

## 一、实验目的和要求

- (1) 掌握二极管双平衡混频器和吉尔伯特双平衡混频器的工作原理 (2) 测量混频电路各主要参数

## 二、实验原理

混频是频谱的线性搬移，输出信号与输入信号相比，只是载波频率发生了变化，频谱结构没有变化，输出信号的波形也没有变化。实现混频的基本方法是将两个输入信号相乘。在发射机中使用上混频，本振信号将已调制的中频信号搬移到射频频段。在接收机中使用下混频，通过混频，将接收到的射频信号搬移到中频频段。设混频器的本振输入信号为：

$$v_{LO}(t) = V_{LO} \cos \omega_{LO} t$$

频器的另外一路信号为：

$$v_i = V_i \cos \omega_i t$$

路信号相乘，得到的输出信号为：

$$v_o = \frac{1}{2} V_{LO} V_i [\cos(\omega_i + \omega_{LO}) t + \cos(\omega_i - \omega_{LO}) t]$$

对于发射机系统中的上混频，是把差频滤除，保留和频信号；对于接收机系统中的下混频，是把和频滤除，保留差频信号。

### 1. 混频器的主要性能指标

(1) 混频增益：混频器的增益定义为混频器输出信号的幅度与输入信号幅度之比，是变频增益。(2) 线性度：1dB 增益压缩点：变频增益下降 1dB 时对应的输入信号功率。

(3) 隔离度：隔离度一般采用输出信号相对于输入信号的衰减量来表示，以 dB 为单位。

### 2. 二极管双平衡混频器

若二极管两端的电压为  $v_D(t)$ ，其伏安特性为：

$$i_D = g_D S_1(\omega t) v_D(t)$$

假设在二极管两端所加的电压为  $v_D(t) = v_{LO}(t) + v_i(t)$ ， $v_{LO}(t) = V_{LO} \cos \omega_{LO} t$  是本振信号，为大信号， $v_i(t) = V_i \cos \omega_i t$  是小信号。开关函数

$$S_1(\omega_{LO} t) = \frac{2}{\pi} \cos \omega_{LO} t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_{LO} t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_{LO} t \cdots$$

因此，作为混频器时，可以得到本振信号和输入小信号的和频  $\omega_{LO} + \omega_i$  和差频  $\omega_{LO} - \omega_i$  信号，通过滤波器即可获得所需的混频信号。这种简单的二极管混频电路，输出信号中的组合频率分量比较多，在实际应用中常使用二极管双平衡混频器

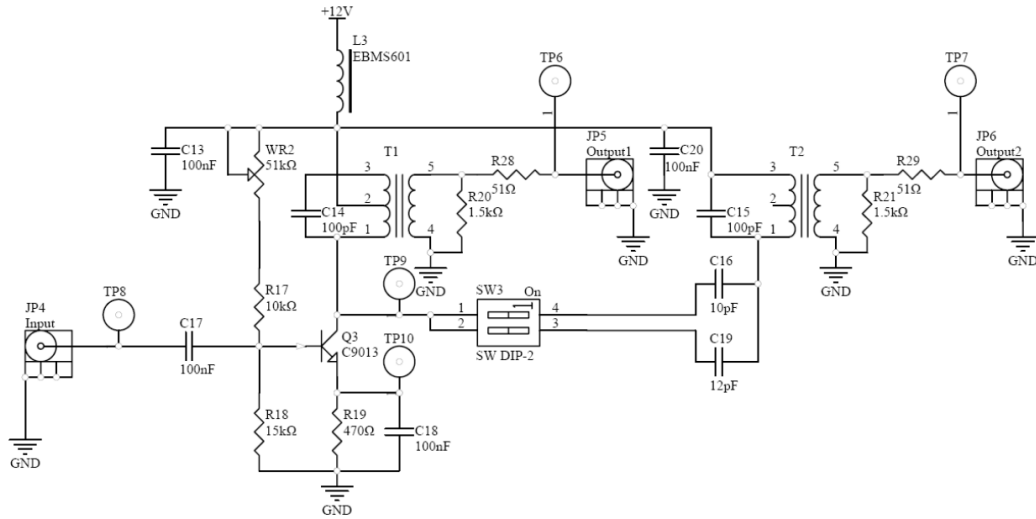


图 3.1.4 单、双调谐放大器实验电路

图 1: 二极管双平衡混频电路

求解回路方程可得整个本振信号周期内流过输出负载上的电流为：

$$i = (i_{D3} - i_{D4}) - (i_{D2} - i_{D1}) = \frac{2v_i(t)}{2R_L + R_D} S_2(\omega_{LO}t)$$

式中,  $S_2(\omega_{LO}t)$  为频率  $\omega_{LO}$  的双向开关函数,

$$S_2(\omega_{LO}t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega_{LO}t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_{LO}t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_{LO}t \dots$$

因此, 在输出负载电流中存在本振信号与输入小信号的和频  $\omega_{LO} + \omega_i$  和差频  $\omega_{LO} - \omega_i$  信号。

### 3. 吉尔伯特双平衡混频器

本振信号输入部分是两个差分对管, 射频口为一个差分对管。通常, 本振口送大信号, Q1、Q2、Q3、Q4 组成开关控制电路。射频口送小信号, 电路工作在线性放大区。

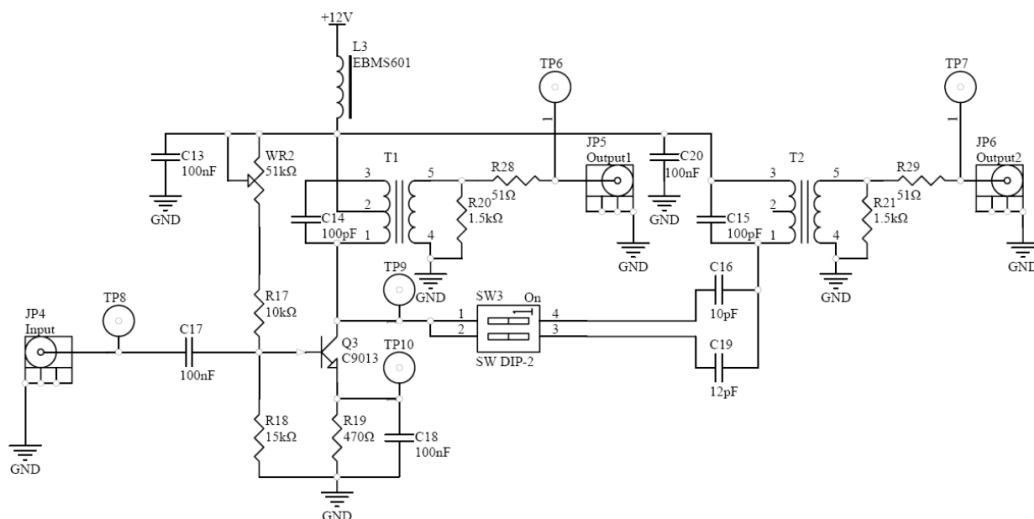


图 3.1.4 单、双调谐放大器实验电路

图 2: 吉尔伯特双平衡混频器

假设流过晶体管  $Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6$  的电流分别是  $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$ , 则中频口的输出电流为:

$$\begin{aligned} i &= (i_1 + i_3) - (i_2 + i_4) = (i_1 - i_2) - (i_4 - i_3) \\ &= (i_5 - i_6) \operatorname{th} \left( \frac{qv_{LO}}{2KT} \right) = I_0 \operatorname{th} \left( \frac{qv_{LO}}{2KT} \right) \operatorname{th} \left( \frac{qv_{RF}}{2KT} \right) \end{aligned}$$

对于本振信号为大信号, 射频信号为小信号的情况,

$$\operatorname{th} \left( \frac{qv_{LO}}{2KT} \right) \approx S_{LO}(\omega_{LO}t) \quad \operatorname{th} \left( \frac{qv_{RF}}{2KT} \right) \approx \frac{qv_{RF}}{2KT}$$

所以,

$$i = I_0 \frac{q}{2KT} v_{RF} \cdot S_{LO}(\omega_{LO}t)$$

将本振信号的开关函数代入上式, 就可以得到本振信号与射频小信号的差频、和频分量, 经过滤波器得变频信号。

### 三、实验电路分析

二极管双平衡混频器用作上变频混频器。混频器内部有四个相同的二极管构成环形乘法器, 本振信号 LO (选用 25MHz) 由外部信号源提供, 从 JP2 端输入, 由传输线变压器转双端输入, 中频信号 IF (选用 10.7MHz) 由外部信号源提供或由 2 号实验板的压控振荡器提供, 从 JP4 端输入。混频后的射频信号从 JP3 端输出, 经过跳线 J4 连接到带通滤波器的输入端 JP5。滤波器选用由 LC 实现的带通滤波器, 其中心频率为 36MHz, 带宽约 8MHz。其作用是将上变频输出信号中的和频信号 (35.7MHz) 滤出, 从 JP6 输出。

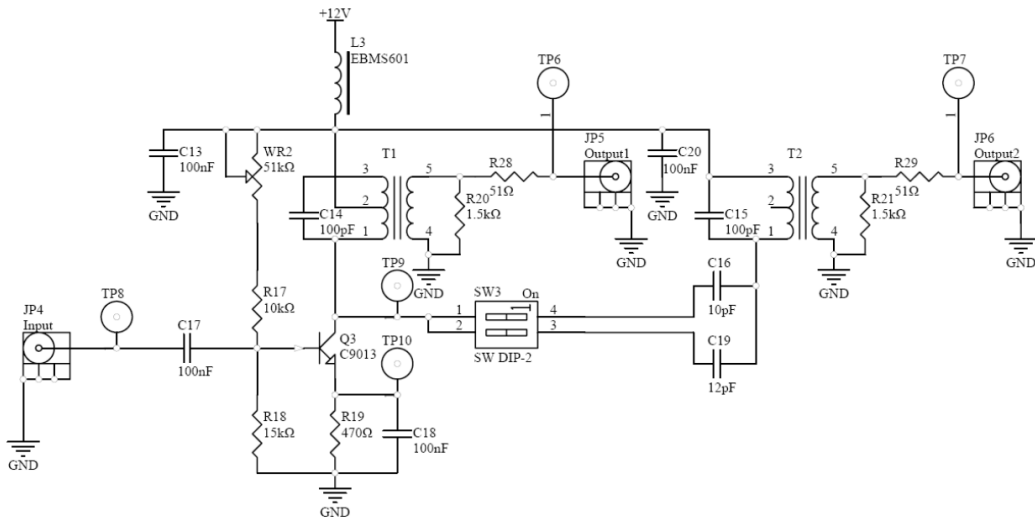


图 3.1.4 单、双调谐放大器实验电路

图 3: 二极管双平衡混频实验电路

下变频电路为吉尔伯特双平衡混频结构，实验电路采用 MC1496 双平衡调制解调芯片，如图 3.5. 5 所示，MC1496 芯片的内部由吉尔伯特单元电路构成。下变频电路的射频信号（35.7MHz）由外部信号源提供，或通过跳线 J5 连接带通滤波器，从上变频电路的输出中得到。25MHz 的本振信号由外部信号源提供，从 JP2 端输入，混频输出信号经过 10.7MHz 的陶瓷滤波器滤波，在 JP8 端得到中频输出信号。

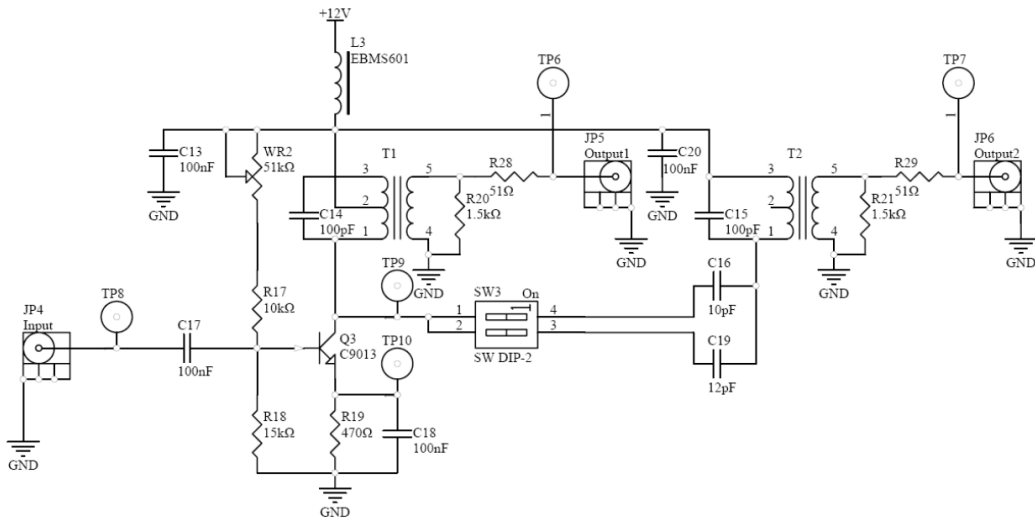


图 3.1.4 单、双调谐放大器实验电路

图 4: 二极管双平衡混频实验电路

四、 实验设备

- (1) 实验办 No01 1 块

- (2) 信号源 1 台
- (3) 双踪示波器 1 台
- (4) 频谱分析仪（含 TG）1 台
- (5) 万用表 1 台

## 五、 实验数据与结果分析

### 1. 二极管双平衡混频器上变频实验

#### 1.1 混频器变频增益测量

JP4 端输入幅度为 0dBm，频率为 10.7MHz 的正弦信号作为中频输入信号。设定频谱分析仪中心频率为 35.7MHz，设定扫频带宽 SPAN 为 50kHz，分辨率带宽 RBW 为 1kHz，读取输出信号中和频分量的幅度（功率），计算混频增益。

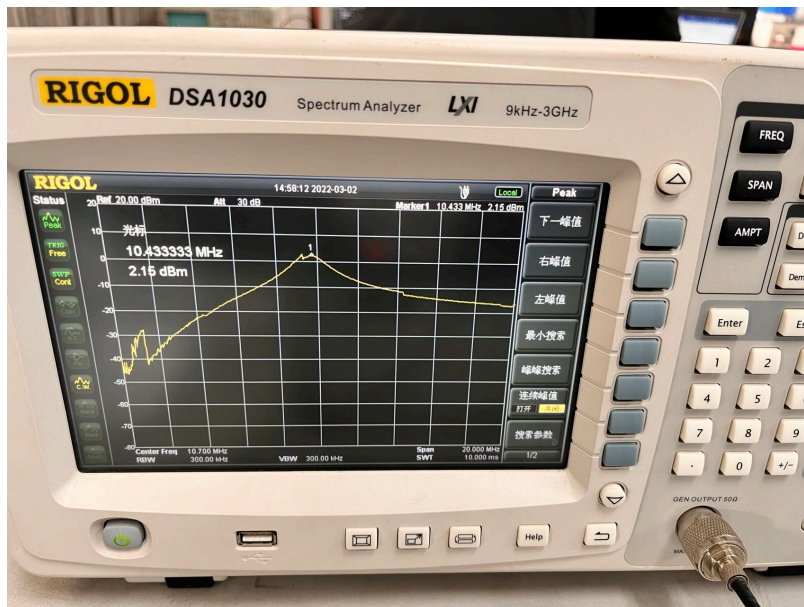


图 5: 0dBm 输入时的输出信号

从图中可以读出，和频分量的幅度为-7.16dBm，因此混频增益为-7.16dB。后来我们改变了本振信号的幅度，分别测试了本振信号幅度为 0dBm 和-10dBm。测量结果如下图：



图 6: 0dBm 输入时的输出信号

本振幅度为 0dBm 时，混频增益为-11.16dB。

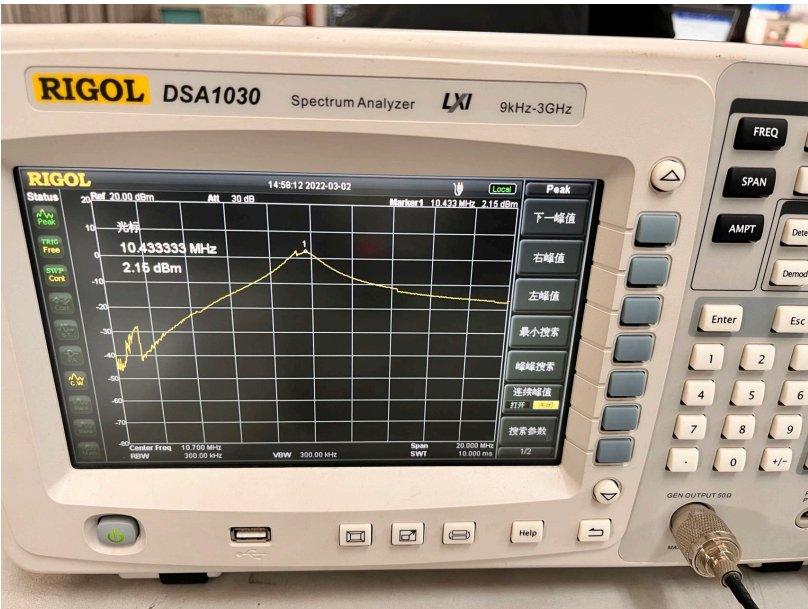


图 7: -10dBm 输入时的输出信号

本振幅度为-10dBm 时，混频增益为-21dB。因此混频增益随本振信号幅度增加而增加。本振信号幅度越高，混频增益越大。

输入的中频信号也可采用 AM 调制信号或 FM 调制信号。若是 AM 调制信号，可设置调制信号频率为 5kHz，调制度为 50%；若是 FM 调制信号，可设调制信号为 1kHz，调制频偏为 4.5kHz。在混频输出端分别观测以上 AM 调制与 FM 调制的信号频谱，并计算混频增益。





图 8: 输入 AM 调制信号时输出波形

混频增益为-11.54dB。

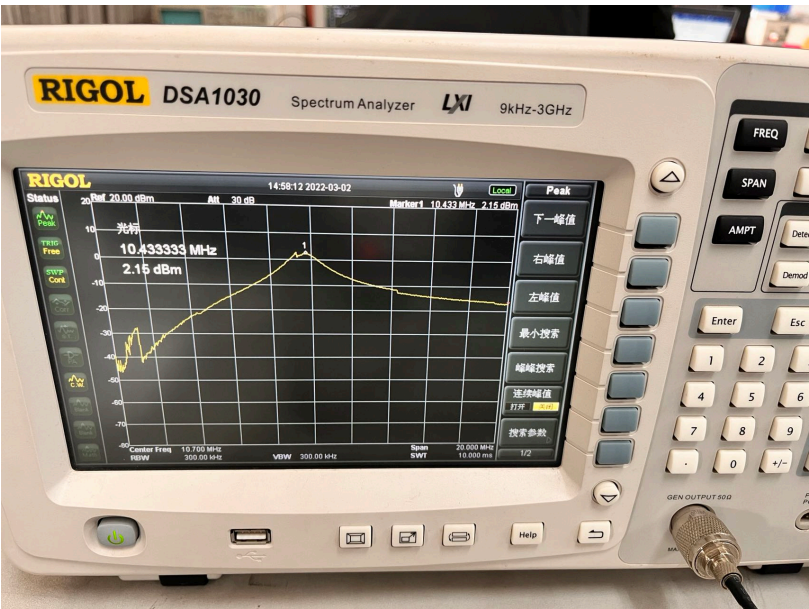


图 9: 输入 FM 调制信号时输出波形

混频增益为-13.76dB。

1.2 隔离性能测试

在使用频谱仪测量混频增益的基础上，在混频输出端 JP3，观察在本振频率点 25MHz，中频 10.7MHz 的信号分量大小，分别计算混频输出端对本振信号和中频信号的隔离度。

25MHZ 的输出分量为：-48.46dBm

隔离度为-48.46dBm-10dBm=-58.46dB

10.7MHz 的输出分量为-23.77dBm

隔离度为-23.77dBm-0=-23.77dB

### 1.3 带通滤波性能测试

保持以上输入信号不变，连接跳线 J4，滤波器设成 LC 带通滤波器（将 J1 和 J2 的第 6 位跳线接通，J3 的 1-2 脚连通）；将频谱分析仪的中心频率设为 25MHz，扫宽设为 40MHz；频谱仪输入分别连接 JP3 和 JP6，观测混频信号通过滤波器滤波前后的频谱，测量滤波前后和频与差频的信号幅度。

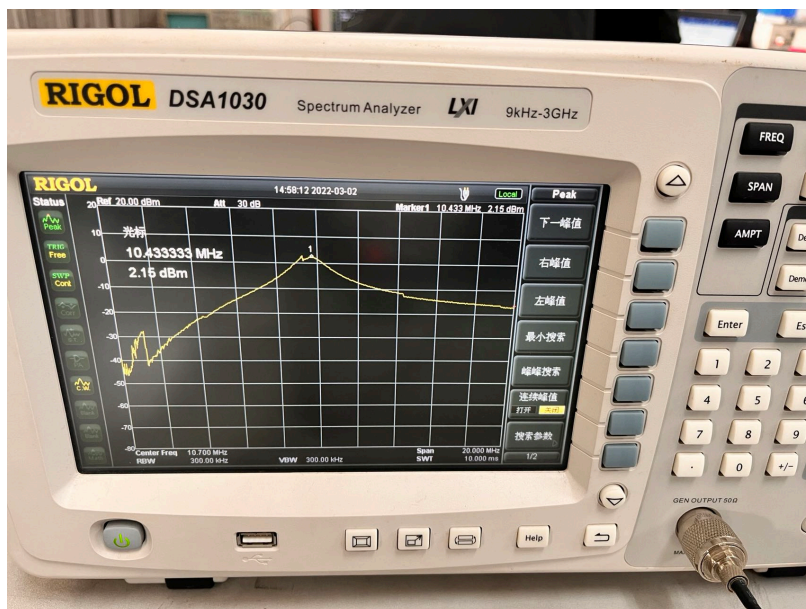


图 10: 滤波前和频



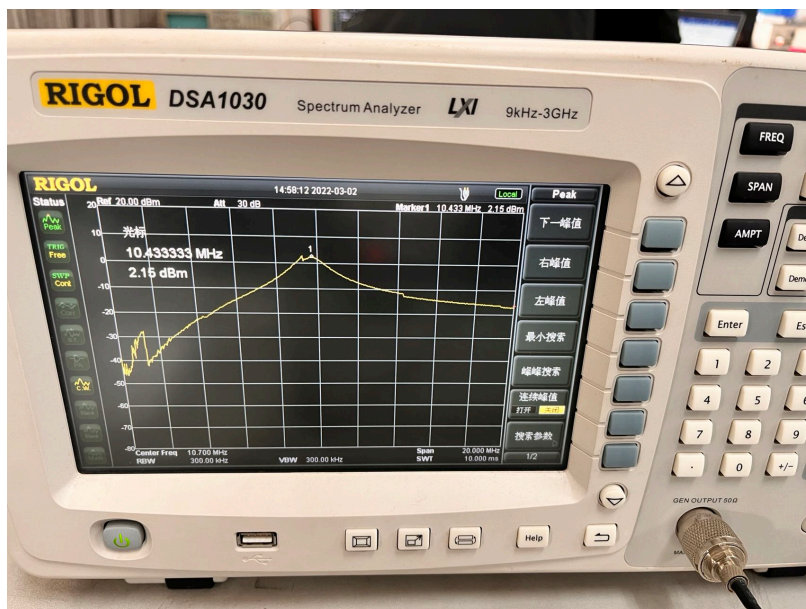


图 11: 滤波前差频

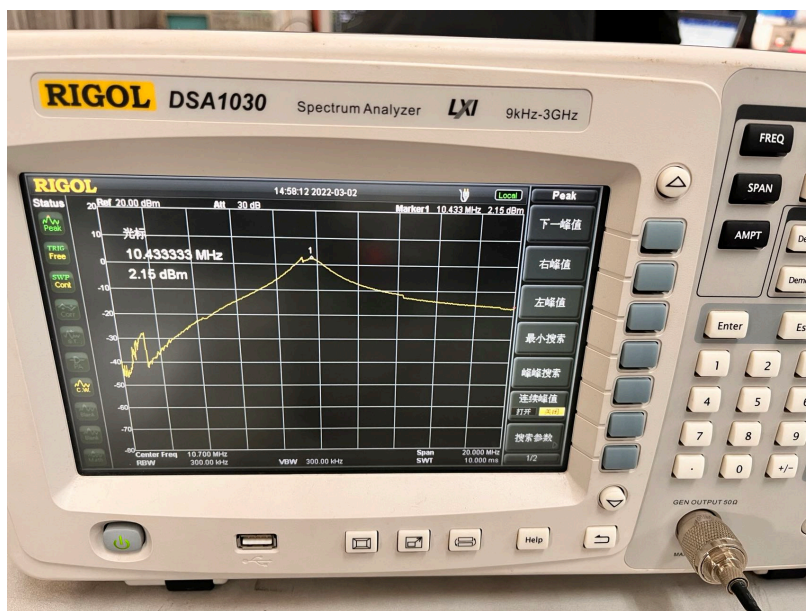


图 12: 滤波后和频

从图中可以看出滤波前和频信号幅度为-10.08dBm，滤波前差频信号为-6.58dBm。滤波后和频信号幅度为21.56dBm，差频信号幅度为 0。和频信号被滤除。

2. 吉尔伯特双平衡混频器下变频实验

2.1 混频器变频增益测量

设定本振信号的幅度为 10dBm；设定射频信号的幅度为-10dBm；设定频谱分析仪中心频率为 10.7MHz，扫描带宽 SPAN 为 50KHz，在 JP8 端用频谱分析仪测量混频器的中频输出，计算混频增益。



图 13: 吉尔伯特双平衡混频器混频增益

可以看到输出信号为-18.09dBm，因此混频增益为-8.09dBm。

2.2 混频器 1dB 压缩点测量

在本振信号幅度为 10dBm 的条件下，采用信号源作为射频输入，改变输入信号的幅度，测量输出信号的幅度，填入下表，计算 1dB 压缩点。

输入功率（dBm）	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16
输出功率（dBm）	-29.17	-28.36	-27.45	-26.5	-25.61	-24.67	-23.85	-22.98	-22.15	-21.38
增益（dB）	-4.17	-4.36	-4.45	-4.5	-4.61	-4.67	-4.85	-4.98	-5.15	-5.38
输入功率（dBm）	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6
输出功率（dBm）	-20.66	-20.03	-19.45	-18.9	-18.47	-18.06	-17.75	-17.54	-17.33	-17.18
增益（dB）	-5.66	-6.03	-6.45	-6.9	-7.47	-8.06	-8.75	-9.54	-10.33	-11.18

从上表中可以看出，刚开始随着输入功率的增大，增益基本上为恒定值在-4dB 左右，然后到输入功率增大到-17dBm 的时候，输出功率为-22.15dBm，此时增益为-5.15dB，此点即为 1dB 压缩点。

## 六、 思考题

1. 混频器的主要性能指标有哪些？
2. 吉尔伯特双平衡混频器与二极管双平衡混频器相比，优势有哪些？
3. 混频器变频增益主要受哪些因素的影响？