

通信原理实验二

何德轩 521030910063

F2103002

日期: October 17, 2023

1 实验目的

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

2 实验主要器材和设备

LabVIEW2018 程序开发和应用环境。

3 实验系统构成

本次实验使用的虚拟实验系统主要包括以下几个组成部分：

- 数据输入模块：用于输入调制信号、解调信号、滤波器等的幅频信息。
- 信号生成模块：用于生成所需的调制信号、噪声信号等。
- 调制模块：用于生成调制信号（以及添加噪声）并对其进行频谱分析。
- 滤波模块：用于解调前的抑制噪声滤波。
- 解调模块：用于对滤波后的调制信号进行解调以及分析。

另外，为了保证仿真信号的精细程度，如无另外说明，每一个实验任务中采样频率均取载波频率的 1000 倍。同时，基于实验任务书中的分析，在进行频谱分析时我们默认使用幅度（峰值）谱线且不进行加窗处理，解调前的滤波器一律使用 10 阶 Butterworth 带（低）通滤波器。

4 实验任务完成情况

4.1 2-1

由卡森定则计算有效带宽： $A_m = 1V, k_f = 50kHz/V, f_m = 5kHz$

$$\beta = \frac{A_m k_f}{2\pi f_m} \quad (1)$$

$$B_T \approx 2(\beta + 1)f_m \quad (2)$$

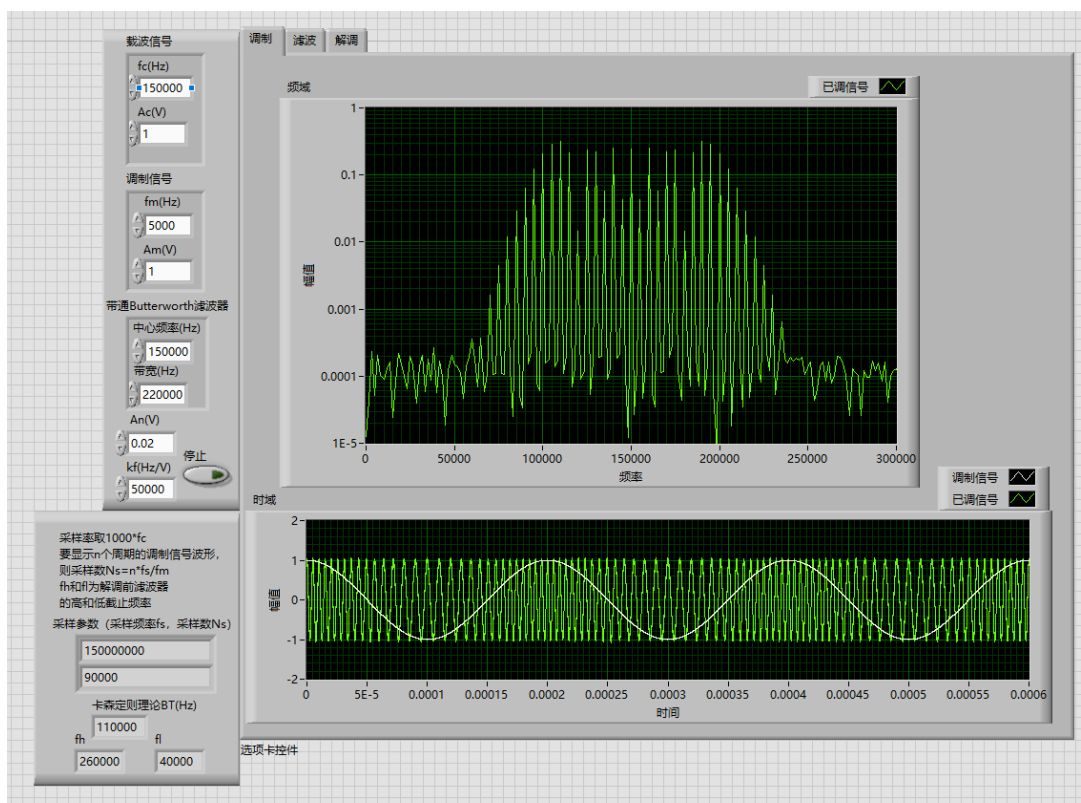


图 1: 调制信号时频域波形观察

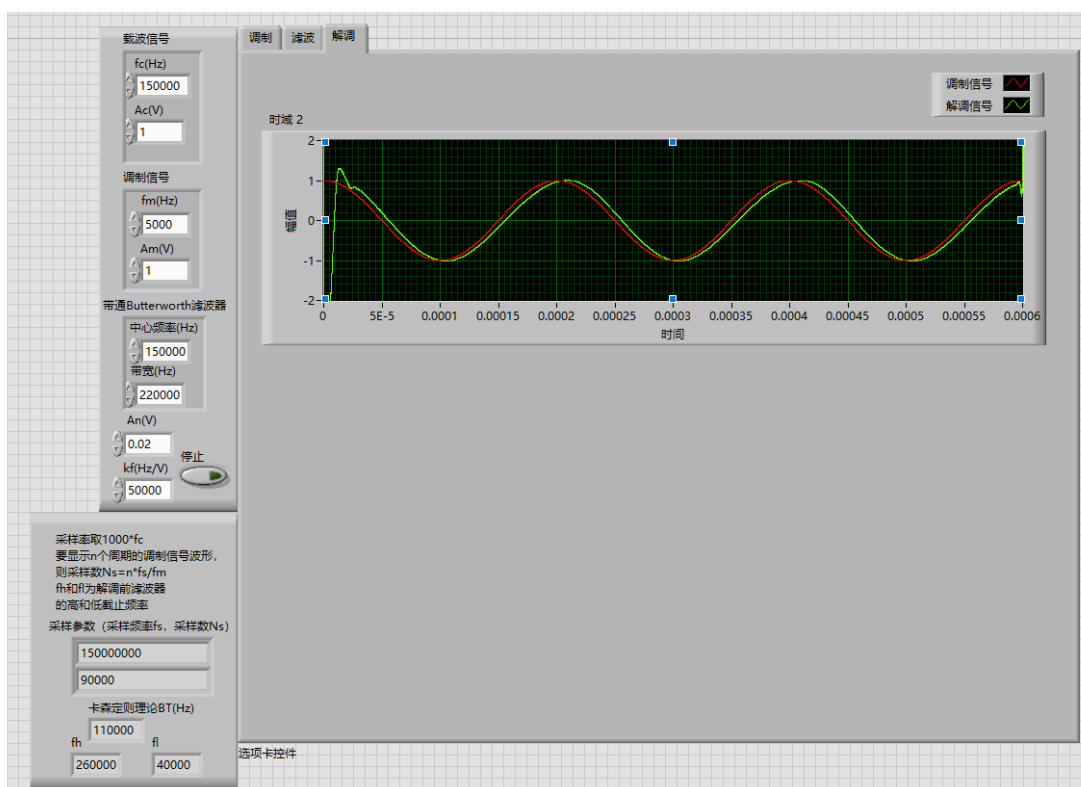


图 2: 解调波形观测对照

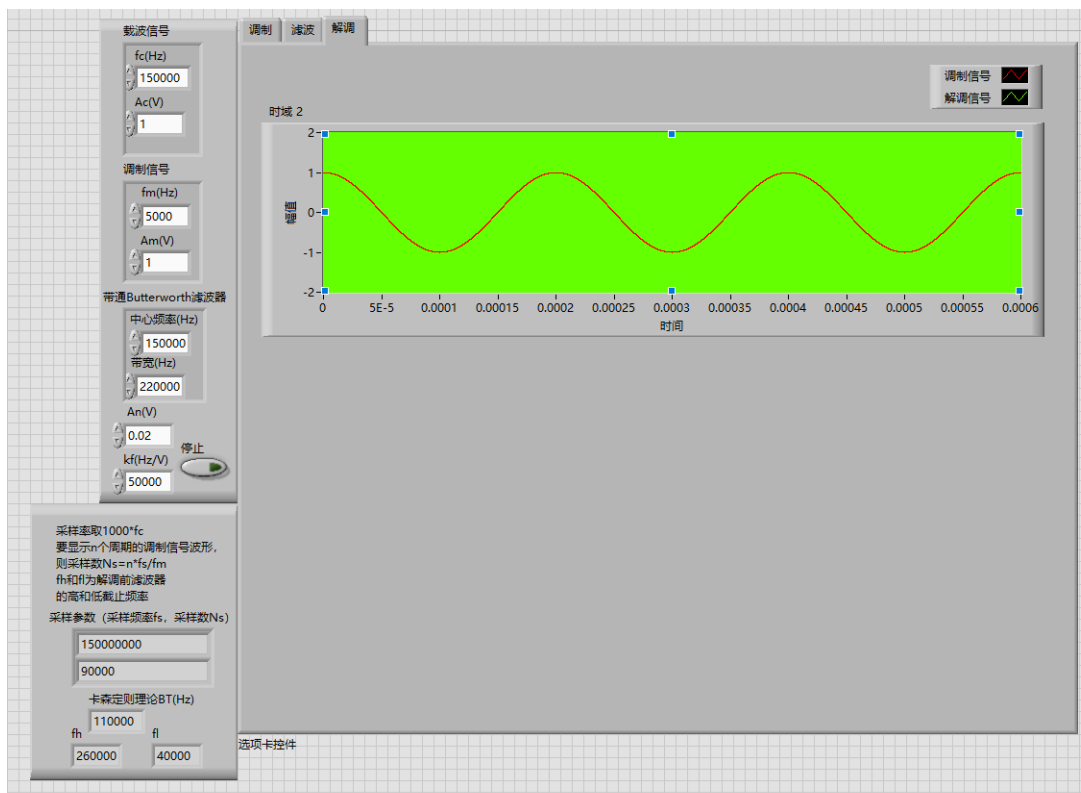


图 3: 无滤波解调（失败）

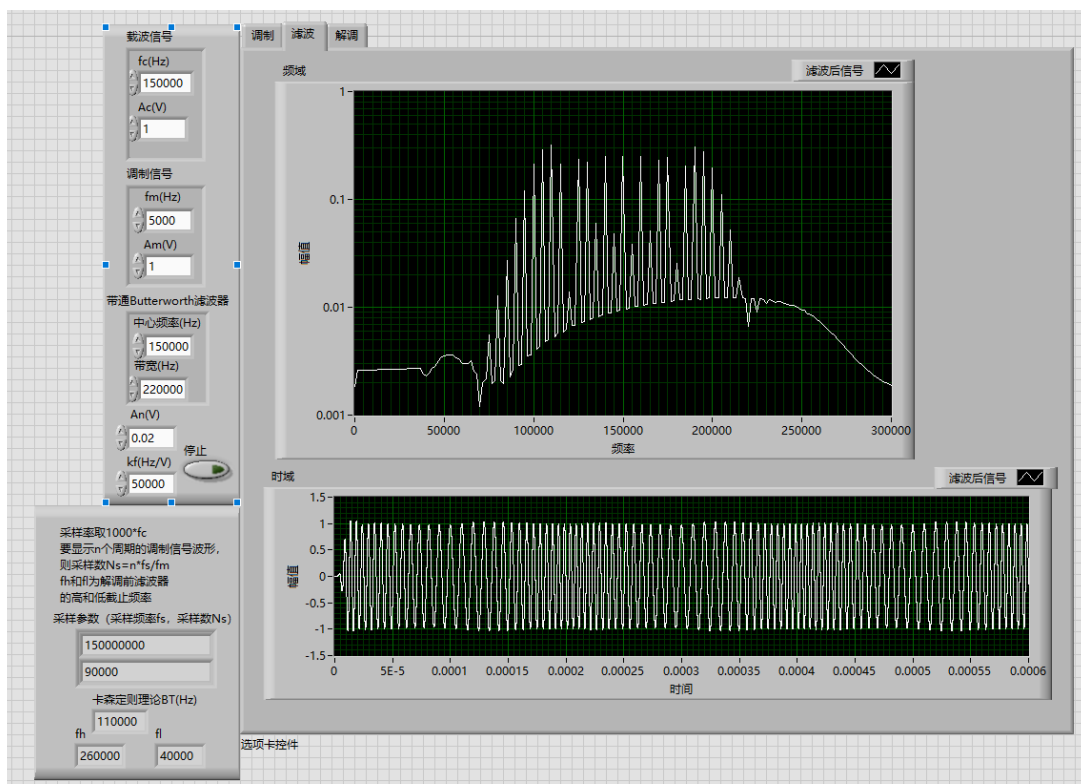


图 4: 滤波后波形

由此代入数据可以计算出理论有效带宽约为 110kHz，在前面板中已经完成自动计算。卡森定则的基本思想是，有条件地忽略远离载波频点的边带分量。就是说，当频谱上某一频率分量幅度大于等于标准量 10%，而在它远离载频方向上的其余分量幅度均小于 10%，则以该分量频点作为有效频带边界。在载频两侧各确定一个有效频带边界点，两频点之差即有效带宽。实测带宽约为 130kHz。

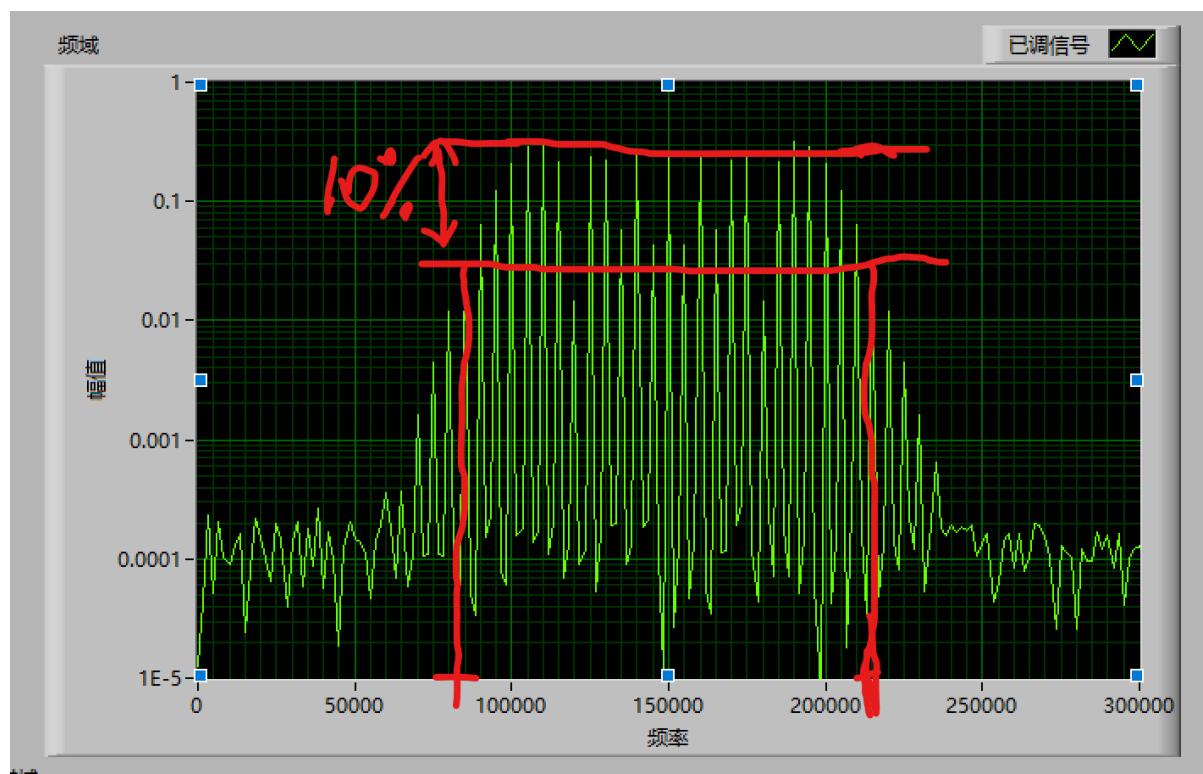


图 5: 实测带宽

理论上来说，采用卡森定则算出的带宽进行滤波是可以得到工程上可用的解调信号的，为了保证解调的保真度，我们这里采用两倍的理论带宽作为滤波器的带宽，可以看到除了系统初始阶段的暂态波形外，解调波形与调制波形高度吻合。

当去除解调前滤波器后，我们发现解调出来的信号完全失真，再对滤波后的信号进行观察，发现滤波器的主要作用是滤除高频噪声，减少信号中的尖锐成分，可以推断解调失败的原因是尖锐成分在解调过程的求导中带来极值。

接下来我们比较不同的调偏常数 k_f 对于调制信号频域特性与解调信号保真度的影响，为了控制变量，我们对于不同的调偏常数使用对应卡森带宽的滤波器，下面是比较结果。

可以看出解调时三种取值均有不同程度的失真，主要原因是卡森定则对保真度的要求并不高。先看已调信号的频域部分，当 k_f 的取值越大，信号频域带宽越大，事实上由 FM 调制的公式可以推出：

$$\omega_t = \omega_c + k_f \cdot x(t) \quad (3)$$

即频带的大小与调频参数成正比，这也印证了卡森定则的正确性。值得注意的是在这一组调制与载波信号的取值下，当 $k_f = 150\text{kHz}$ 时，已调信号频带的低截止频率正好为 0，这一点也可以从图中印证，同时看解调信号的对比图也能看出此时保真度也随调制参数的增加而上升，原

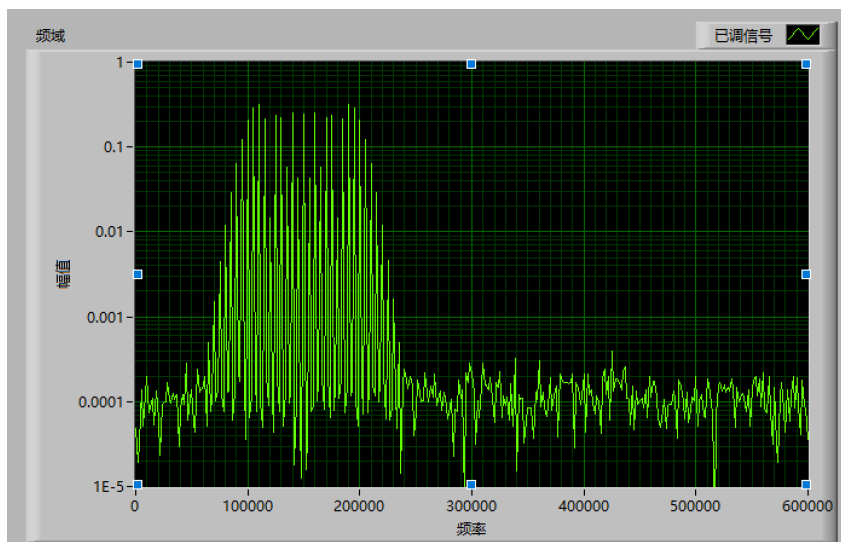


图 6: $K_f = 80kHz/V$

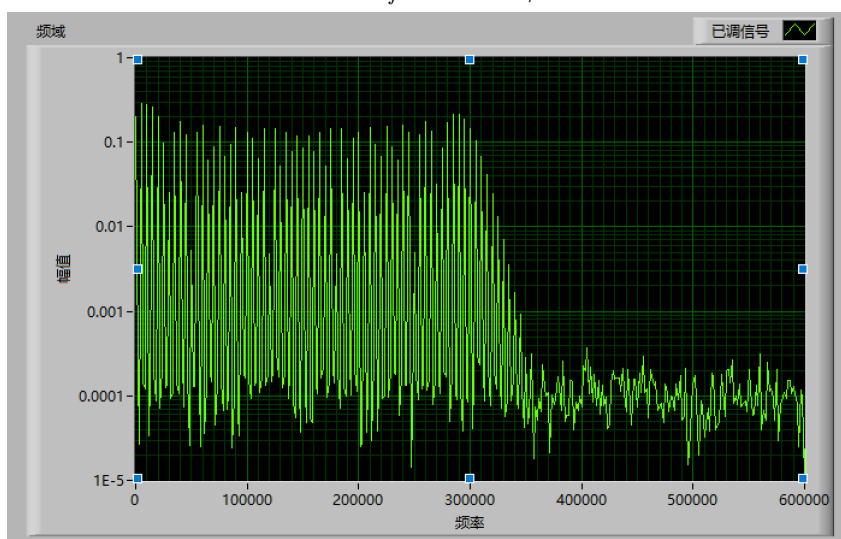


图 7: $K_f = 150kHz/V$

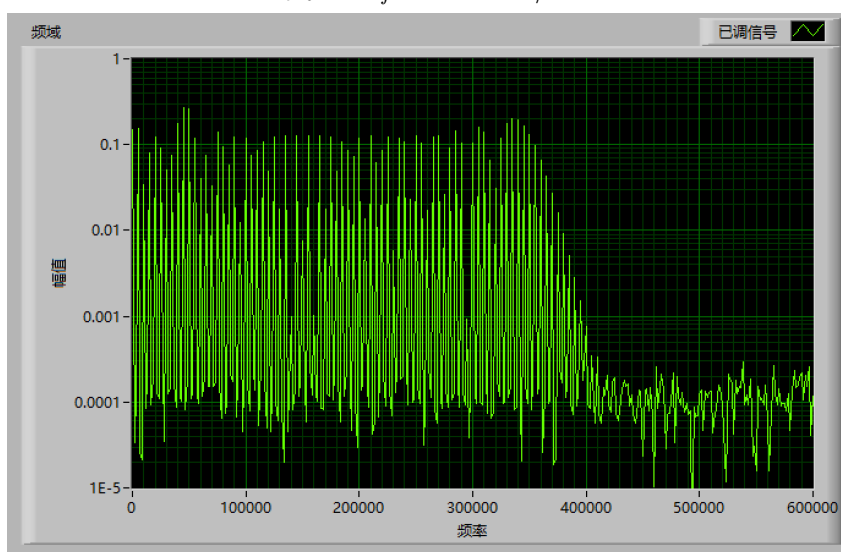


图 8: $K_f = 200kHz/V$

图 9: 调偏常数对调制信号频域的影响

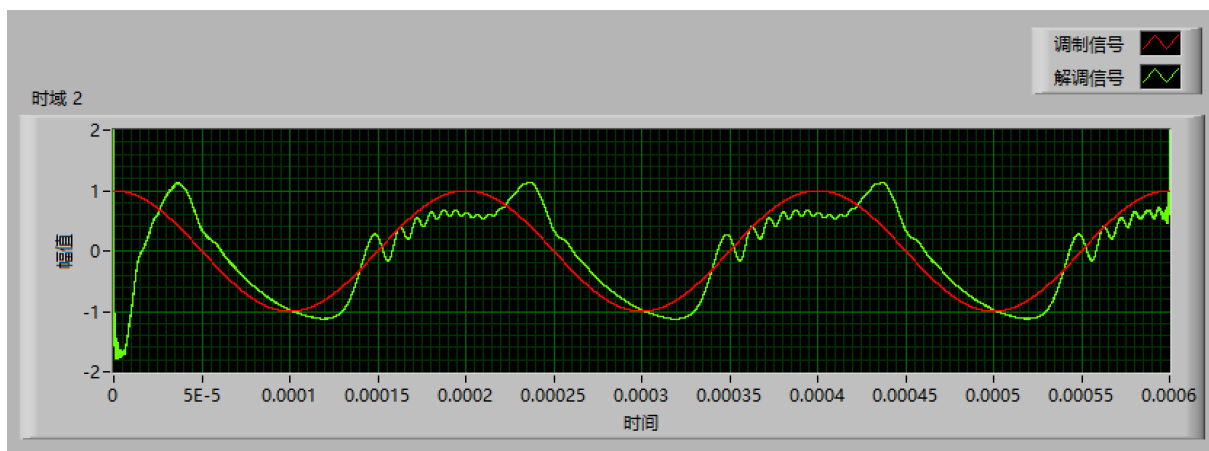


图 10: $K_f = 80kHz/V$

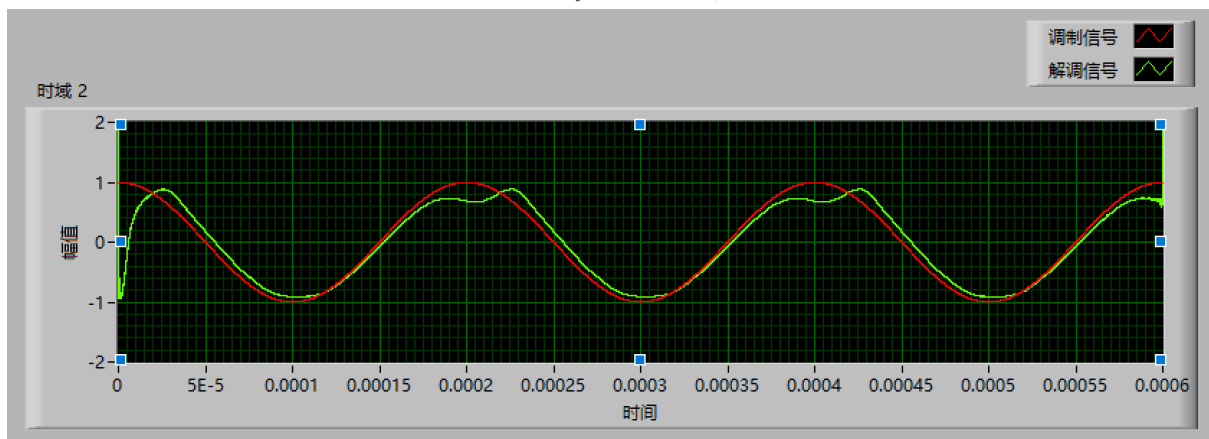


图 11: $K_f = 150kHz/V$

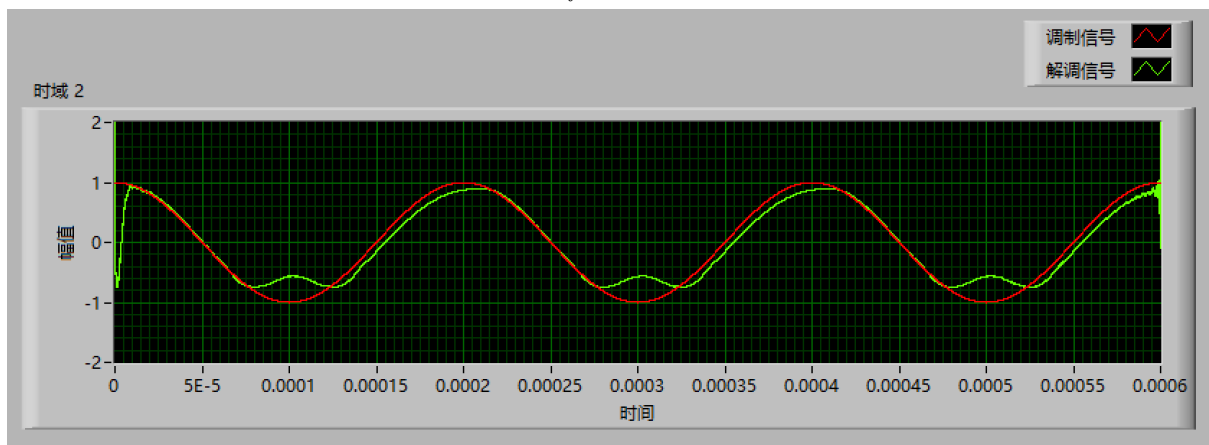


图 12: $K_f = 200kHz/V$

图 13: 调偏常数对解调保真度的影响

因是调制信号在整个已调信号频域中的占比变大；而当调制参数继续增大时，左右两个频带产生混叠，从而导致了失真，由此可以看出调频参数并非越大越好。
接下来的几个 task 主要以波形的展示为主，原理与 2-1 基本相同，不进行文字上的重复说明

4.2 2-2

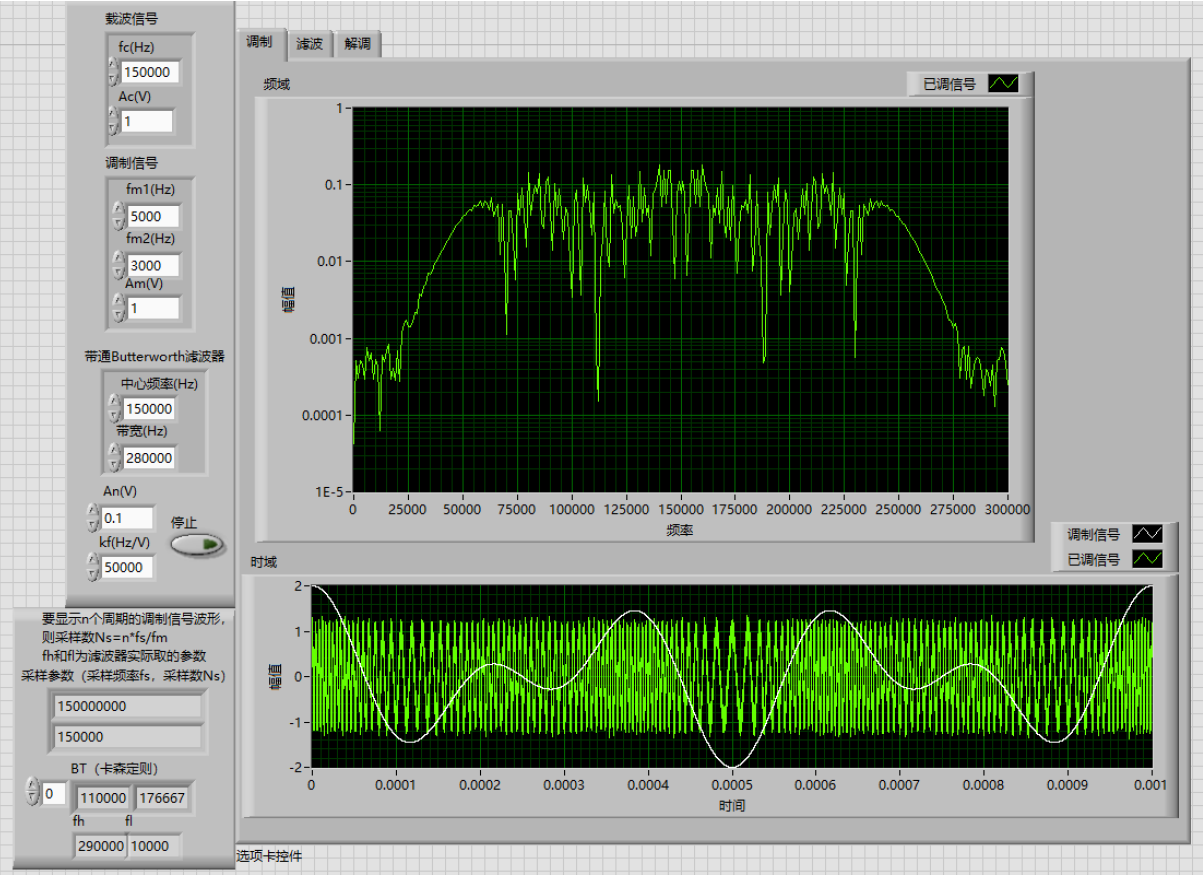


图 14: 已调信号时频域

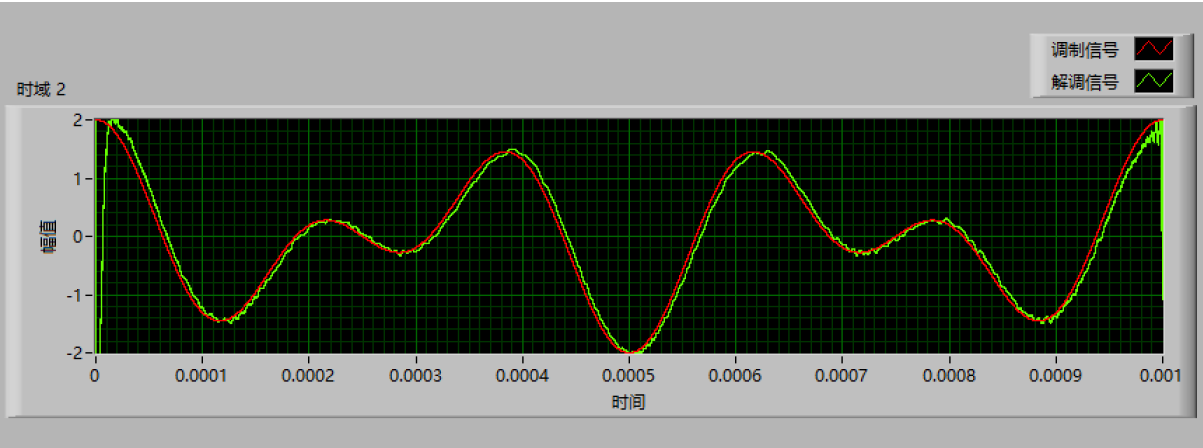


图 15: 解调信号

图 16: 2-2

4.3 2-3

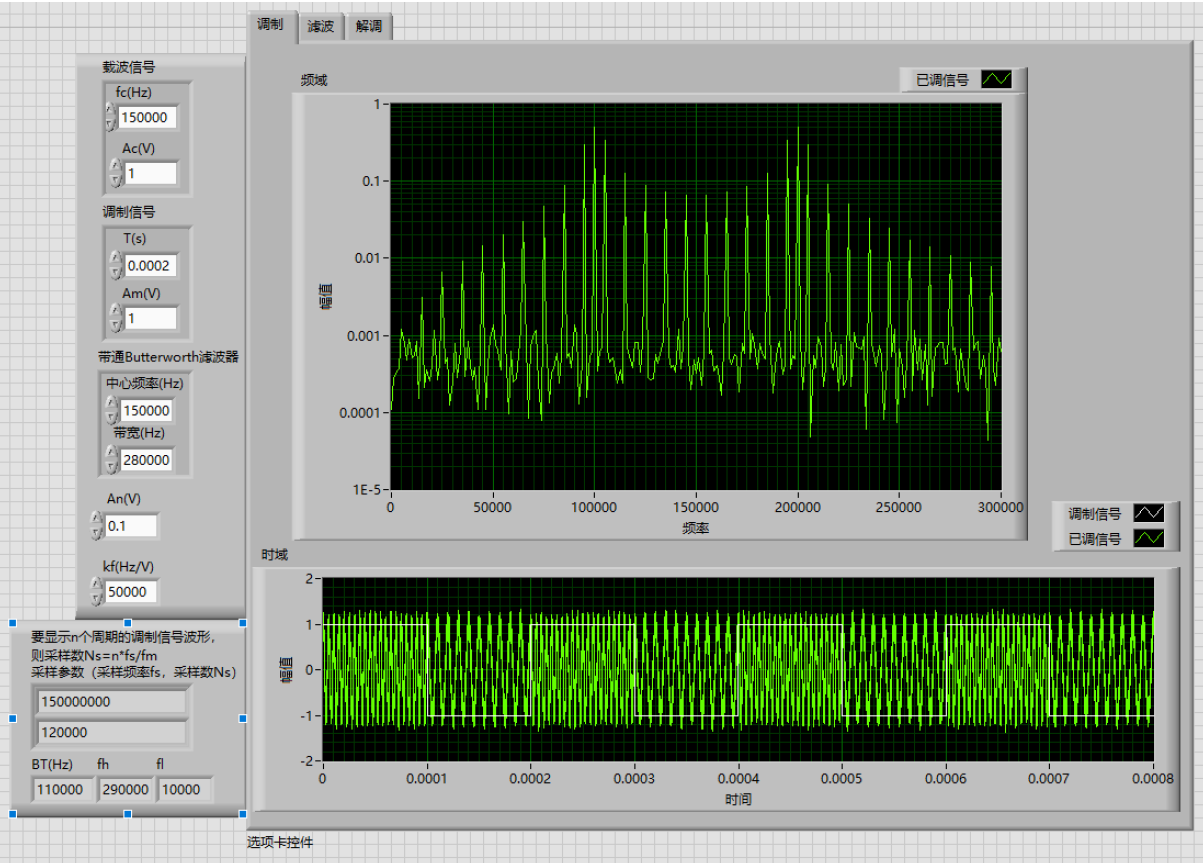


图 17: 已调信号时频域

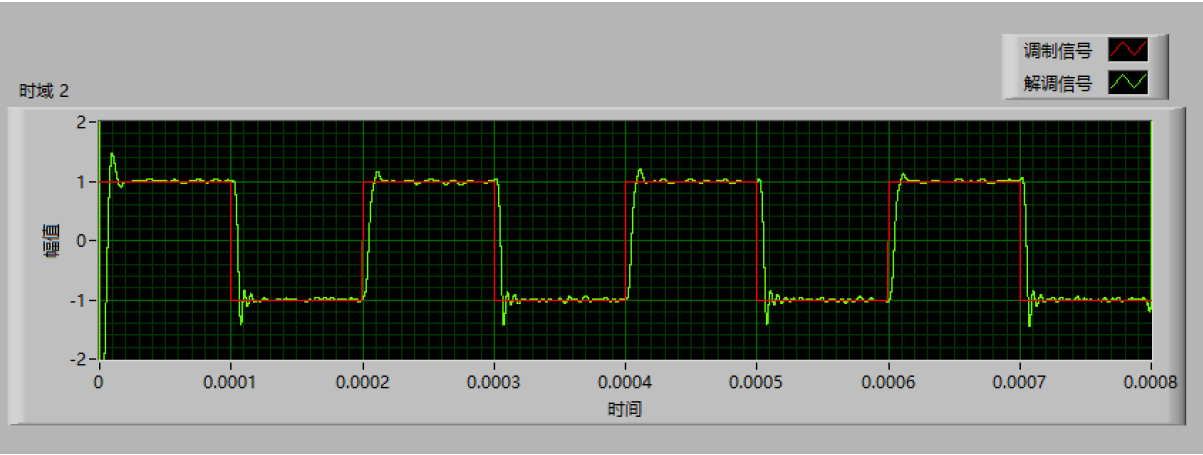


图 18: 解调信号

图 19: 2-3

4.4 2-4

由于咋这一任务中我们需要对该伪随机序列的 7 个周期进行采样，且生成该序列的函数结构比先前的信号要复杂，为了保证计算的 efficiency 我们把采样频率减小到 100 倍 f_c 。

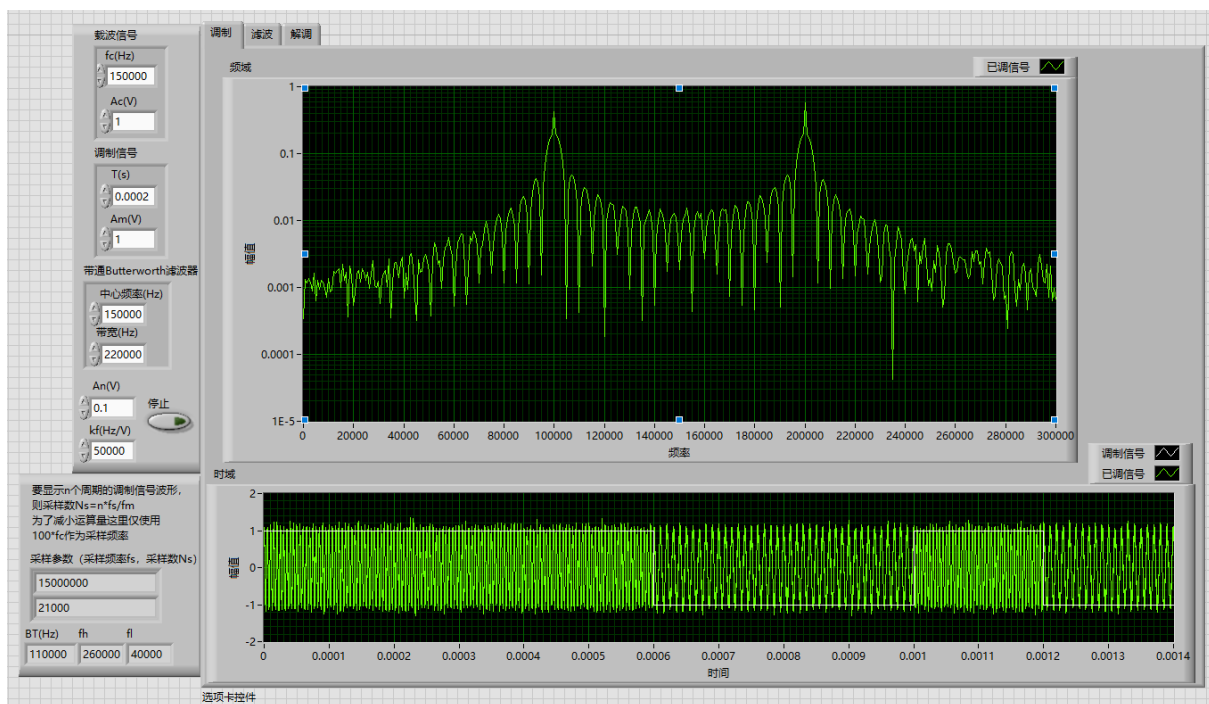


图 20: 已调信号时频域

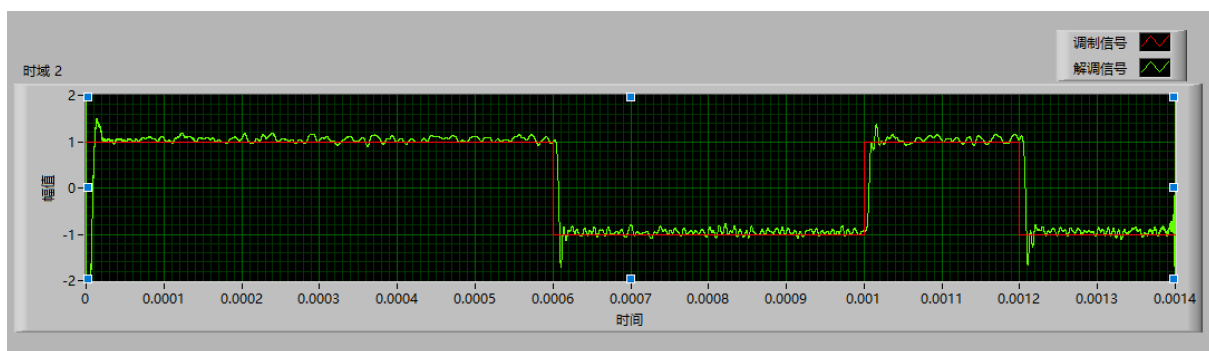


图 21: 解调信号

图 22: 2-4

5 主要程序框图

这一部分我们主要介绍上述虚拟实验系统模块的具体实现。首先看调制模块，对照如下 FM 调制公式可以实现该程序框图

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (4)$$

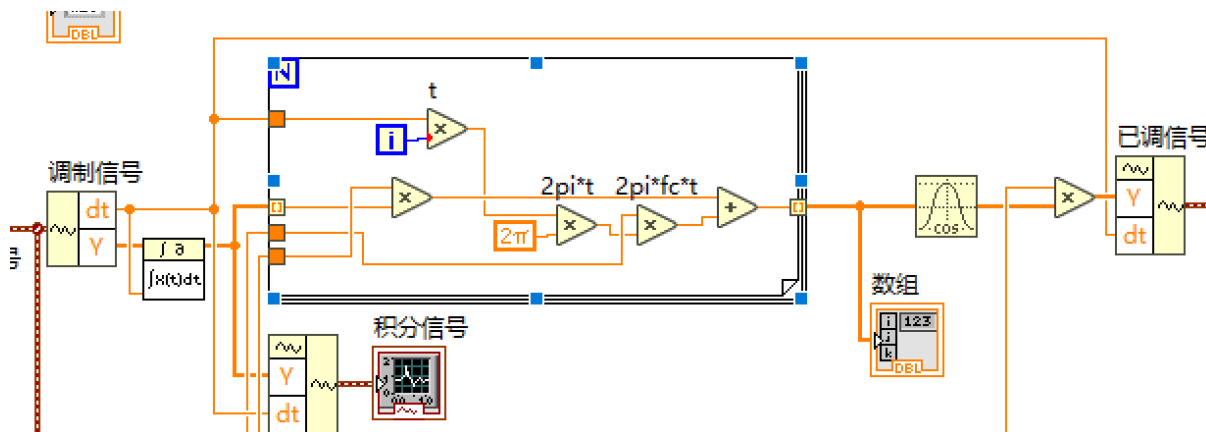


图 23: 调制模块

然后是滤波模块，我们使用 10 阶 Butterworth 带（低）通滤波器，需要注意的是输入的低截止频率要大于 0。

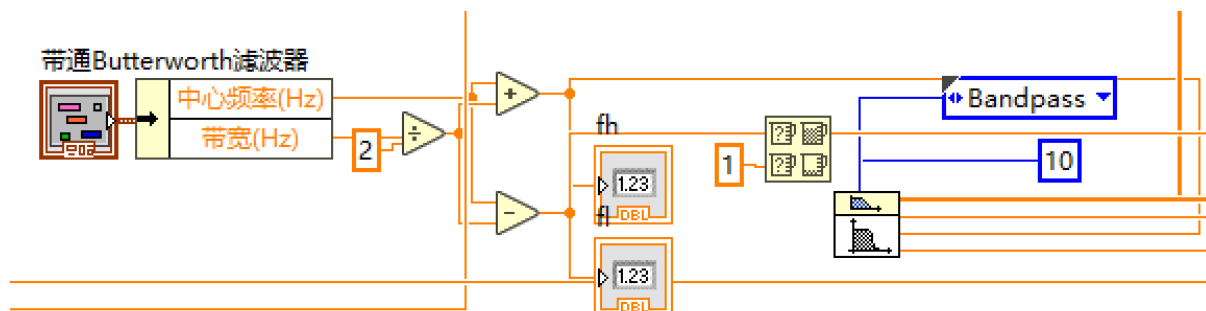


图 24: 滤波模块

解调模块需要在微分后进行包络检波，对此我们使用希尔伯特变换，把微分后的信号及其希尔伯特变换作为复数的虚部和实部，取幅值后进行隔直处理即可得到基带信号（经放大）。

最后是每一个任务的信号生成模块，其中 2-1 和 2-2 都可以简单的使用余弦信号生成的 v_i 获得，而 2-3 也可以用方波生成的 v_i ，故在此不予展示。2-4 要求生成三阶 M 序列，我们的基本思路是：先计算 $[t/T]$ 从而确定其在哪一个码元区间，然后根据 M 序列的定义进行取值，实现时用了公式节点和公式波形，计算量较大故只取了 100 倍 f_c 作为采样频率以减小更改参数与波形更新间的延迟。

将以上的每一个模块分别于其对应的调制信号和载波整合，即可得到 2-1 到 2-4 的 v_i ，将这些子 v_i 合并到 2-5 中并且增加开始结束和选项卡控件等辅助功能即实现了该虚拟实验系统，下面是展示 2-1 选项卡在 2-5 中对应的实现：

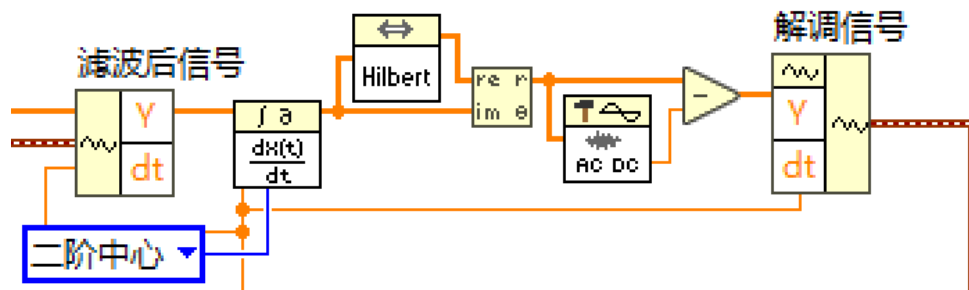


图 25: 解调模块

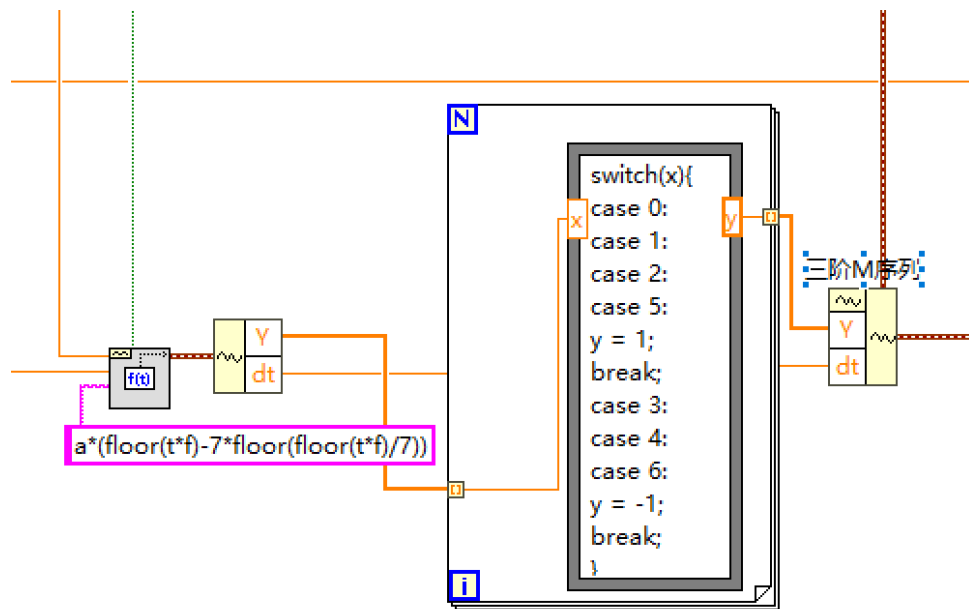


图 26: 三阶 M 序列生成

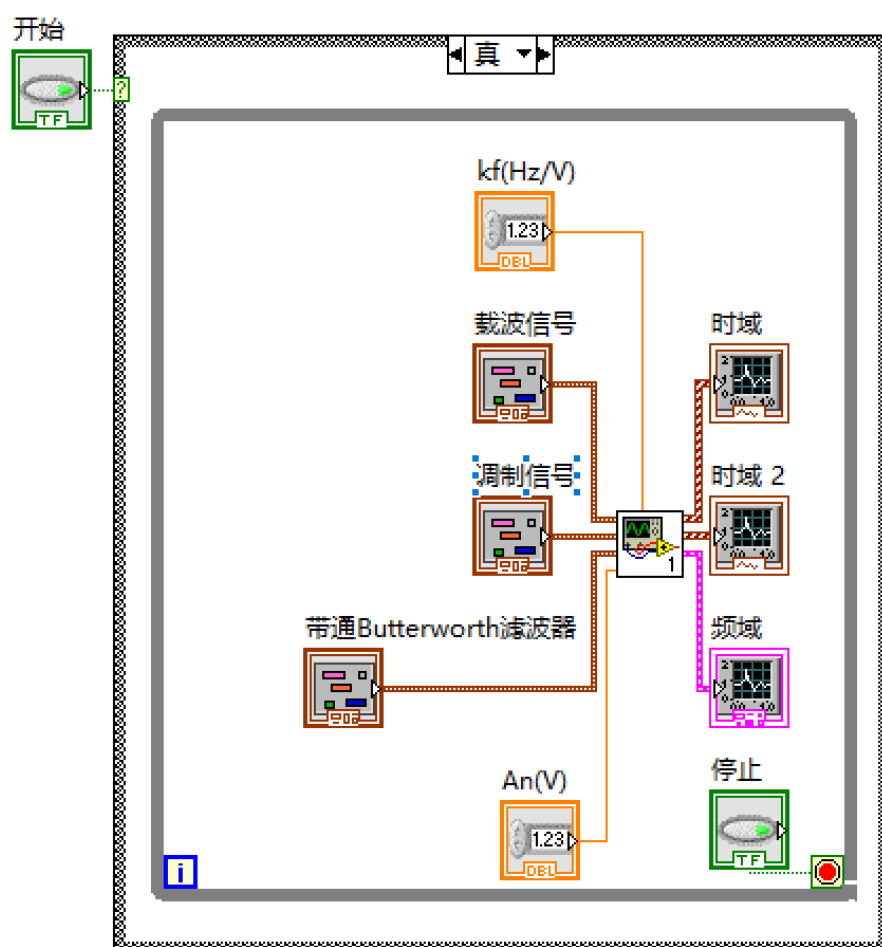


图 27: 2-5 实现一例

6 拓展探究

本次实验探究我们选取了以声卡的输入输出作为信号的课题，整体的思路就是利用前几个实验搭建的调制、滤波和解调模块对声卡的输入进行处理，并且在完成后再往声卡输送。首先使用声音采集 vi 对声卡进行采样，人的声音的主要频段在 100-500Hz，根据 Nyquist 采样定理，声卡的采样频率需要在 1kHz 以上，这里我们默认取 5kHz，持续时间 2s 以节省内存。由于声卡采样信号与系统固有的采样频率不匹配，故需要进行重采样。为了方便后续调制，我们还对声音信号进行了归一化处理。调制和解调模块与先前实验中一致，滤波改用 Butterworth 低通滤波

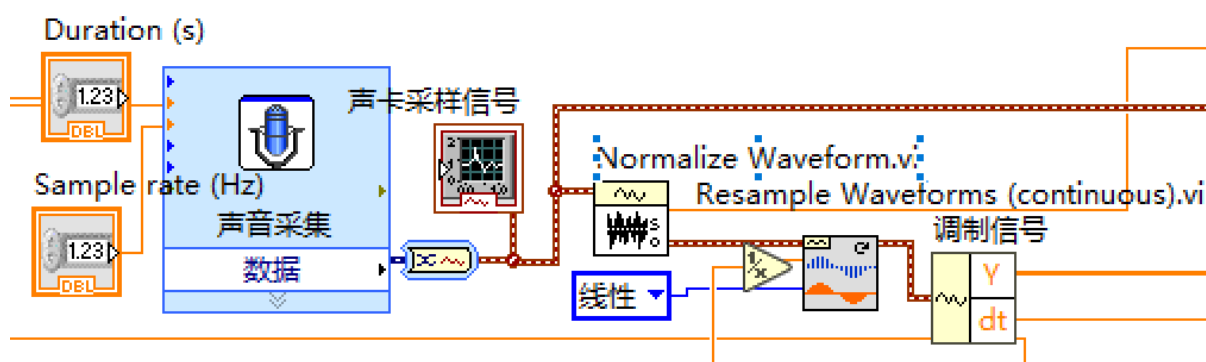


图 28: 声卡采样及其处理

(以适应相对较低载波频率的调制)，同时在输出端增加播放波形 vi 以向声卡输出处理后的信号。进行实验，各项参数的默认取值见图，信号输入来自麦克风，可以看到调制和解调波形基本一致，经过波形的细节比对也确定了高保真度，收听输出信号与输入完全一致。

除此之外我们还借此对人声信号的有效带宽进行了探究，查询得知人的声音的主要频段在 100-500Hz，然而当我们最开始取滤波器带宽为 1-10kHz 时仍发现解调信号严重失真，输出的声音也模糊不清，于是我们逐步增加滤波器带宽，直到约 80-100kHz 时声音才感觉非常清晰，经过进一步研究我们发现虽然人声的主频在 100-500Hz，但是人声的高频分量（带有能量）可以到 3-4kHz，人耳需要接收到完整的频域分量才能辨别话语，而考虑滤波器的边缘效应，想要得到高保真声音则需要取信号有效频段的 2-3 倍带宽，因此 8-10kHz 的带宽是合理的。

7 实验心得

在本次实验中我深入理解了 FM 调制的基本原理与调制技术，在实现虚拟实验系统的过程中加深了对于调制基本概念的理解与运用水平，同时也提高了自身的 labview 编程水平，培养了自主学习能力和自主探究精神。

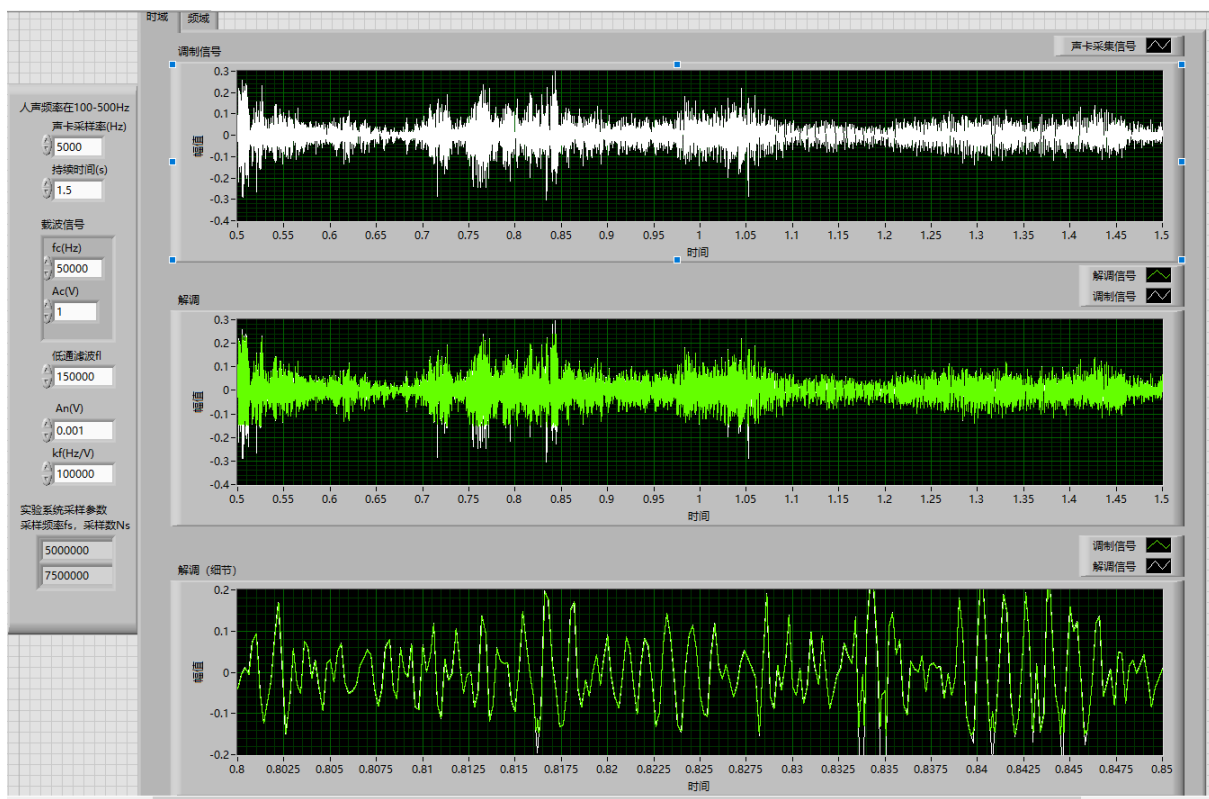


图 29: 声卡信号处理时域

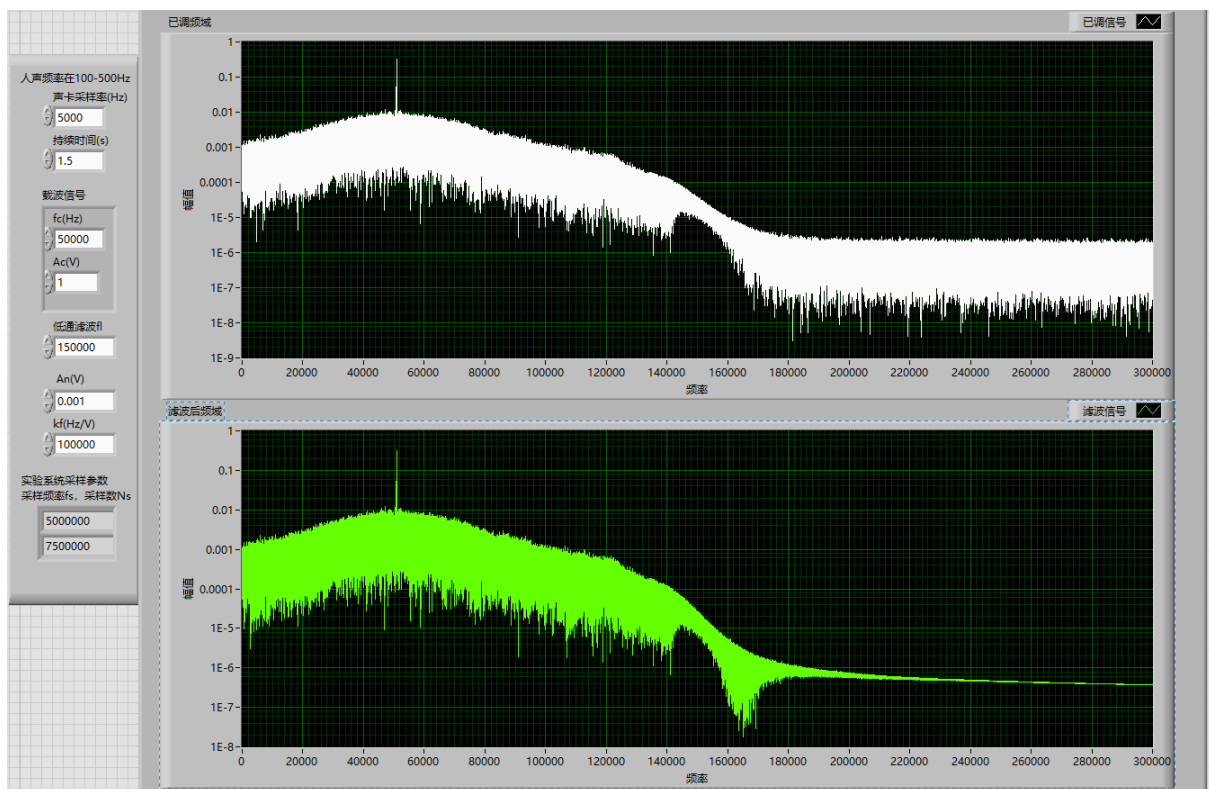


图 30: 声卡信号处理频域

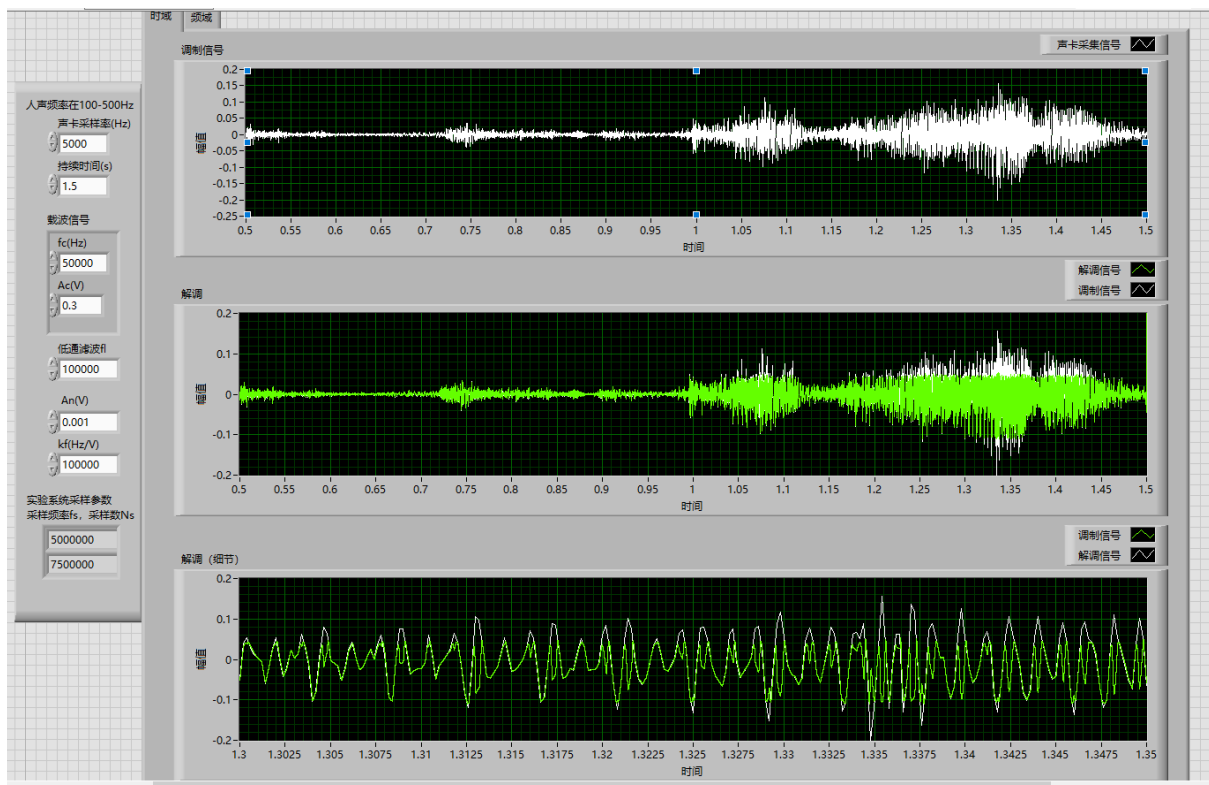


图 31: 人声高频抑制时域

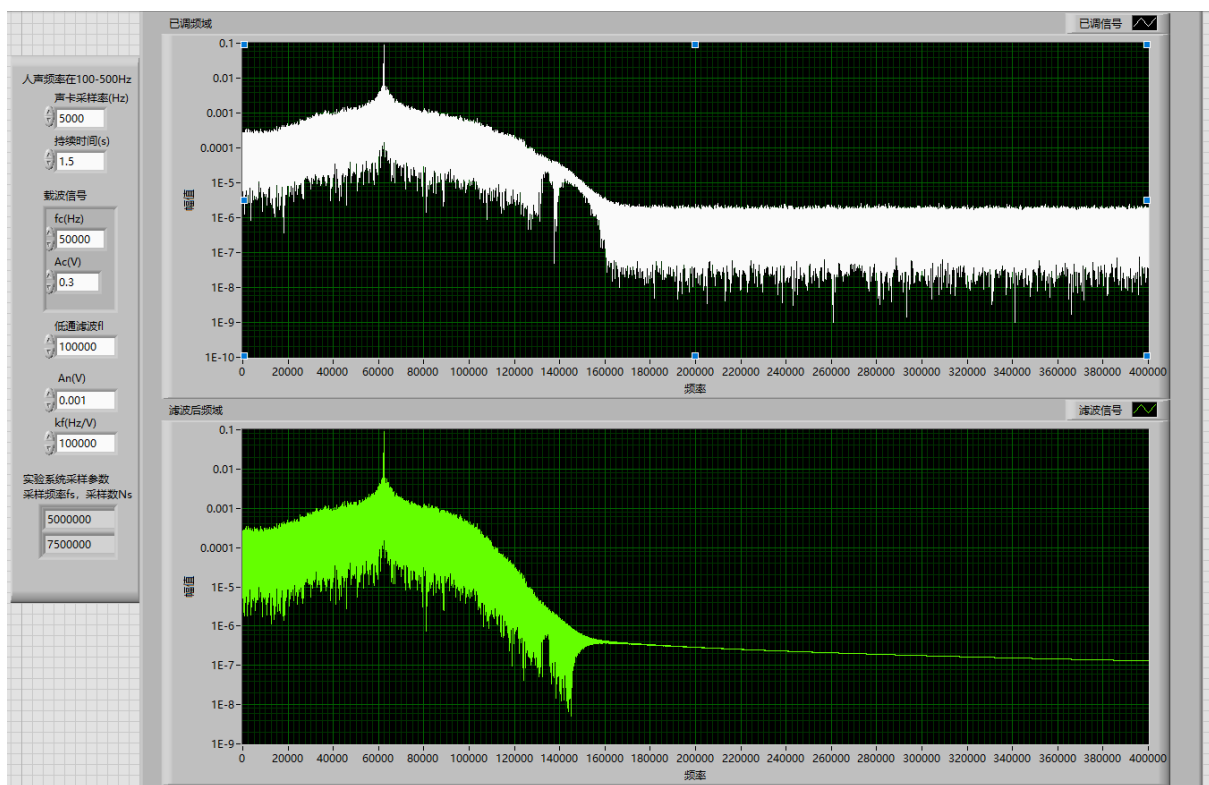


图 32: 人声高频抑制频域