

# 浙江大学

## 本科实验报告

课程名称: 通信原理实验

姓 名: 黄嘉欣

学 院: 信息与工程学院

系: 信息与工程学系

专 业: 信息工程

学 号: 3190102060

指导教师: 龚淑君 金向东

2022 年 5 月 4 日

USRP 硬件平台遵循一个通用的软件定义无线电体系结构，使用高速模拟数字转换器（ADC）和数字模拟转换器（DAC）实现了一个直接变换模拟前端，该前端具有数字下变频（DDC）和数字上变频（DUC）。接收链以一个高度灵敏的模拟前端开始，该前端能够接收非常小的信号，并且将信号直接下变频到同相(I)和正交(Q)两路基带信号。下变频之后是高速模数变换和 DDC，以降低采样率并将 I 路和 Q 路基带信号打包传输给主机作进一步处理。发送链从主机开始，在主机上生成 I 路和 Q 路基带信号，并通过以太网电缆传输到 USRP 硬件。信号经由 DUC 送给 DAC，之后再进行 I/Q 上变频混频，产生射频信号，经过放大再进行传输。USRP 硬件结构图如图 3.1 所示：

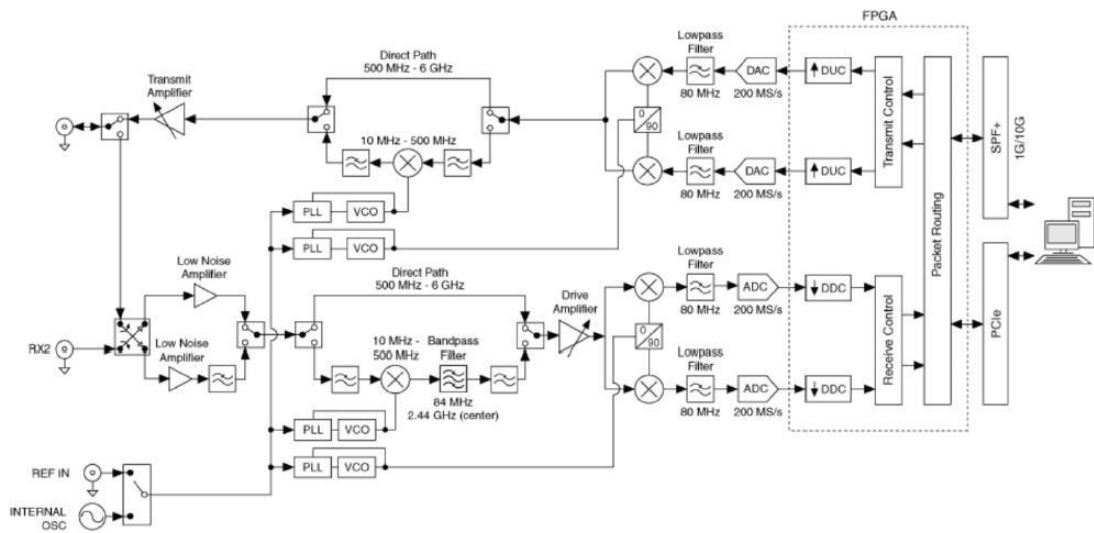


图 3.1 USRP 硬件结构图

② 基本的发送电路及其模块

LabVIEW 通过 USRP 模块构建发送电路，基本的传输发送电路如图 3.2.1 所示：

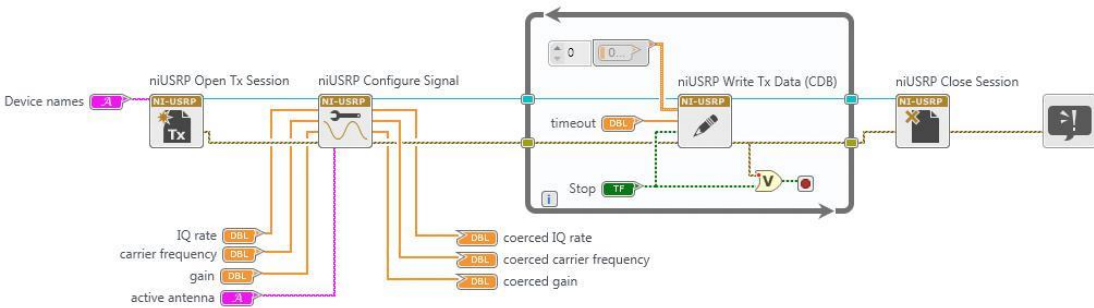


图 3.2.1 USRP 基本传输电路

发射机相关的模块在程序框图界面左侧菜单条下的硬件接口/Wireless Design and Test/NI-USRP/Tx 中，如图 3.2.2 所示。包含下列模块：



图 3.2.2 发射机模块提取界面

(1) Open Tx Session:

对设备名称输入中指定的设备打开一个传输会话，并将会话句柄作为输出返回。在模块的 device name 输入端需要输入设备名称，用于通知 Labview USRP 的 IP 地址或资源名称。

(2) Configure Signal:

配置 Tx 或 Rx 的参数。I/Q rate 是基带 I/Q 数据每秒采样的采样率。carrier frequency 是射频信号的载波频率（以 Hz 为单位）。gain 是射频信号的 Tx 增益（以 dB 为单位）。active antenna 指定传输信道使用的设备天线端口。Coerced IQ rate/carrier frequency/gain 是设备支持的对应的实际值。

(3) Write Tx Data:

将 16 位复数有符号整数写入到指定信道。基带采样数据以 16 位复数有符号整数数组形式传输。数据的实部和虚部分别对应同向和正交数据，在数组中，同向和正交数据交替排列。

(4) Close Session:

关闭设备的会话句柄。

③ 基本的接收电路及其模块

基本的接收电路如图 3.3.1 所示：

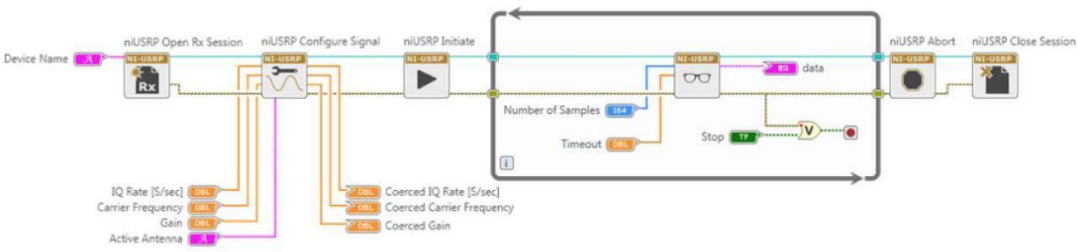


图 3.3.1 USRP 基本接收电路

接收机相关模块在程序框图界面左侧菜单条下的硬件接口/Wireless Design and Test/NI-USRP/Rx 中，如图 2-5 所示。主要有如下模块：

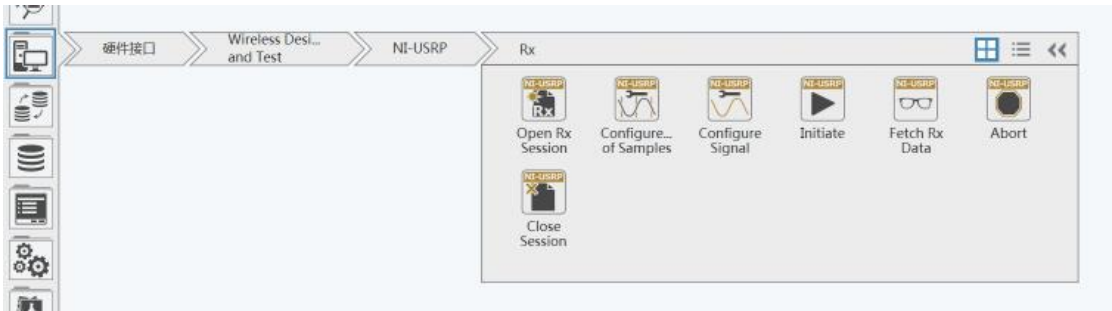


图 3.3.2 接收模块提取界面

(1) Open Rx Session:

对设备名称输入中指定的设备打开一个接收会话，并返回会话句柄输出。在模块的 device name 输入端需要输入设备名称，用于通知 Labview USRP 的 IP 地址或资源

名称。

## (2) Initiate:

开启接收。

## (3) Fetch Rx Data:

从指定的信道获取 16 位有符号整型复数数据。Number of samples 定义了从接收信道获取数据的采样数，data 是接收到的 16 位有符号整型复数数组数据。实部和虚部分别对应同相和正交数据。

## (4) Abort:

停止接收。

## ④ 双边带调制 (DSB)

假设  $\omega(t)$  是携带信息需要传输的信号，将  $\omega(t)$  与一个余弦载波信号相乘，得到：

$$s(t) = \omega(t) \cos(2\pi f_0 t)$$

其中， $f_0$  称为载波频率。根据欧拉特性：

$$\cos(2\pi f_0 t) = \frac{1}{2}(e^{j2\pi f_0 t} + e^{-j2\pi f_0 t})$$

计算信号  $s(t)$  的频谱，对它做傅里叶变化，可得：

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) \left[ \frac{1}{2}(e^{j2\pi f_0 t} + e^{-j2\pi f_0 t}) \right] e^{-j2\pi f t} dt = \frac{1}{2}W(f - f_0) + \frac{1}{2}W(f + f_0)$$

式中含有差频（下边带）、和频（上边带）两个分量。

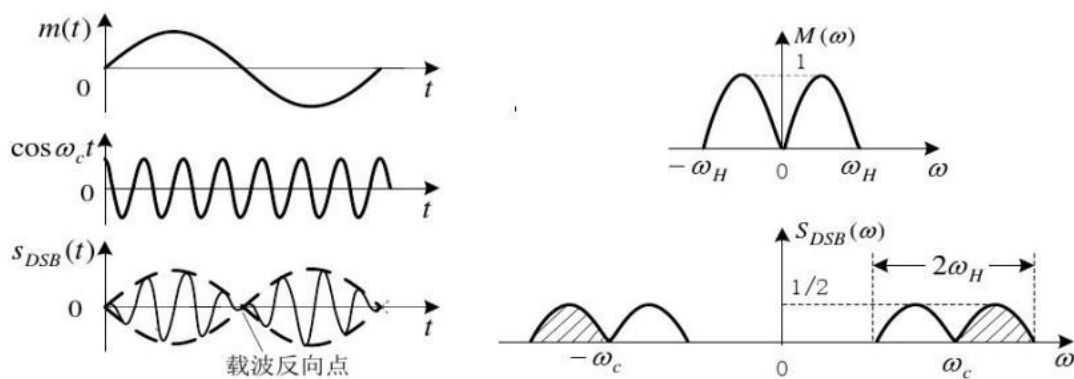


图 3.4.1 双边带调制的时域波形和频谱结构

## ⑤ 单边带调制 (LSB or USB)

双边带信号通过相应的窄带滤波电路后，可以保留其中一个边带，这样就可以实现上边带或下边带调制。

本实验中，采用三角函数变换的方法实现单音信号的上变频。将余弦波信号

$\cos(\omega t)$ 作为同相数据，同频率同幅度的正弦波信号 $\sin(\omega t)$ 作为正交数据，送给 Write Tx Data 模块，产生一个与载波信号频率 $\omega_0$ 有一个偏置量的上边带信号。具体过程如下式：

$$\cos(\omega t) \times \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega t) \times \sin(\omega_0 t) = \cos(\omega + \omega_0)t$$

四、实验内容与步骤

① 构建基本的 USRP 传输器：

基本的传输电路实验步骤如下：

- (1) 将 USRP 模块连接到电脑上；
- (2) 运行 NI-USRP Configuration Utility 软件，获取设备 ID，如图 4.1.1 所示：

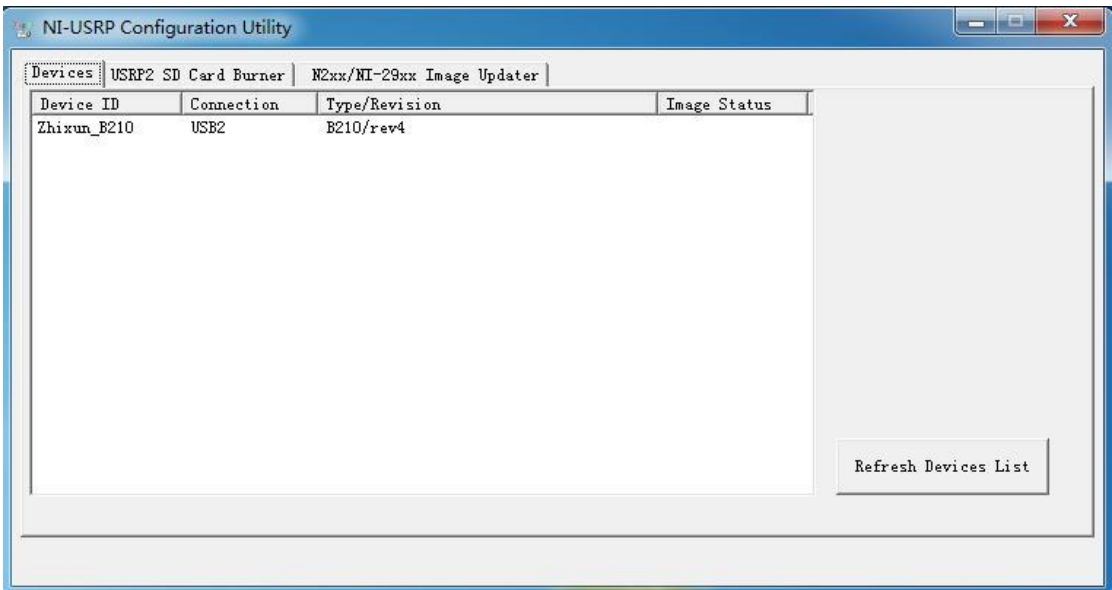


图 4.1.1 设备 ID 获取

- (3) 在 Labview 中新建一个项目，命名为 Lab2，存放于工作目录。再在项目中新建一个 VI，重命名为 carrier.gvi；
- (4) 在程序框图界面，放置以下模块：Open Tx Session, Configure Signal, Write Tx Data 和 Close Session；
- (5) 点击 Open Tx Session，在右侧的项目面板中，为 device names 创建常量，在程序框图界面给 Open Tx Session 选择设备 ID；

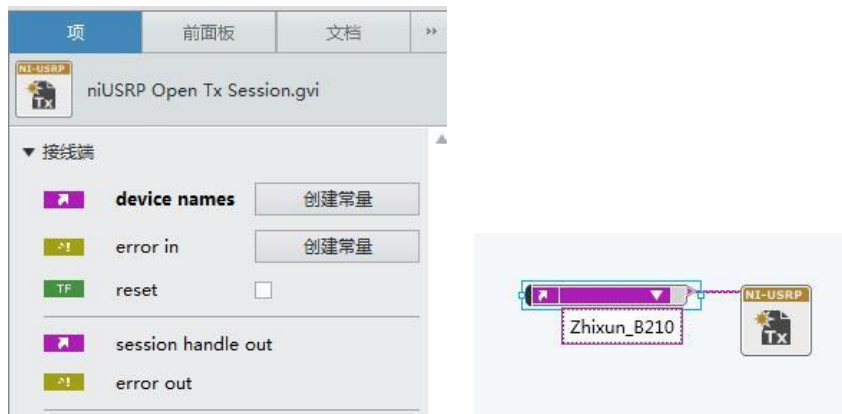


图 4.1.2 指定设备 ID

- (6) 放置一个 cluster properties 模块，选中点击右键，设置为全部写入；
- (7) 把各个模块的 session handle 端用线连起来；
- (8) 左键点击 cluster properties 模块参数条 Start Trigger Type，选择 Configuration/Enabled Channels。右键点击 Enabled Channels 端口，创建一个常量输入，输入“0”，这将在 USRP 前面板上使能 RF0 信道；
- (9) 创建 3 个 DBL 类型的输入控制变量：IQ rate，carrier frequency 和 gain。创建一个字符串类型的输入控制变量 active antenna。创建三个 DBL 类型的输出显示变量：coerced IQ rate，coerced carrier frequency 和 coerced gain。将这些变量与 Configure Signal 相应的端口连接；
- (10) 创建一个 while 循环，将 Write Tx Data 模块放在循环里面；
- (11) 连线模块的 Error out 端，创建一个 Error 显示输出变量，与 Close Session 模块的 Error out 端连线；
- (12) 创建一个 Stop 按键（布尔类型变量），放置于 while 循环中。将 Stop 输入和 Write Tx Data 模块的错误输出作为 or 模块的输入，将 or 模块的输出作为循环中断控制；

完成的电路图如图 4.1.3 所示：

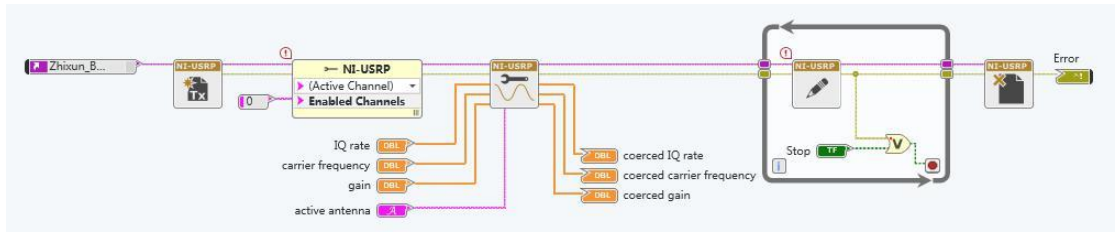


图 4.1.3 发射机基本电路

USRP 发送接收器是一个正交调制系统，它将同相信号与余弦波（频率值是

carrier frequency) 混频，正交信号与正弦波混频。Write Tx Data 模块将输入的 IQ 基带采样信号与两路载波信号进行调制。模块的数据类型设置为 CDB (复数双精度) 数组类型。

图 4.1.4 是产生正弦载波信号的电路图。使用初始化数组模块，给 Write Tx Data 模块输入一个常数数组作为基带采样信号。

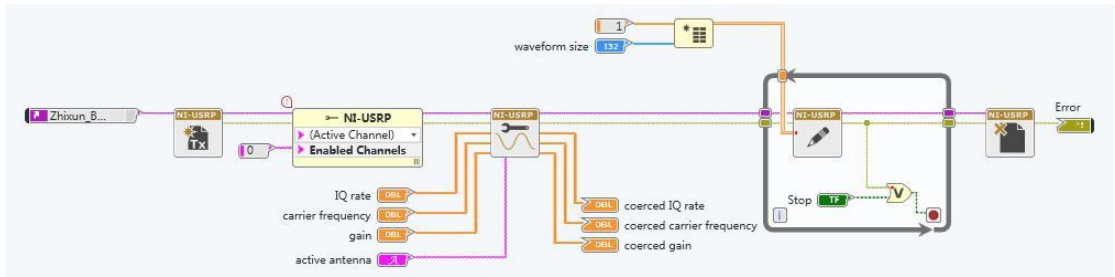


图 4.1.4 载波信号发送电路

(13)参数设置:

- a) IQ rate = 1M;
- b) carrier frequency = 2G;
- c) gain = 0;
- d) active antenna = TX1;
- e) waveform size = 1000;

(14)在前面板，将输入输出项放置在界面里，根据参数设置要求完成参数输入，运行电路；

(15)使用 SMA 电缆 (和一个 30dB 的衰减器) 将 USRP 设备的 TX1 输出端口连接到频谱仪，观察是否产生正确的信号频谱；

(16)改变载波信号频率值，取 1G、2.5G、3G、4G、5G、.....，使用频谱仪确认频率是否正确。

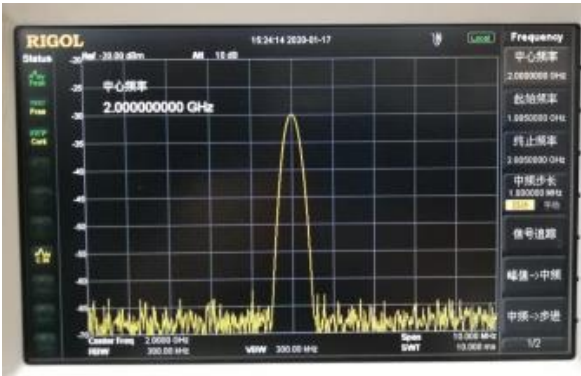


图 4.1.5 载波信号频谱仪测试



② 单音信号上边带传输：

上边带电路实验步骤如下：

- (1) 新建一个 VI，命名为 upper-side\_IQ.gvi。复制 carrier.gvi 中的载波信号发送电路到 upper-side\_IQ.gvi 中，将初始化数组，常数输入以及它们与 Write Tx Data 模块的连线删除；
- (2) 创建两个 DBL 类型的参数输入：tone frequency 和 tone amplitude；
- (3) 放置两个“波形发生器”模块（分析/信号处理/生成），默认状态下，模块是“Sine”波形和“Waveform”数据类型；
- (4) 将 tone frequency 控制输入连接到两个波形发生器模块的频率端口、tone amplitude 控制输入连接到两个波形发生器模块的幅值端口。将 waveform size 控制输入连接到采样端口，将采样率端口与 coerced IQ rate 输出相连；
- (5) 创建一个数值是“90”的常数输入，与波形发生器模块的相位输入连接；
- (6) 使用“波形属性”模块（数据类型/波形/模拟波形）从波形发生器模块中获取余弦和正弦波形的采样数据；
- (7) 使用“实部虚部至复数转换”模块（数据类型/数值/复数）获取余弦和正弦采样并将它们转换成复数；

完成的上边带电路如图 4.2.1 所示：

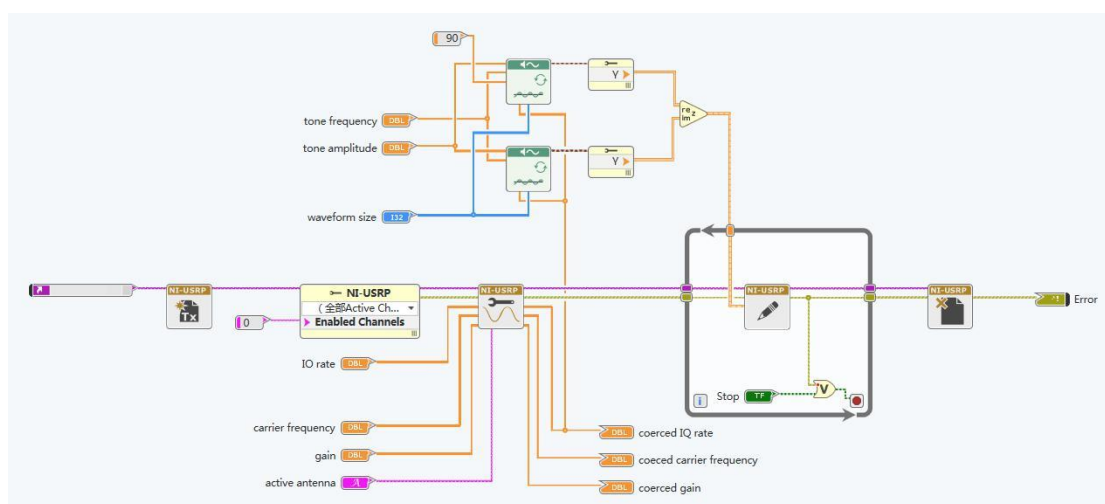


图 4.2.1 上边带调制发送

(8) 参数设置：

- a) IQ rate = 1M;
- b) carrier frequency = 2G;

- c) gain = 0;
- d) active antenna = TX1;
- e) waveform size = 1000;
- f) tone frequency = 1K;
- g) Tone amplitude = 1;

(9) 在前面板，将输入输出项放置在界面里，根据参数设置要求完成参数输入，运行电路；

(10) 使用 SMA 电缆（和一个 30dB 的衰减器）将 USRP 设备的 TX1 输出端口连接到频谱仪，观察是否产生正确的上边带信号频谱；

(11) 改变 tone frequency 的值，分别取：10k、50k、100k，用频谱分析仪观察上边带信号的频谱变化；

### ③ 问题 1：

(1) 在相同载波频率情况下，比较载波发生电路和上变频电路的信号频谱；

(2) 改变 waveform size 参数至 1005，观察信号的频谱；

(3) 新建一个“lower-side\_IQ.gvi”，完成下变频电路，观察信号的频谱；

(4) 新建一个“double-side\_IQ.gvi”，完成双边带电路，观察信号的频谱；

### ④ 构建 USRP 接收器

USRP 接收器实验步骤如下：

(1) 新建一个 VI，并命名为 Rx.gvi；

(2) 在程序框图界面，放置以下模块：Open Rx Session, Configure Signal, Fetch Rx Data, Abort 和 Close Session。同发送电路一样，为参数：IQ rate, carrier frequency, gain 和 active antenna 创建控制输入和显示输入。模块的 enabled channel 设置为常数 1，使能 USRP 设备的 RF1 信道。将 Fetch Rx Data 模块放入 while 循环，点击 Fetch Rx Data 模块，在函数配置栏，将数据类型更改为 CDB WDT；

完成的电路图如图 4.4.1 所示：

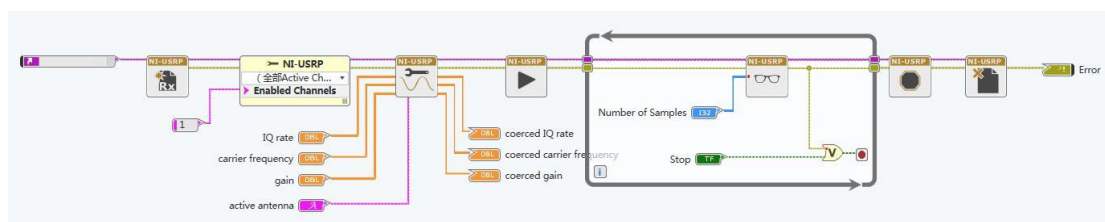


图 4.4.1 接收机基本电路

- (3) 在电路图中放置“FFT 功率谱和 PSD”模块（分析/信号处理/测量），点击模块，在右侧菜单栏将模块的函数配置设置为“功率谱”和“连续”。在接线端参数设置中，勾选“显示为 dB”。将信号端与 Fetch Rx Data 的数据端相连。为了能够显示频谱，在前面板，从左侧“图形和图表”菜单中选择“图形”显示输出，回到程序框图界面，将“图形”显示输出与功率谱端口相连；
- (4) 放置一个“波形属性”模块（数据类型/波形/模拟波形），将 Fetch Rx Data 模块的数据作为它的输入，使用“复数至实部虚部转换”模块，波形属性模块输出中提取 I 路和 Q 路采样值。使用“创建波形”模块（数据类型/波形/模拟波形）和波形显示输出（在前面板创建），显示 I、Q 两路信号的时域波形。完整的接收电路如图 4.4.2 所示：

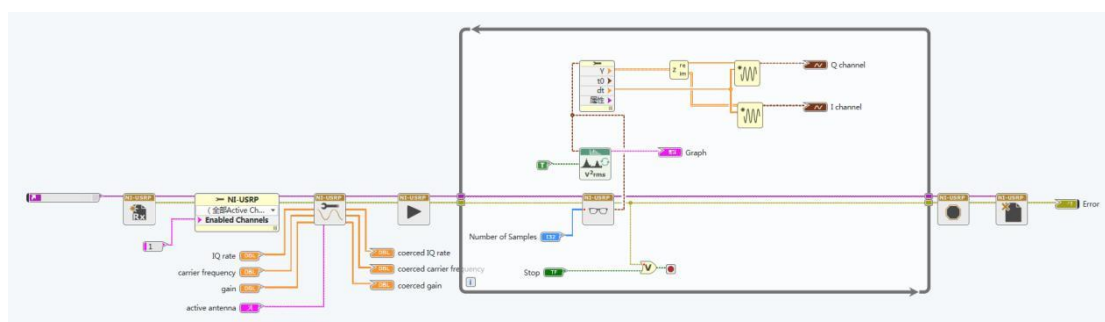


图 4.4.2 完整的接收电路

- (5) 参数设置：
- a) IQ rate = 1M;
  - b) carrier frequency = 2G;
  - c) gain = 0;
  - d) active antenna = RX2;
  - e) number of samples = 100
- (6) 在前面板，将输入输出项放置在界面里，根据参数设置要求完成参数输入；
- (7) 使用电缆（和一个 30dB 的衰减器），将 RF0 的 TX1 端口和 RF1 的 RX2 端口连接

起来；

⑤ 问题 2

- (1) 先运行“upper-side\_IQ.gvi”，然后再运行“Rx.gvi”，观察接收信号的波形和频谱；
- (2) 分别在运行“lower-side\_IQ.gvi”和“double-side\_IQ.gvi”的情况下，运行“Rx.gvi”，观察接收信号的波形和频谱；
- (3) 在“lower-side\_IQ.gvi”中，将正弦波信号改为方波信号，观察接收信号频谱的变化。

五、实验数据分析与问题回答

① 构建基本的 USRP 传输器：

- (1) 改变载波信号频率值，使用频谱仪确认频率是否正确：

如图 5.1.1，为发射机基本电路的程序框图：

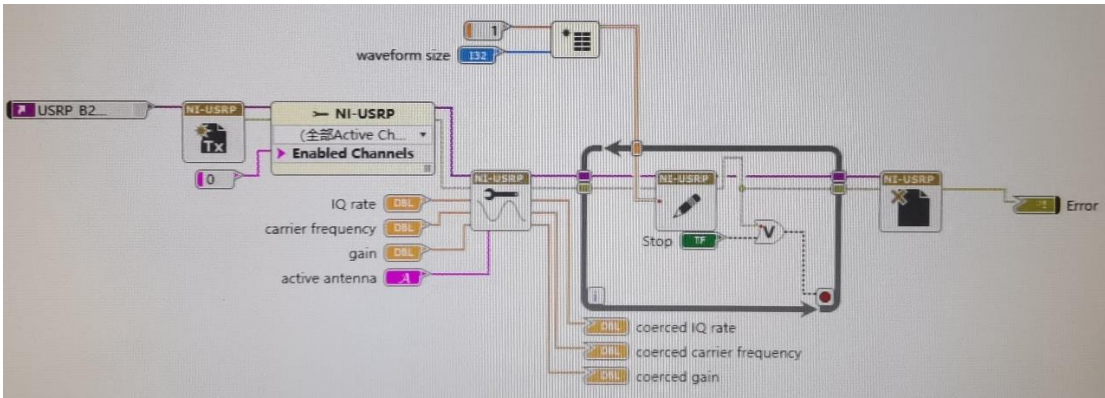


图 5.1.1 发射机基本电路程序框图

设置载波频率 `carrier frequency` 以 0.5GHz 为步进，从 1GHz 到 2.5GHz 变化，得到频谱仪显示如图 5.1.2 和图 5.1.3 所示。可以看到，随着 `carrier frequency` 的变化，频谱仪显示波形的中心频率也在同步变化，故电路设计正确。



图 5.1.2 载波频率为 1.0GHz 和 1.5GHz 时频谱仪显示

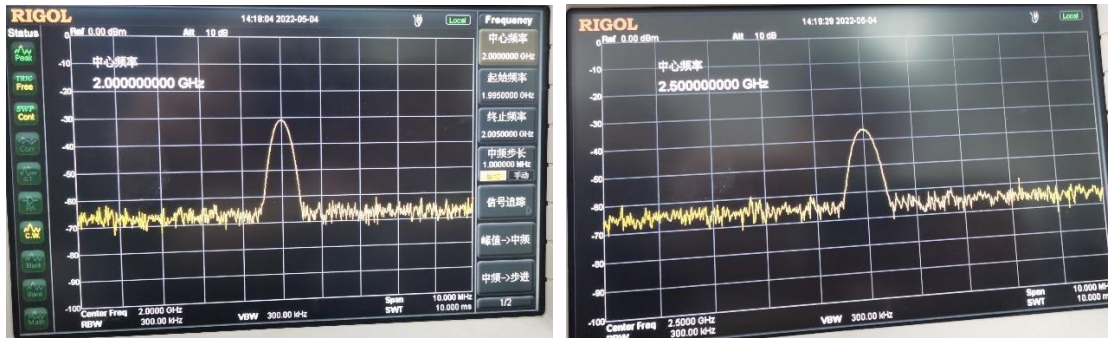


图 5.1.3 载波频率为 2.0GHz 和 2.5GHz 时频谱仪显示

② 问题 1:

(1) 在相同载波频率情况下，比较载波发生电路和上变频电路的信号频谱：

如图 5.2.1，为上变频电路的程序框图。若记 tone frequency 为  $\omega_0$ ，可以看到，当加入  $90^\circ$  的相偏后，第一个波形发生器的输出为  $\sin(\omega_0 t + 90^\circ) = \cos(\omega_0 t)$ ，作为同相信号，而第二个波形发生器的输出仍为  $\sin(\omega_0 t)$ ，作为正交信号。若载波频率为  $\omega_c$ ，则 Write Tx Data 模块的输出为：

$$\cos(\omega_0 t) \times \cos(\omega_c t) - \sin(\omega_0 t) \times \sin(\omega_c t) = \cos(\omega_c + \omega_0)t$$

此时输出信号频谱将会在  $\omega_c + \omega_0$  处出现谱峰，而非载波频率  $\omega_c$  处。

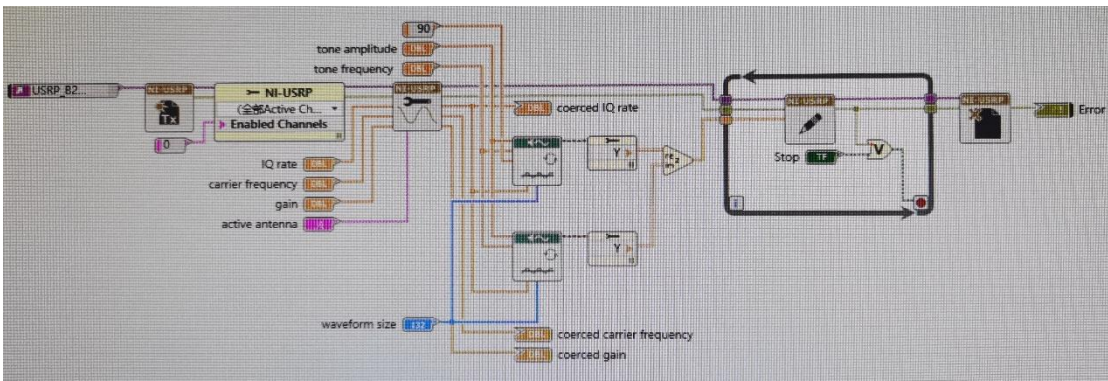


图 5.2.1 上变频电路程序框图

如图 5.2.2，保持载波频率 carrier frequency 为 2GHz，改变 tone frequency = 1k、10k、50k、100k，可以看到与载波发生电路相比，此时输出信号的频谱会发生移动：

表 5.2.1 上变频电路输出中心频率

tone frequency/kHz	1	10	50	100
中心频率 $\omega$ /GHz	1.99998333	2.000016666	2.000050000	2.000100000
$\Delta = (\omega - 2) \times 10^6$ /kHz	-16.67	16.666	50	100



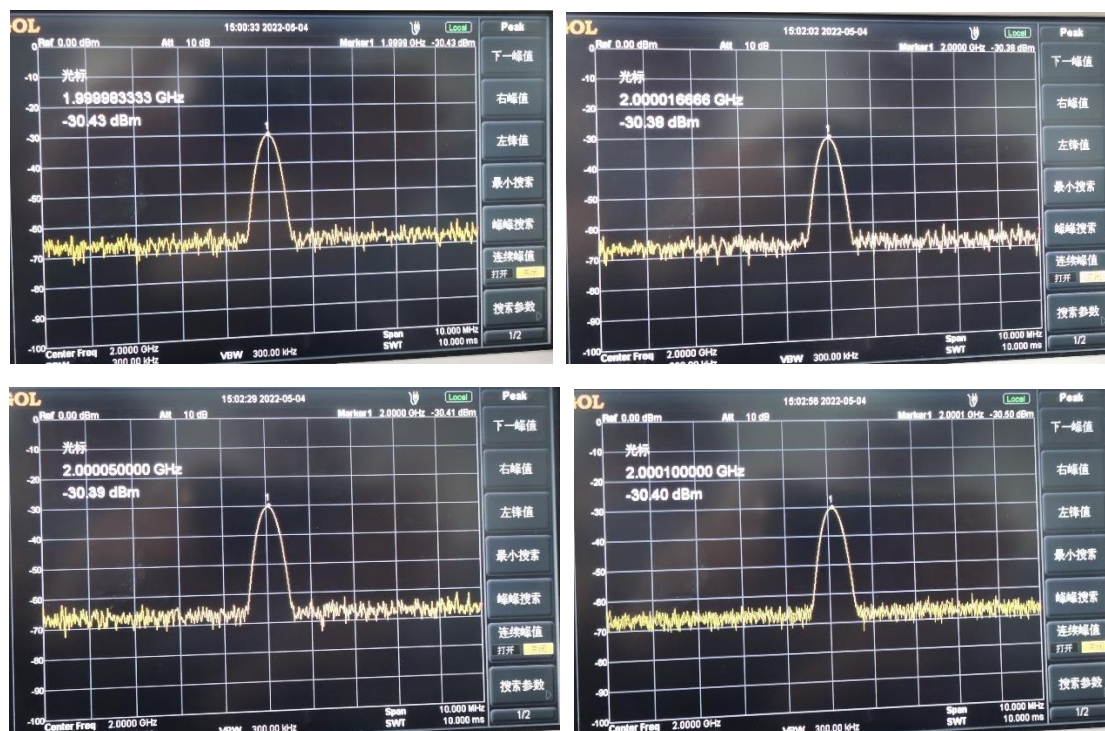


图 5.2.2 上变频电路信号频谱

当 tone frequency 为 1k 和 10k 时，由于噪声和波动的存在，中心频率的移动不够明显，但当 tone frequency 为 50k 和 100k 时，上变频电路输出的中心频率与 2GHz 的差值恰好与 tone frequency 相同，这与理论预期是相一致的。

(2) 改变 waveform size 参数至 1005，观察信号的频谱：

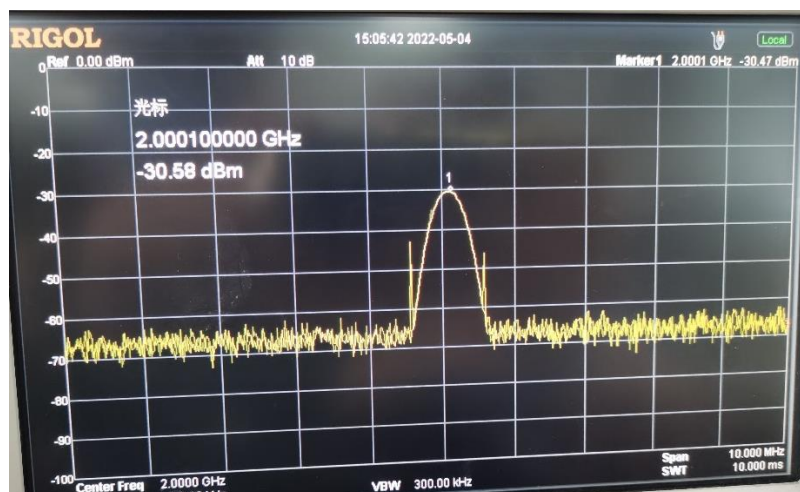


图 5.2.3 改变 waveform size 时输出信号频谱

如图，当固定 carrier frequency 为 2GHz，tone frequency 为 100kHz 时，调整参数 waveform size 为 1005，此时输出信号频谱将出现毛刺。这是由于修改取样点数对输出信号的相位产生了影响，使其频谱不再如先前平滑。

(3) 完成下变频电路，观察信号的频谱：

如图 5.2.4，为下变频电路的程序框图。若记 tone frequency 为  $\omega_0$ ，可以看到，此时第一个波形发生器的输出为  $\sin(\omega_0 t)$ ，作为同相信号，而第二个波形发生器加入了  $90^\circ$  的相偏，因此输出变为  $\cos(\omega_0 t)$ ，作为正交信号。若载波频率为  $\omega_c$ ，则 Write Tx Data 模块的输出为：

$$\sin(\omega_0 t) \times \cos(\omega_c t) - \cos(\omega_0 t) \times \sin(\omega_c t) = -\sin(\omega_c - \omega_0)t$$

此时输出信号频谱的谱峰将会出现在  $\omega_c - \omega_0$  处，而非载波频率  $\omega_c$  处。

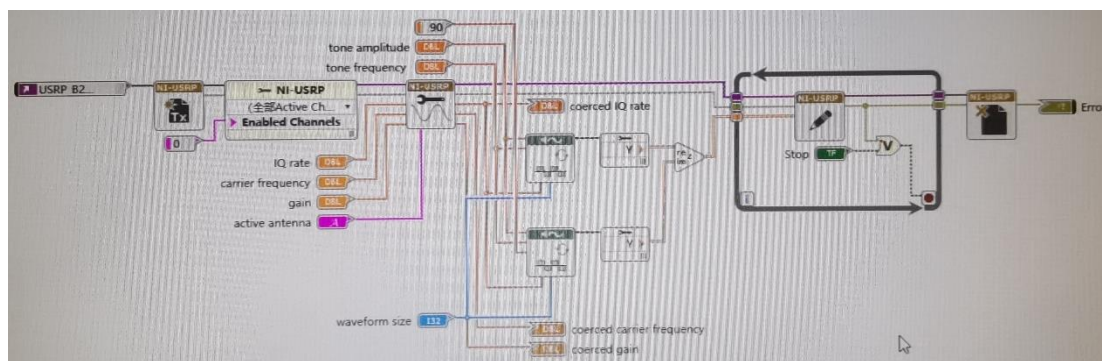


图 5.2.4 下变频电路程序框图

同理，设载波频率为 2GHz，修改 tone frequency 为 50k，100k，得到信号频谱如图 5.2.5 所示。可以看到，此时输出信号的中心频率与 2GHz 相比分别减小了 50kHz 和 100kHz，与理论相吻合。

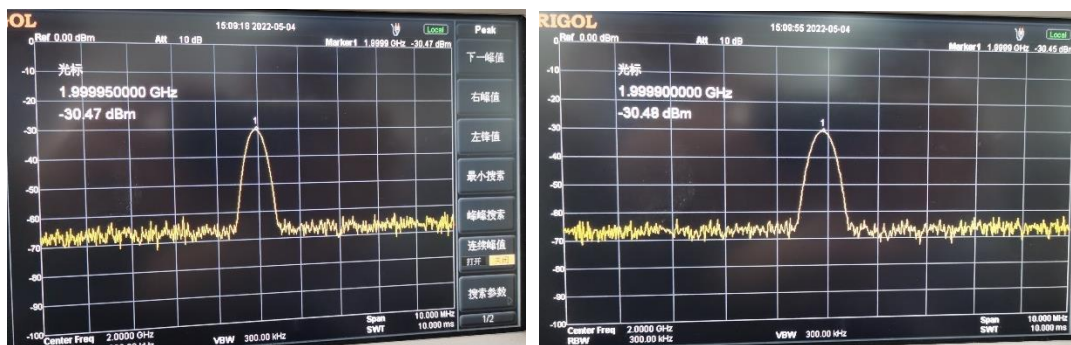


图 5.2.5 下变频电路信号频谱

(4) 完成双边带电路，观察信号的频谱：

如图 5.2.6，为双边带电路的程序框图。若记 tone frequency 为  $\omega_0$ ，载波频率为  $\omega_c$ ，则 Write Tx Data 模块的输出为：

$$\sin(\omega_0 t) \times \cos(\omega_c t)$$

此时将会在  $\omega_c - \omega_0$  和  $\omega_c + \omega_0$  两处出现谱峰。

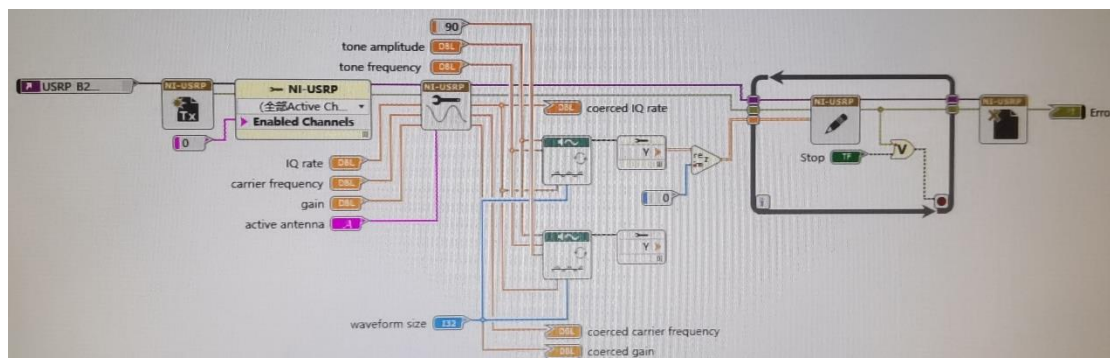


图 5.2.6 双边带电路程序框图

如图 5.2.7，设置载波频率为 2GHz，修改 tone frequency 为 50k, 100k，得到输出信号的频谱。可以发现，当 tone frequency 为 50kHz 时，上谱峰所在频率与 2GHz 的差值为 41.666kHz；当 tone frequency 为 100kHz 时，上谱峰所在频率与 2GHz 的差值为 91.666kHz，与理论偏差 50kHz 和 100kHz 较为接近。

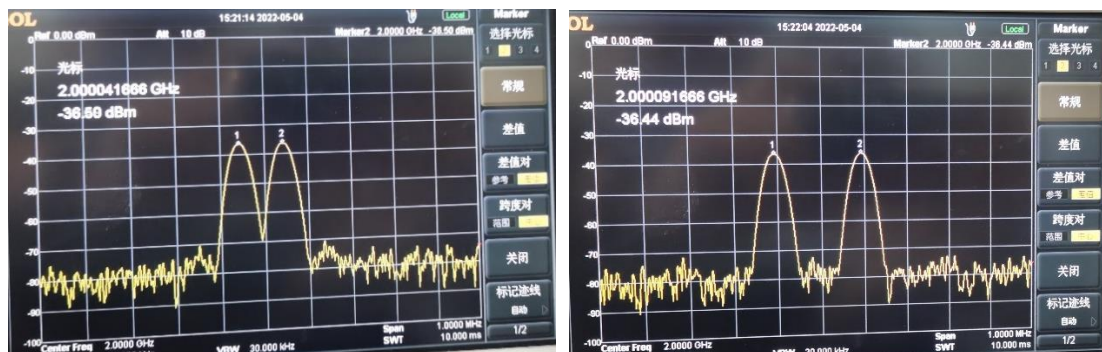


图 5.2.7 双边带电路信号频谱

然而，当 tone frequency 取值较小时，可能会出现两个峰区分不清晰的情况，如图 5.2.8 所示，其 tone frequency 为 10kHz。当然，由于噪声和波动的存在，此时输出信号的中心频率与理论值存在一定差异。

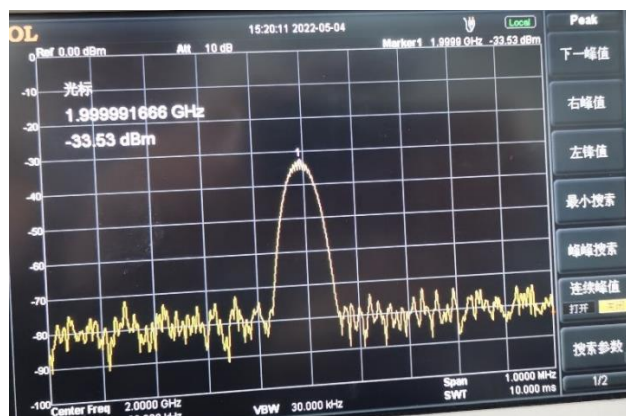


图 5.2.8 双边带电路信号频谱 (tone frequency 较小)



③ 问题 2:

(1) 先运行“upper-side\_IQ.gvi”，然后再运行“Rx.gvi”，观察接收信号的波形和频谱：

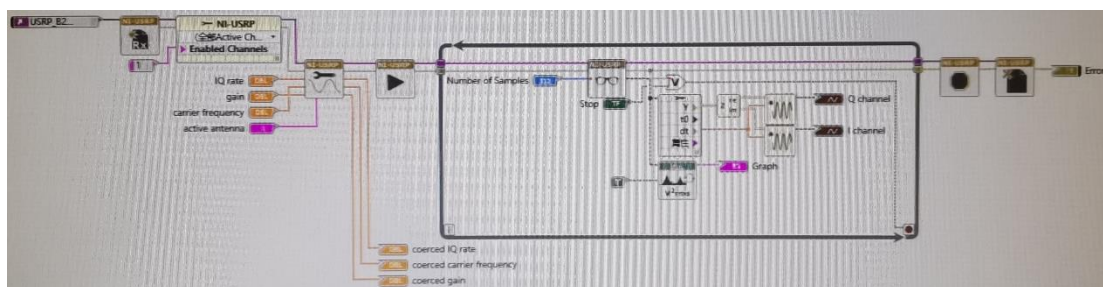


图 5.3.1 接收电路程序框图

如图 5.3.1，为最终的接收电路程序框图。将上边带电路的 tone frequency 修改为 100kHz，使用接收电路接收其产生的信号，得到信号的波形和频谱如下图所示：

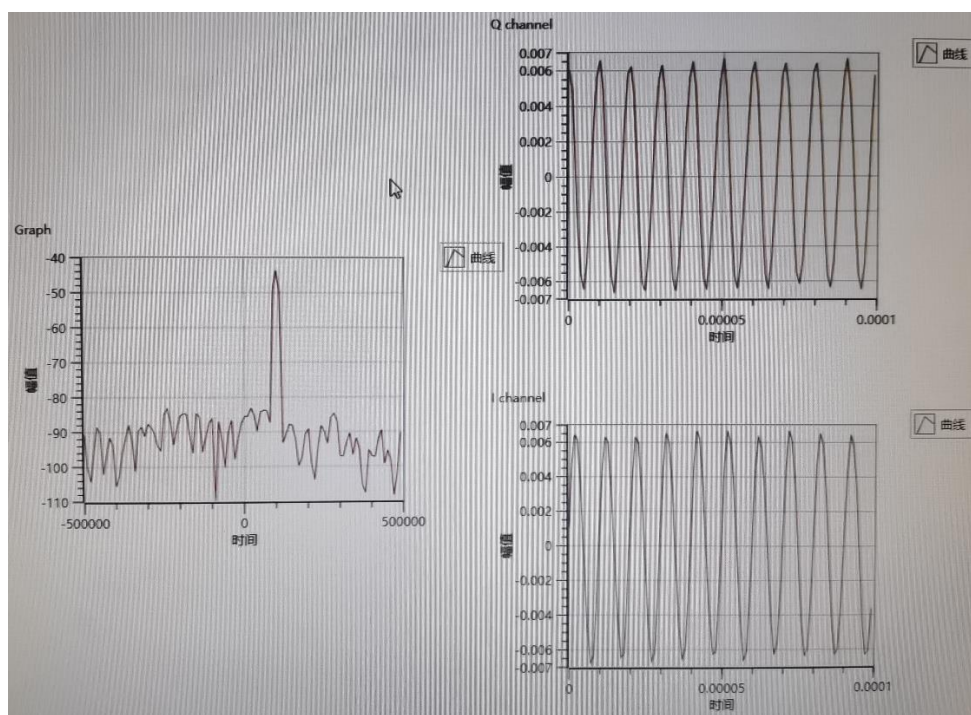


图 5.3.2 接收上边带电路信号波形和频谱

可以看到，此时信号频谱向正方向产生了比较明显的偏移，而 I、Q 两路信号的时域波形分别为余弦波和正弦波，两者相位差为  $90^\circ$ ，这与上边带电路设计时同相信号为  $\cos(\omega_0 t)$ ，正交信号为  $\sin(\omega_0 t)$  是相一致的（图中 Q channel 与 I channel 标反了）。

(2) 先运行“lower-side\_IQ.gvi”，然后再运行“Rx.gvi”，观察接收信号的波形和频谱：

如图 5.3.3，使用接收电路接收 tone frequency 为 100kHz 时下边带电路产生的信号，得到其波形和频谱为：

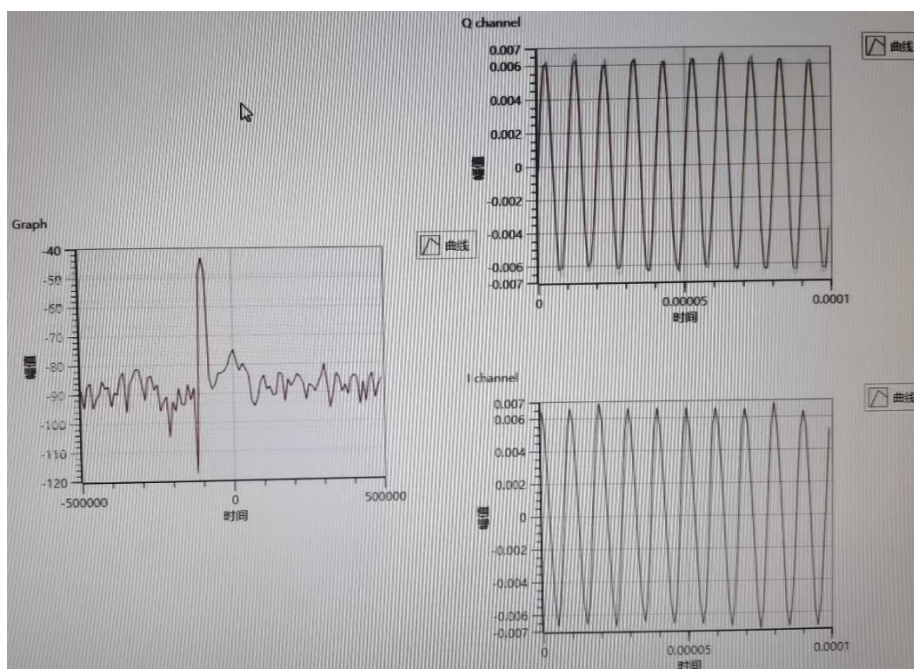


图 5.3.3 接收下边带电路信号波形和频谱

类似的，此时信号的频谱向负方向产生了偏移，且 I、Q 两路信号的时域波形分别为正弦波和余弦波，这与下边带电路设计时：同相信号为  $\sin(\omega_0 t)$ ，正交信号为  $\cos(\omega_0 t)$  相吻合（图中 Q channel 与 I channel 标反了）。故接收信号能被正确解调。

(3) 先运行“double-side\_IQ.gvi”，然后再运行“Rx.gvi”，观察接收信号的波形和频谱：

如图 5.3.4，将双边带电路的 tone frequency 修改为 100kHz，使用接收电路接收其产生的信号，得到波形和频谱为：

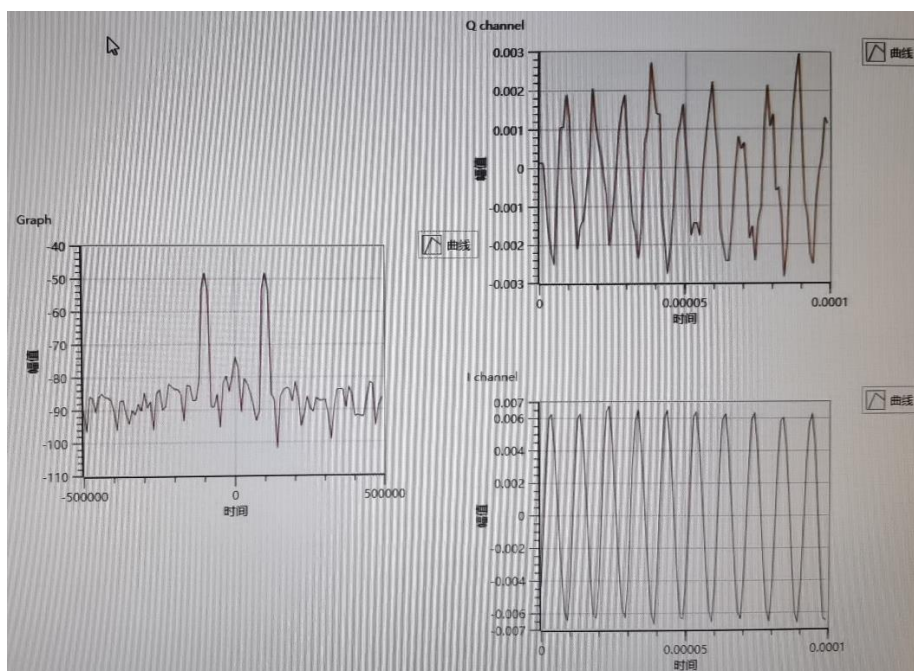


图 5.3.4 接收双边带电路信号波形和频谱

与频谱仪的输出相似，此时接收到的信号频谱出现了两个谱峰。与此同时，在双带电路设计中，输入的同相信号为正弦波，正交信号为 0；在接收时，得到的同相信号为正弦波，正交信号为余弦波，两者相位差为  $90^\circ$ （图中 Q channel 与 I channel 标反了）。显然，由于输出中出现了正交信号，导致同相信号的幅度在一定程度上出现了偏差，此时 IQ 解调的效果相对而言有所下降。

(4) 在“lower-side\_IQ.gvi”中，将正弦波信号改为方波信号，观察接收信号频谱的变化：

将下边带电路中的载波改为方波信号，此时接收到的信号频谱为：

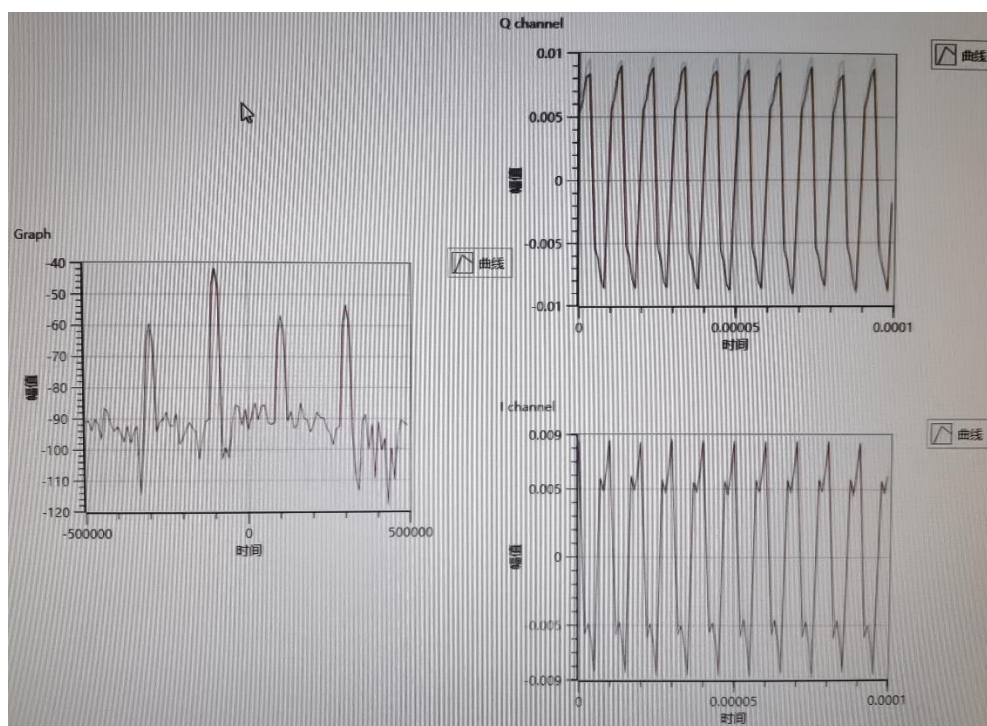


图 5.3.5 接收方波信号波形和频谱

如图 5.3.5，显然，对于方波信号而言，其存在无数个正弦谐波分量，故在频谱上会有无数个峰，且每个峰之间的幅度都有所不同，与输出相一致。同时，在时域图中，I channel 和 Q channel 的信号之间的相位相差  $90^\circ$ ，但都出现了一定程度的失真。