

# 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 3 月 9 日

# 浙江大学实验报告

专业：信息工程  
姓名：黄嘉欣  
学号：3190102060  
日期：2022年3月9日  
地点：东四-319

课程名称：通信原理实验 指导老师：龚淑君 金向东 成绩：\_\_\_\_\_  
实验名称：二极管混频与吉尔伯特混频 实验类型：设计性实验 同组学生：张维豆

## 一、实验目的

- 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

混频器主要应用于通信系统的发射和接收机中。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。这可以通过器件的非线性特性实现，这些器件主要有二极管、三极管和场效应管。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：

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

混频器的另外一路信号为：

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

两路信号相乘，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：

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

也可以用功率增益来表示：

$$G_P(dB) = P_{out}(dBm) - P_{in}(dBm)$$

(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。

三阶互调截点：假如混频器输入两个射频信号，频率分别是 $f_{RF1}$ 、 $f_{RF2}$ ，它们的三阶互调分量为： $2f_{RF1} - f_{RF2}$ （或 $2f_{RF2} - f_{RF1}$ ）。与本振混频后产生的信号如果在中频带宽内，就会对中频输出产生干扰。使三阶互调产生的中频分量与有用中频信号相等时的输入信号功率定义为三阶互调截点。

(3) 隔离度：

隔离度主要考虑混频器本振口、射频口和中频口之间信号的隔离。对于接收机，本振信号向射频口泄露，则会影响低噪放的工作，甚至通过天线往外辐射。射频口向本振口的泄露会影响本地振荡器的工作。本振信号向中频口泄露，本振大信号会使中频放大器过载。

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：

在大信号的作用下，二极管的伏安特性可以看作是从原点出发，斜率为 $g_D$ 的直线，二极管可以看成是受大信号控制的单向开关。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，且为大信号， $v_i = V_i \cos \omega_i t$ 是小信号。

开关函数 $S_1(\omega_{LO} t) = \frac{2}{\pi} \cos \omega_{LO} t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_{LO} t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_{LO} t - \dots$ 。因此，作为混频器时，由二极管伏安特性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，其电路如图2.1所示。

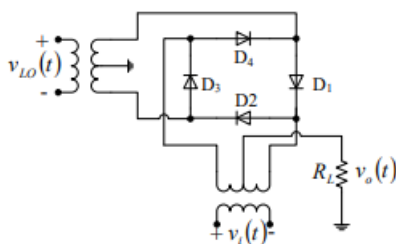


图 2.1 二极管双平衡混频电路

二极管双平衡混频器由四只性能相同的二极管组成环路，本振大信号和输入小信号通过变压器由单端输入变为双端平衡输入。在本振信号的正半周期内，二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 导通；负半周期内，二极管 $D_3$ 、 $D_4$ 导通。假设流经二极管 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 的电流分别是 $i_{D1}$ 、 $i_{D2}$ 、 $i_{D3}$ 、 $i_{D4}$ ，通过求解回路方程可得：

$$i_{D2} - i_{D1} = \frac{-2v_i(t)}{2R_L + R_D} S_1(\omega_{LO}t)$$

$$i_{D3} - i_{D4} = \frac{-2v_i(t)}{2R_L + R_D} S_1(\omega_{LO}t + \pi)$$

式中， $S_1(\omega_{LO}t)$ 、 $S_1(\omega_{LO}t + \pi)$ 是本振信号两个不同半周的开关函数。

在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：

吉尔伯特双平衡混频器如图 2.2 所示，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， $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 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。它与单管或单平衡混频器相比的优点是：各个端口之间的隔离性能很好，线性范围比较大。

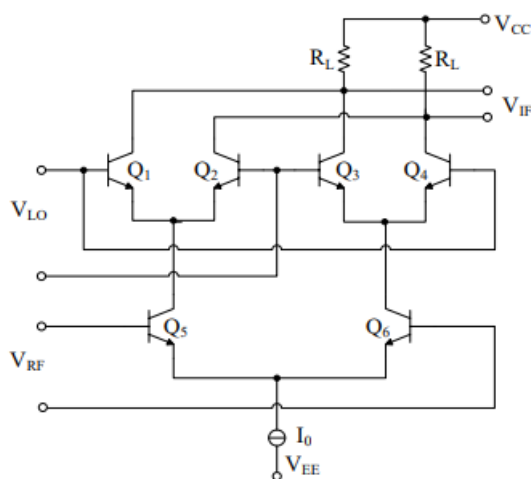


图 2.2 吉尔伯特双平衡混频器

假设流过晶体管 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 、 $Q_5$ 、 $Q_6$ 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：

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

对于本振信号为大信号，射频信号为小信号的情况，

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

所以：

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

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，经过滤波器得到下变频信号。

### 三、实验电路分析

如图 3.1，为实验电路的整体结构，其由上变频电路，带通滤波器，下变频电路组成。

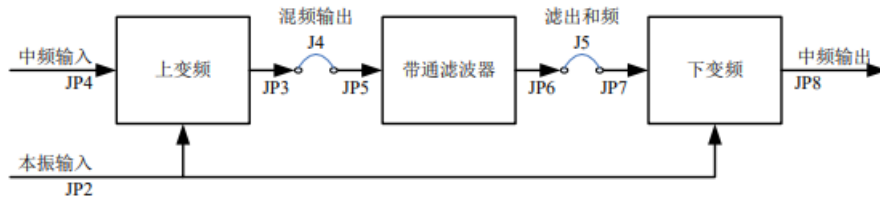


图 3.1 混频实验电路结构

二极管双平衡混频器用作上变频混频器，如图 3.2 所示。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JP<sub>2</sub>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JP<sub>4</sub>端输入。混频后的射频信号从JP<sub>3</sub>端输出，经过跳线J<sub>4</sub>连接到带通滤波器的输入端JP<sub>5</sub>。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JP<sub>6</sub>输出。

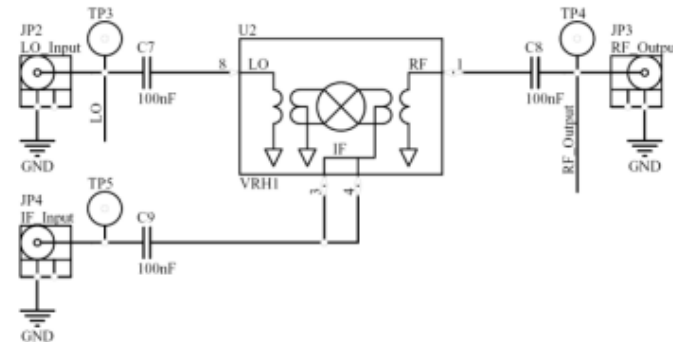


图 3.2 二极管双平衡混频实验电路

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 3.3 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 $J_5$ 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 $JP_2$ 端输入，混频输出信号经过10.7MHz的陶瓷滤波器滤波，在 $JP_8$ 端得到中频输出信号。

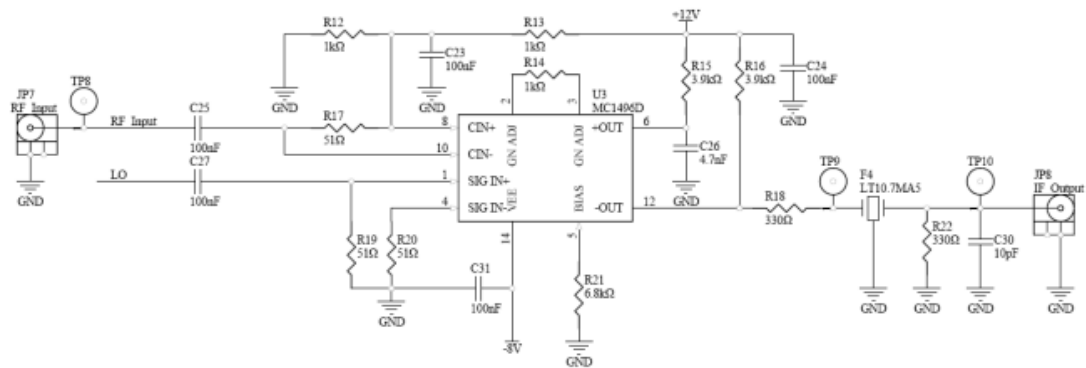


图 3.3 吉尔伯特双平衡混频实验电路

#### 四、实验设备

- |               |      |
|---------------|------|
| ① 实验板 No01    | 1 块； |
| ② 信号源         | 2 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、实验内容与步骤

- ① 二极管双平衡混频器上变频实验：

(1) 测试电路搭建：

混频器特性测试使用高频信号源作为输入，混频器的本振信号输入端，以及中频输入端分别接高频信号源，使用频谱分析仪对输出信号进行测量分析， $JP_3$ 、 $JP_6$ 分别是滤波前与滤波后的混频输出。

按图 5.1 所示连接实验板及测试设备， $JP_2$ 端输入大小为10dBm，频率为25MHz的正弦信号作为本振信号。 $JP_4$ 端按实验步骤要求，分别输入单频信号、AM 信号或 FSK 信号作为中频输入，打开电源。

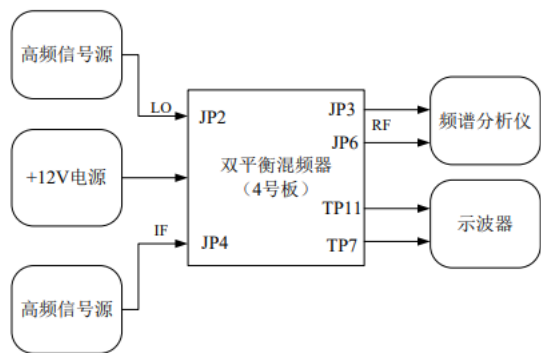


图 5.1 上变频混频器特性测试连线框图

(2) 混频器变频增益测量：

$JP_4$  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  $1kHz$ ，读取出信号中和频分量的幅度（功率），计算混频增益。改变输入的本振信号的幅度，观察对混频增益的影响。

在以上测试中，为更接近真实，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。

(3) 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  $JP_3$ ，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。

(4) 带通滤波性能测试：

保持以上输入信号不变，连接跳线  $J_4$ ，滤波器设成 LC 带通滤波器（将  $J_1$  和  $J_2$  的第 6 位跳线接通， $J_3$  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  $JP_3$  和  $JP_6$ ，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，了解和频提取的过程。

② 吉尔伯特双平衡混频器下变频实验：

(1) 测试电路搭建：

如图 5.2 所示，连接实验板及测试设备。 $25MHz$  的本振信号由高频信号源从  $JP_2$  端输入， $35.7MHz$  的射频信号由高频信号源从  $JP_7$  端输入（也可以通过跳线  $J_5$ ，将上变频信号直接作为输入）。中频输出端  $JP_8$  接频谱分析仪。

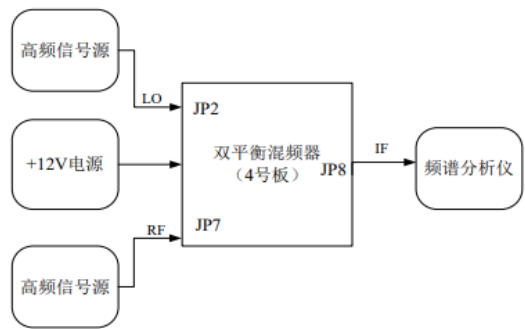


图 5.2 下变频混频器特性测试连线框图

(2) 混频器变频增益测量：

设定本振信号的幅度为 $10\text{dBm}$ ；设定射频信号的幅度为 $-10\text{dBm}$ ；设定频谱分析仪中心频率为 $10.7\text{MHz}$ ，扫描带宽 SPAN 为 $50\text{KHz}$ ，在 $\text{JP}_8$ 端用频谱分析仪测量混频器的中频输出，计算混频增益。

(3) 混频器 $1\text{dB}$ 压缩点测量：

在本振信号幅度为 $10\text{dBm}$ 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并记录，计算 $1\text{dB}$ 压缩点。

六、实验结果记录与分析

① 二极管双平衡混频器上变频实验

(1) 混频器变频增益测量

表 6.1 本振信号幅度对混频增益的影响测量表

输入本振信号幅度/ $\text{dBm}$	0	5	10	15	17.9601
输出和频分量幅度/ $\text{dBm}$	-13.18	-10.33	-9.24	-8.92	-8.78
混频增益/ $\text{dB}$	-13.18	-15.33	-19.24	-23.92	-26.7401

如表 6.1，当输入的本振信号幅度为 $10\text{dBm}$ 、中频信号幅度为 $0\text{dBm}$ 时，输出信号中和频分量的频率为 $(25\text{MHz} + 10.7\text{MHz}) = 35.7\text{MHz}$ ，该分量的幅度为 $-9.24\text{dBm}$ ，此时混频增益为 $-19.24\text{dB}$ 。改变输入本振信号的幅度，步进为 $5\text{dBm}$ ，如表 6.1 所示，可以发现随着本振信号幅度的增加，混频增益逐渐降低。因此，本振信号幅度对混频器的变频增益存在较大影响。

调整输入本振信号幅度为 $10\text{dBm}$ 。当中频信号采用 AM 调制信号时，得到的输出信号频谱如图 6.1 所示，此时的输出和频分量幅度为 $-13.73\text{dBm}$ ，故混频增益为 $-23.73\text{dBm}$ ；当中频信号采用 FM 调制信号时，得到的输出信号频谱如图 6.2 所示，此时的输出和频分量幅度为 $-26.31\text{dBm}$ ，故混频增益为 $-36.31\text{dBm}$ 。



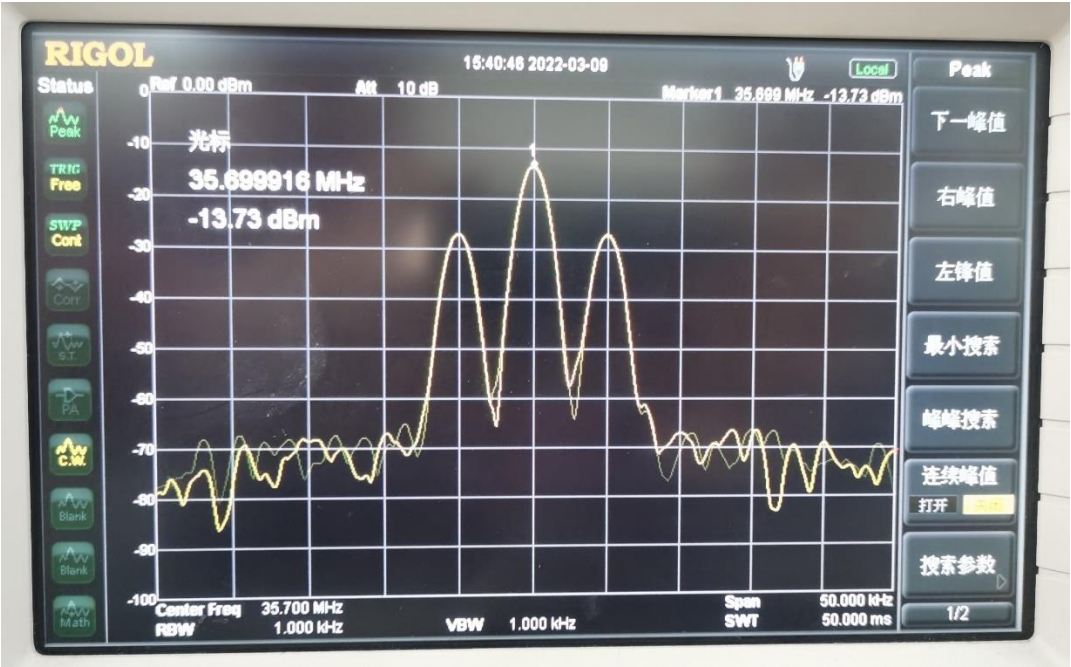


图 6.1 AM 调制输出信号频谱



图 6.2 FM 调制输出信号频谱

(2) 隔离性能测试

表 6.2 隔离性能测试表

	输入幅度/dBm	输出幅度/dBm	隔离度/dB
本振信号	10	-47.86	-57.86
中频信号	0	-22.41	-22.41

经测量，在混频输出端，本振频率点(25MHz)的信号分量幅度为-47.86dBm；中频(10.7MHz)的信号分量大小为-22.41dBm。由于输入的本振信号幅度为10dBm，输入的中频信号幅度为0dBm，故混频输出端对本振信号的隔离度为-57.86dB，对中频信号的隔离度为-22.41dB。

(3) 带通滤波性能测试

表 6.3 带通滤波性能测试表

	和频信号幅度/dBm	差频信号幅度/dBm
滤波前	-9.21	-6.36
滤波后	-29.52	-62.74

如图 6.3、6.4，分别为混频信号通过滤波器前后的信号。根据表 6.3 中的测量数据可以发现，滤波前后，和频信号幅度与差频信号幅度都出现了一定的下降，但相比而言，差频信号的衰减比和频信号要大得多。这是因为实验电路中采用的带通滤波器的中心频率为36MHz，带宽约8MHz，而和频信号的频率为35.7MHz。因此，通过此滤波器，我们成功地将和频信号与其余频段的信号进行了分离，即完成了和频提取的过程。可以注意到的是，滤波前后，在和频信号附近频段的信号也有波峰输出，经测量，其频率为32MHz和39.3MHz，皆在滤波器通带之内，实验结果与理论相一致。

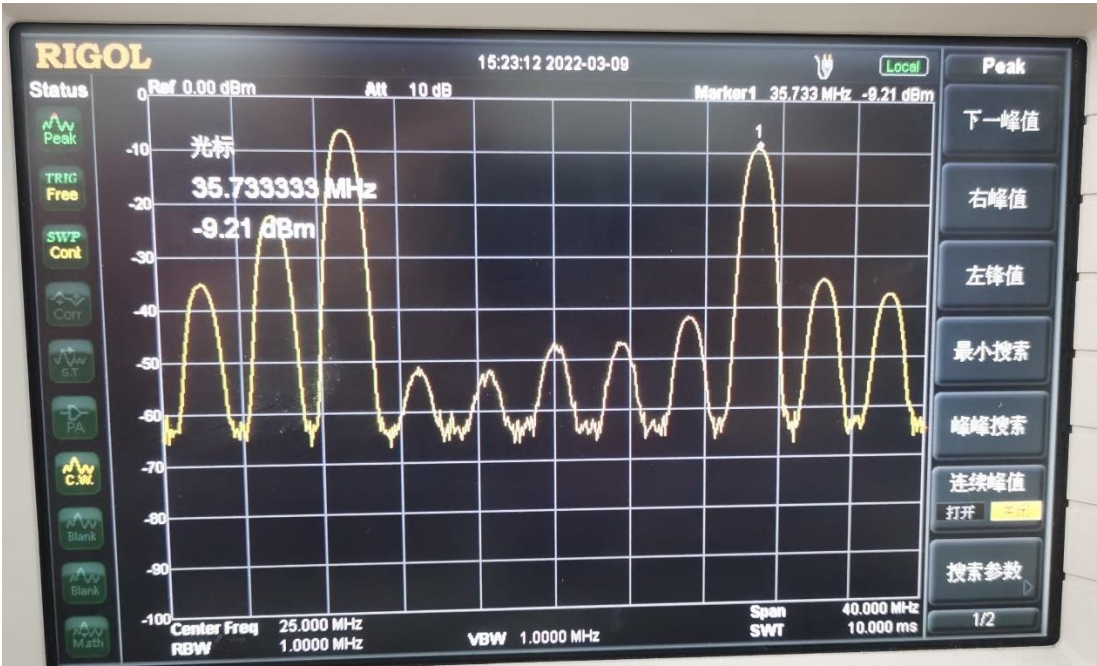


图 6.3 滤波前混频信号

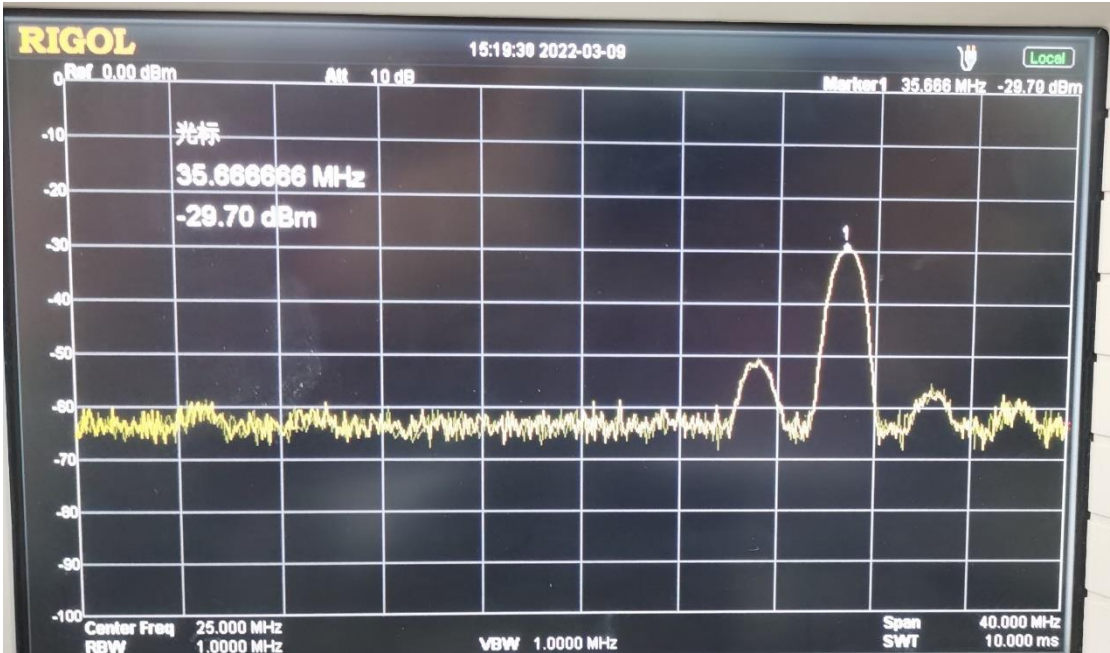


图 6.4 滤波后混频信号

装  
订  
线

② 吉尔伯特双平衡混频器下变频实验

(1) 混频器变频增益测量

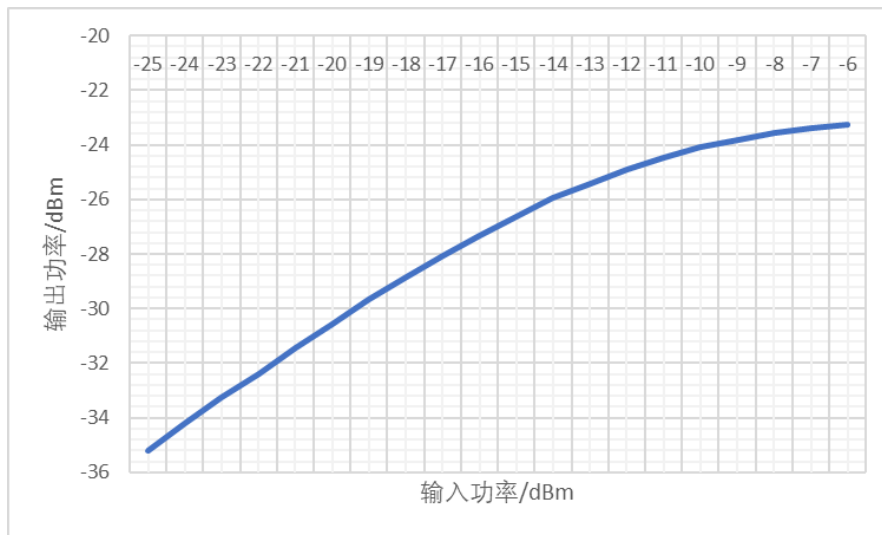
经测量，当采用吉尔伯特双平衡混频器时，混频器的中频输出为 $-24.12\text{dBm}$ ，故此时的混频增益为 $(-24.12 - 10) = -34.12\text{dB}$ 。

(2) 混频器1dB压缩点测量

表 6.4 1dB增益压缩点测试表

输入功率 /dBm	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16
输出功率 /dBm	-35.19	-34.23	-33.25	-32.38	-31.43	-30.58	-29.66	-28.86	-28.06	-27.31
增益/dB	-10.19	-10.23	-10.25	-10.38	-10.43	-10.58	-10.66	-10.86	-11.06	-11.31
输入功率 /dBm	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6
输出功率 /dBm	-26.62	-25.95	-25.42	-24.89	-24.48	-24.09	-23.83	-23.58	-23.41	-23.26
增益/dB	-11.62	-11.95	-12.42	-12.89	-13.48	-14.09	-14.83	-15.58	-16.41	-17.26

如表 6.4，当输入功率以 $1\text{dBm}$ 为步进从 $-25\text{dBm}$ 到 $-17\text{dBm}$ 变化时，放大器的线性增益约保持在 $-11\text{dB} \sim -10.2\text{dB}$ 之间，此时电路的输出功率与输入功率为线性关系，放大器增益变化不大，约为固定值。当然，随着输入功率的不断增大，可以发现输出功率虽在增大，但其每次步进所增大的幅度却在逐渐降低，即放大器的增益不断减小。当输入功率达到 $-12\text{dBm}$ 时，实际增益比理想线性增益下降约 $1\text{dB}$ ，如图 6.5 所示，故 $1\text{dB}$ 压缩点处的输入功率 $IP_{1\text{dB}} = -12\text{dBm}$ ，此时的输出功率为 $OP_{1\text{dB}} = -24.89\text{dBm}$ 。

图 6.5 混频器 $1\text{dB}$ 压缩点测量

## 七、思考题

### ① 混频器的主要性能指标有哪些？

答：混频器的主要性能指标包括混频增益、线性度、隔离度、噪声系数等等。

### 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？

答：根据实验结果，相对而言，吉尔伯特双平衡混频器对本振频率和中频具有良好的隔振性，隔离性能更好，且具有更低的混频增益、更大的线性范围。除此之外，其输出信号中的组合频率分量较二极管双平衡混频器更少，因此可以提供更加良好的性能。

### ③ 混频器变频增益主要受哪些因素的影响？

答：由实验结果可知，混频器的变频增益与本振信号的幅度有关。除此之外，由于混频通过器件的非线性特性实现，其变频增益也会受到晶体管静态工作点的影响。将静态工作点调整到非线性最强的点上，将有助于我们取得更好的混频增益。