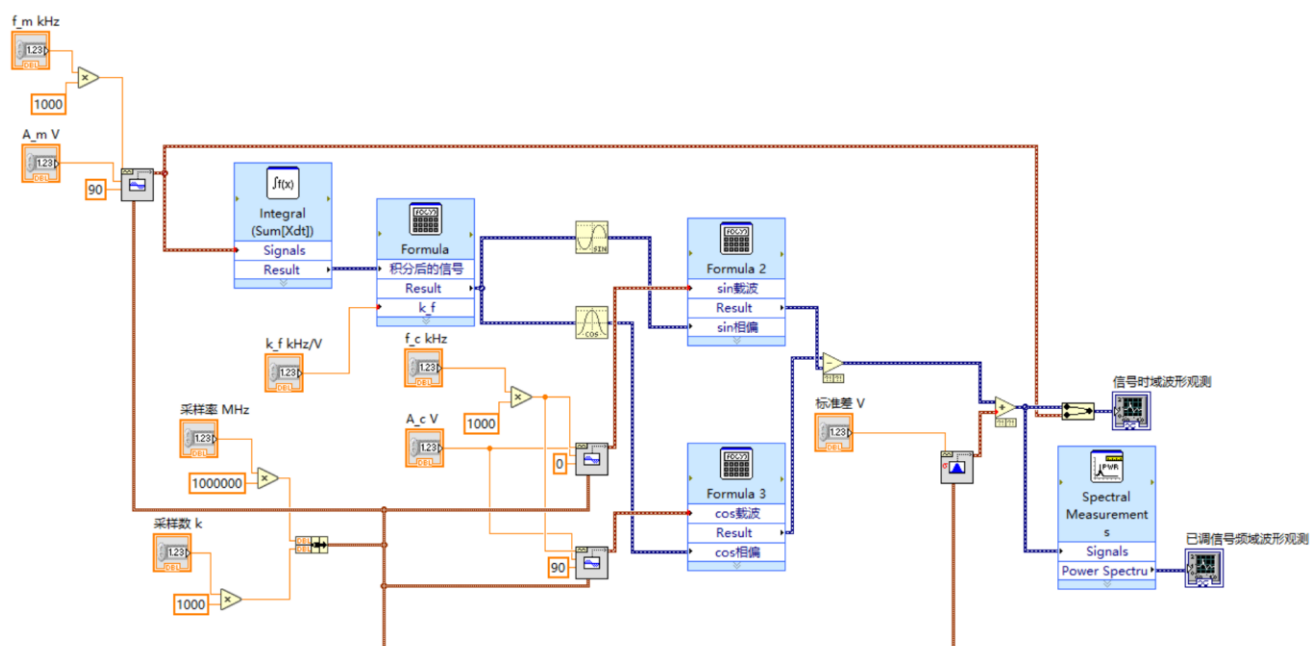


图 5.1 FM 调制程序面板（以 2\_1 为例）

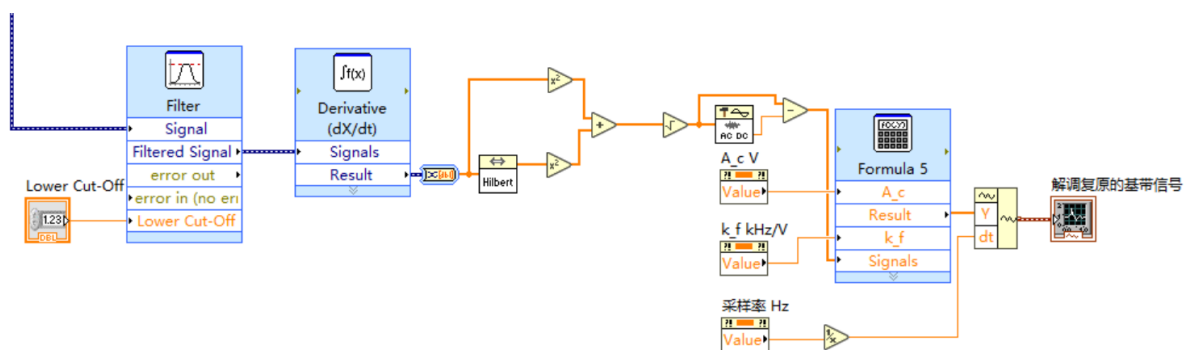


图 5.2 FM 解调程序面板（以 2\_1 为例）

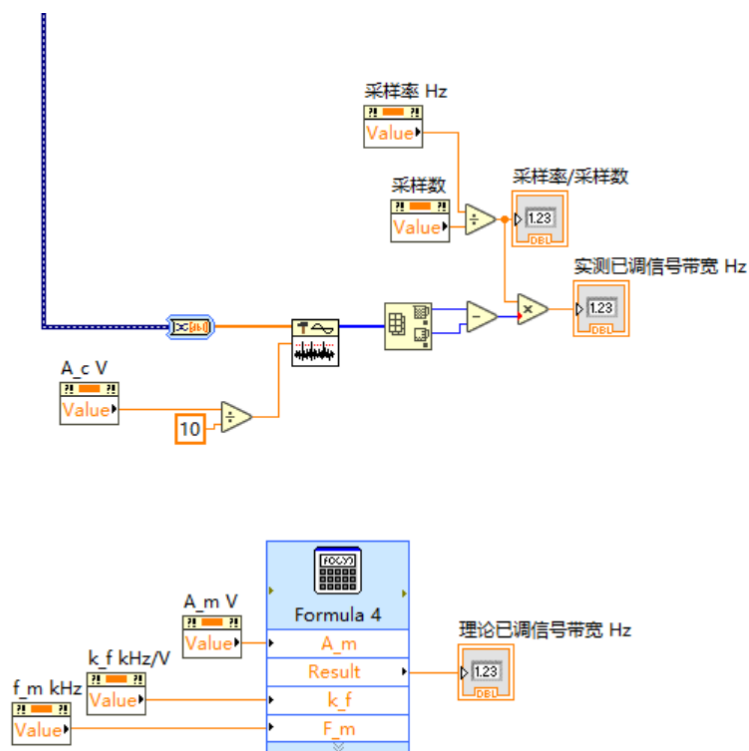


图 5.3 理论与实测已调信号带宽程序面板（以 2\_1 为例）

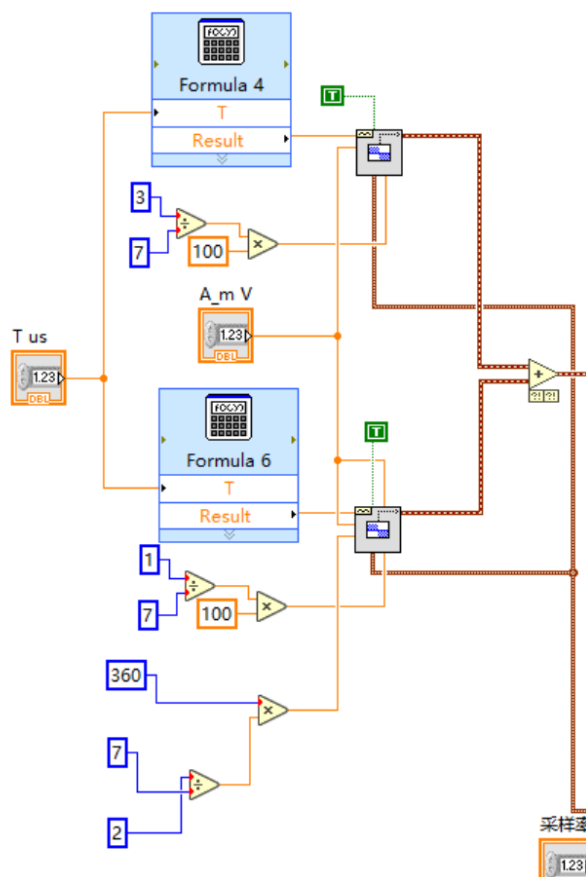


图 5.4 任务 2\_4 中基带信号的产生

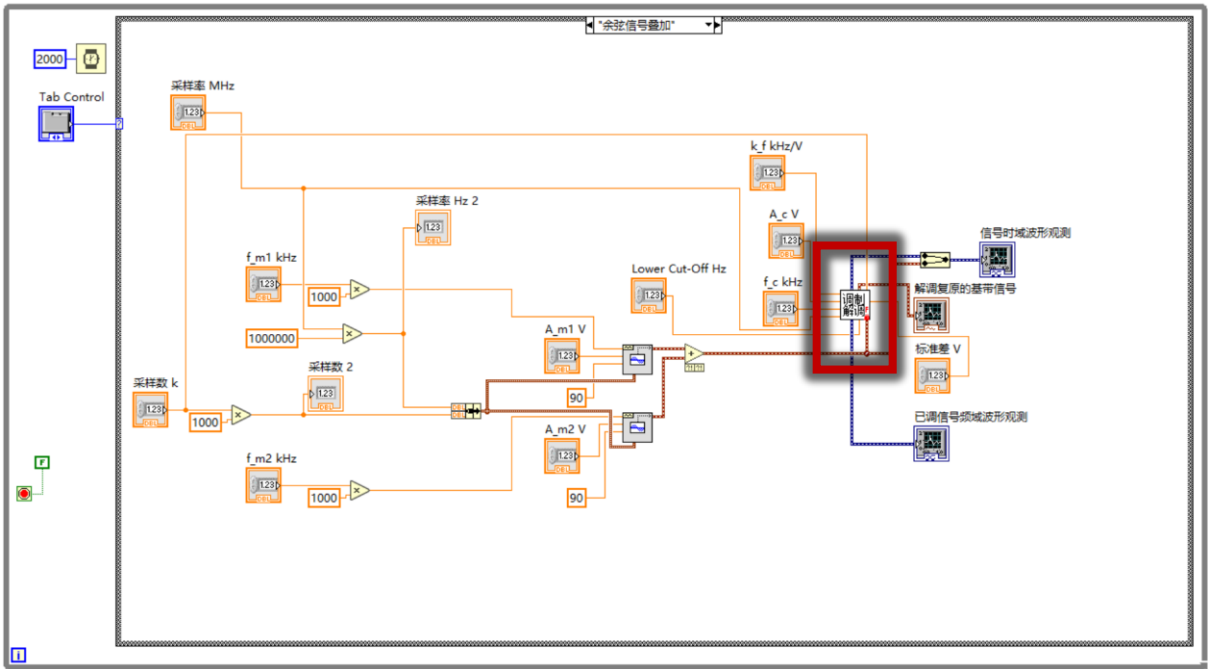


图 5.5 打包后的程序面板（以任务 2\_2 为例）

程序前面板以图 5.5 和图 5.6 为例。

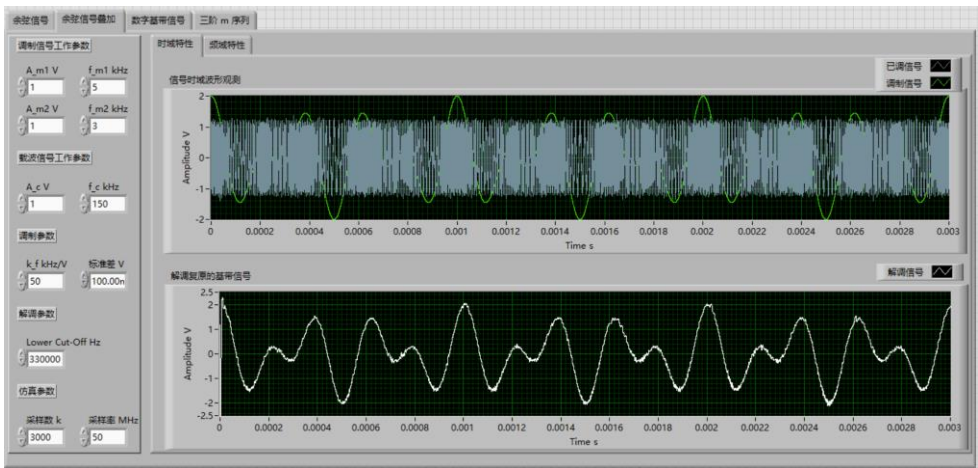


图 5.5 前面板示例图 1

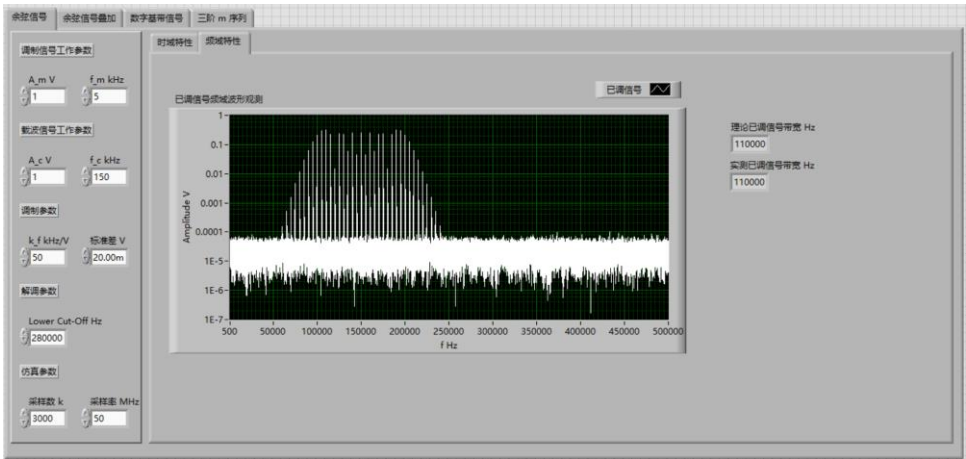


图 5.6 前面板示例图 2

6. 拓展探究

使用计算机声卡作为信号的输入输出端口，调制声卡的输入信号，把输出信号通过声卡播放出去。程序以 5 秒的输入声音为一个处理周期，循环运行，不断调制解调输入信号再进行输出，所以用户不必在意周期为 5 秒。**附件**是我对 sound card 程序的测试，前大约 5 秒为人声进行输入，后面是计算机调制解调后的输出。

我们需要调参 $k_f$ ， $k_f$ 太大会出现正负频谱混叠， $k_f$ 太小会调制失败。将 $k_f$ 调至 1kHz/V。程序输出及前面板如图 6.1 所示，程序面板如图 6.2 所示。

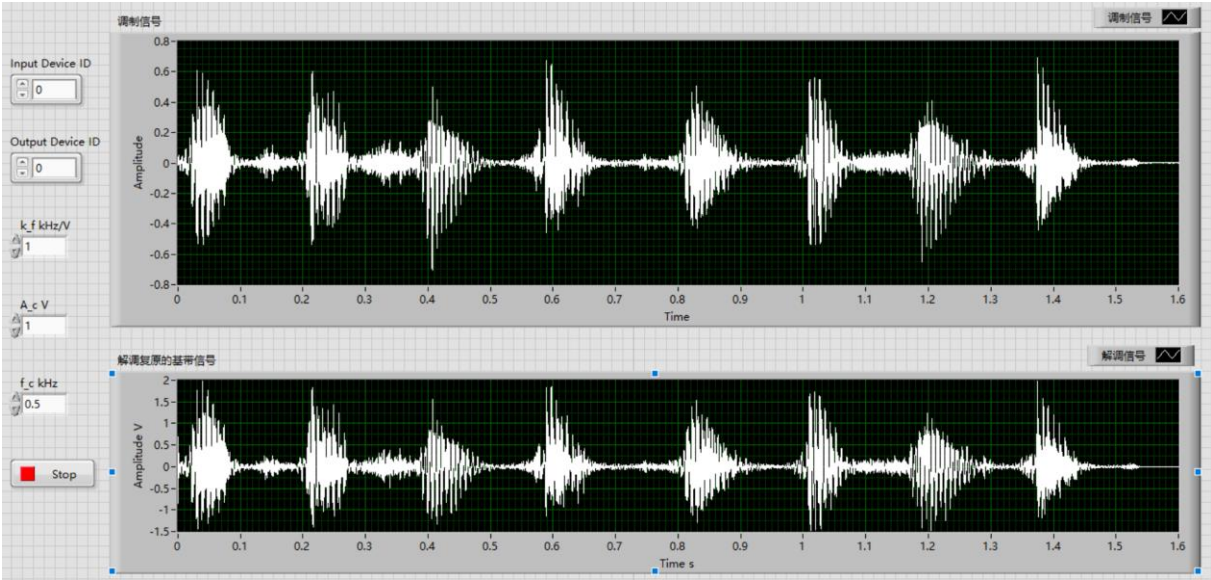


图 6.1 声卡调制解调程序输出及前面板

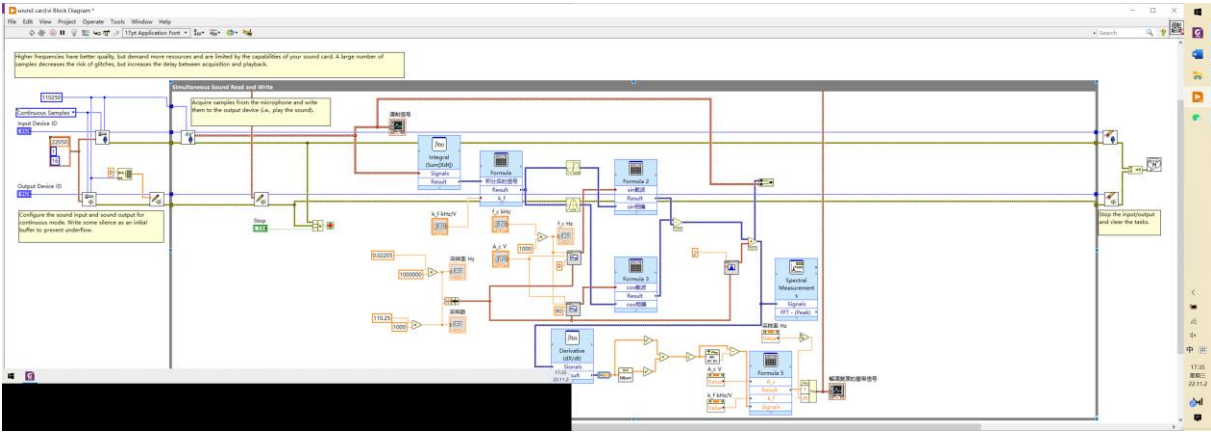


图 6.2 声卡调制解调程序面板

7. 实验心得

这次的 labview 实验是一个突破，以前的实验作业的目的基本都是熟悉软件，而这次是应用了信息工程的本行知识——通信原理中的 FM 调制与解调。在做实验之前，我对这部分知识更多是理解后背了公式，但现在我更深入地理解了这部分知识，比如 $k_f$ 与频谱等等。此外，我也对 FM 调制解调的每一步了熟于心。

说回程序与代码，我把 labview 的每一个 VI 当成一个函数，所以写起来与平时使用的 c++ 等并未感到太大使用上的区别，不过这个“天生”并行的语言挺有意思。但是感觉这次作业有关算法与逻辑的考察还不如有关搜索资料的考察多。搜索报错和搜索 VI 挺麻烦的（ctrl+h 只是如何使用，不算是

搜索), 感觉网上的资料不多。

做声卡部分成就感特别足, 尽管只是在同步输入输出声音的 demo 上增加了调制解调, 但我经历了选 demo、调参、试音, 实现后很高兴。调前面板就像是我之前做网页调 css, 认真做完看着成果的感觉也不错。