

《非线性电路实验》实验报告

实验名称: Multiplier-Based Mixer 指导教师: 冯鹏 fengpeng06@semi.ac.cn
姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-06
实验日期: 2025.12.04 实验地点: 西实验楼(8号楼) 308 是否调课/补课: 否 成绩:

目录

1 实验目的	1
2 实验仪器	1
3 实验原理	2
3.1 混频器基本原理	2
3.2 实验电路简要分析	2
4 实验内容与步骤	3
5 实验结果与分析	3
6 思考题	5
6.1 改变信号发生器提供的 IN1 输入频率时, 输出波形和频率作何变化, 为什么?	5
附录 A 原始数据记录表	7
附录 B 实验预习报告	7
附录 C MATLAB Codes	10

1 实验目的

- (1) 学习并掌握变频电路的相关理论;
- (2) 掌握乘法混频电路的工作原理和调试方法。

2 实验仪器

- (1) 高频实验箱 - 乘法调幅/混频实验板 (031132201809392)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (080103201901376)
- (3) 信号发生器 GWINSTEK AFG-2225 (080102201901355)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (C181503983)

3 实验原理

3.1 混频器基本原理

在通信系统中，经常需要将信号自某一频率变换为另一频率，例如把一个已调的高频信号变成另一个较低频率的同类已调信号 (Downconversion, 下变频)，又或者把一个已调的低频信号变成另一个较高频率的同类已调信号 (Upconversion, 上变频)。完成这种频率变换的电路称为变频器或混频器，它是无线通信系统中的重要组成部分。

混频器 (Mixer) 通常由非线性器件作为核心 (二极管、晶体管、模拟乘法器模块)，配合其它有源模块和无源器件组成，这些器件会将输入信号注入到非线性器件中，由其完成混频操作。近年混频器方面的技术前沿表明，混频器的带宽主要受到无源器件限制，而非受到二极管或晶体管的限制，因为后者的带宽一般能很好地满足要求。因此，设计高性能混频器的关键在于合理设计无源器件网络，以实现所需的频率响应特性。

作为射频系统中的关键组件，混频器的主要参数有：

- (1) 功率增益 (Power Gain): $G_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ ，表示输出信号功率与输入信号功率之比；
- (2) 噪声系数 (Noise Figure): $NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$ ，表示输入信号与输出信号的信噪比之比；
- (3) 混频失真与干扰：混频器的失真包括频率失真等非线性失真，此外由于器件的非线性还存在着组合频率干扰，这些干扰往往伴随有用信号而存在，严重影响混频器正常工作，因此需关注减小混频失真与干扰；
- (4) 选择性：指混频器选出有用输出信号而滤除其他干扰信号的能力，选择性越好输出的频谱纯度越高，往往取决于输出端的带通滤波器的性能。

3.2 实验电路简要分析

本次实验采用的 Multiplier-Based Mixer (乘法器混频器) 如 Figure 1 所示，用于将高频输入信号 f_{in} 下变频 (Downconversion) 为中频输出信号 f_{out} 。

该电路整体上也分为两级，对混频功能而言，第一级为由模拟乘法器构成的混频电路，配合外围的电容电阻来控制输入信号的幅度；频率为 455 kHz 的输出经电容耦合接入作为输出隔离的第二级 (Common Collector)。

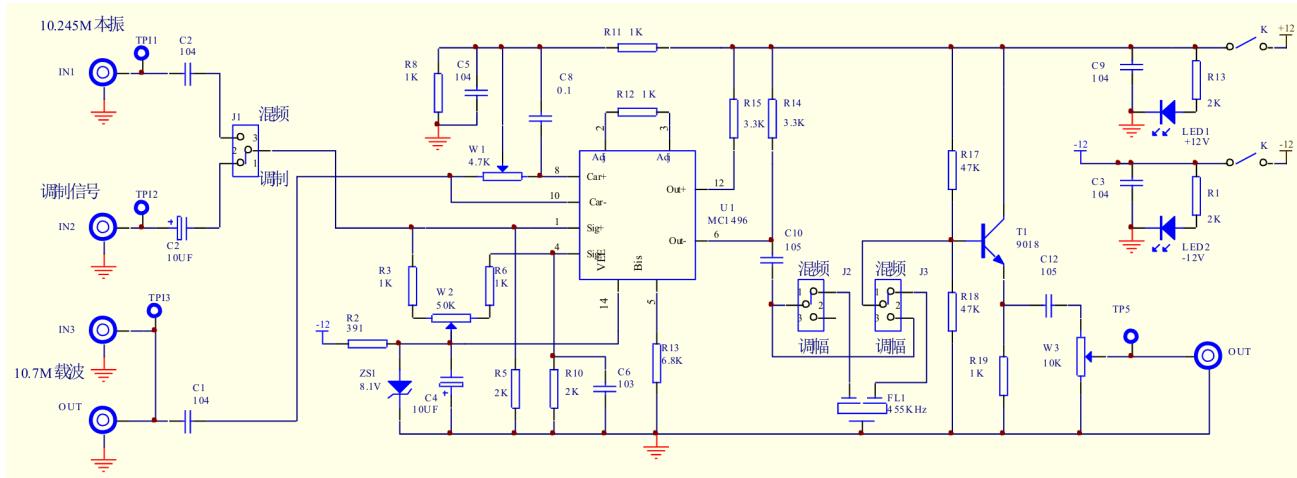


Figure 1: Multiplier-Based Mixer Schematic

实验时，将跳线 J1, J2, J3 的二号端口连接到一号端口 (也即“混频”功能，连接到三号端口对应“调幅”功能)，并在 IN1 (TP1) 和 IN3 (TP3) 分别输入本振 $f_{in} = 10.245\text{MHz}$ 和载波 $f_c = 10.700\text{ MHz}$ ，此时混频器输出中频信号 $f_{out} = |f_{in} - f_c| = 455\text{kHz}$ 。

4 实验内容与步骤

- (1) 在实验箱上插上集成乘法器混频电路实验模块和正弦波振荡电路实验模块，接通实验箱电源。
- (2) 在 IN1 端接入由信号发生器产生的 10.245 MHz 本振信号；然后利用 NCE-05 实验中的正弦波振荡电路输出 10.7 MHz 载波信号，接入混频器模块 IN3 (TP3) 端；
- (3) 调节 IN1 输入信号幅度和电阻 W1，用示波器采样输出波形，将数据导出到电脑用 MATLAB 进行傅里叶分析，直至得到 455 kHz 输出信号；
- (4) 调节可变电阻 W2，继续用 MATLAB 对输出信号进行傅里叶分析，直至得到幅度合适、信噪比最好、失真度最小的 455 kHz 输出信号；

5 实验结果与分析

设置输入本振频率为 $f_{in} = 10.245 \text{ MHz}$ ，载波频率为 $f_c = 10.700 \text{ MHz}$ ，用示波器测量得到本振信号 f_{in} 和下变频后的输出信号 f_{out} 如 Figure 2 所示。

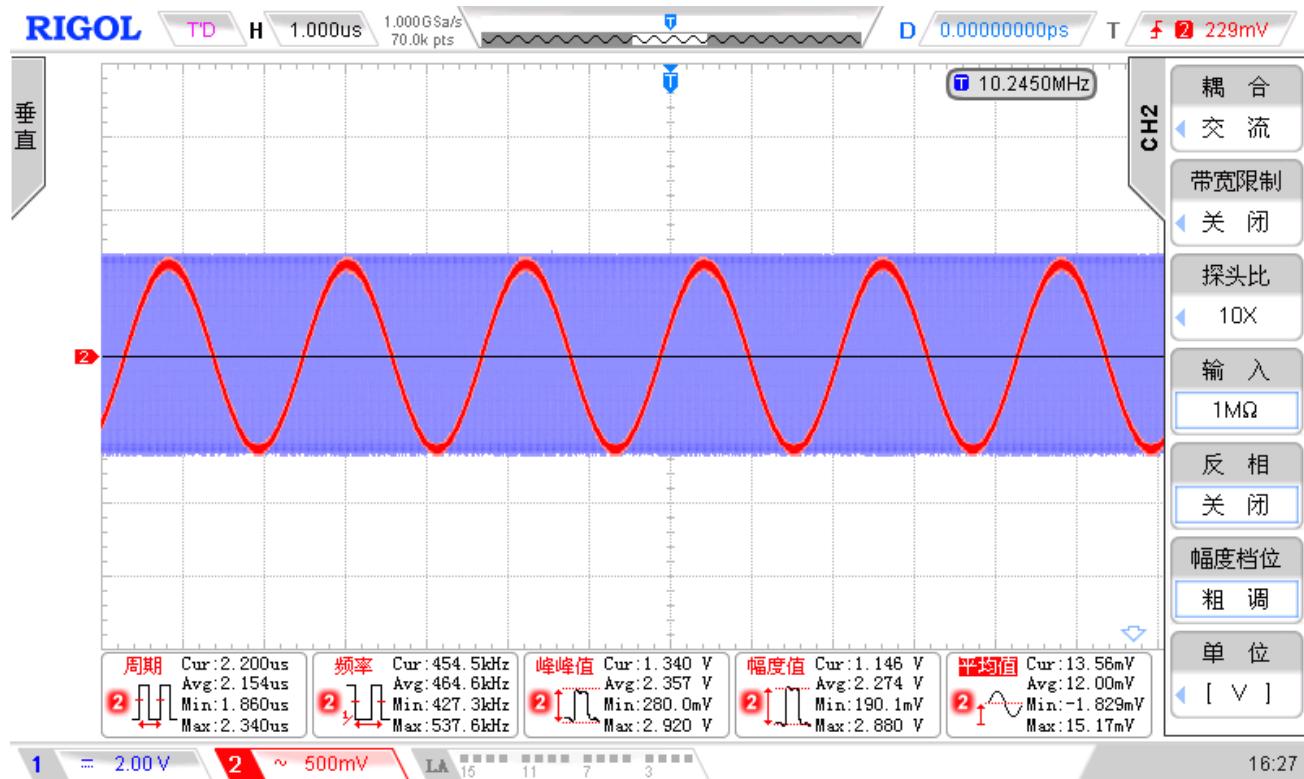


Figure 2: Measured waveforms of input signal (CH1, blue, 10.245 MHz) and down-converted output (CH2, red, 0.455 MHz)

为对比输入输出信号的频谱特性，分别对输入本振信号和输出中频信号进行傅里叶变换分析，结果如 Figure 3 至 Figure 5 所示。注意实验中使用的是低本振信号 ($f_{in} < f_c$)，因此其频率偏移量应取反，也即：

$$\text{for } f_{in}: f_m = -(f - f_{in}), \quad \text{for } f_{out}: f_m = f - f_{out} \quad (1)$$

$$\text{where } f_m \text{ denotes the offset frequency.} \quad (2)$$

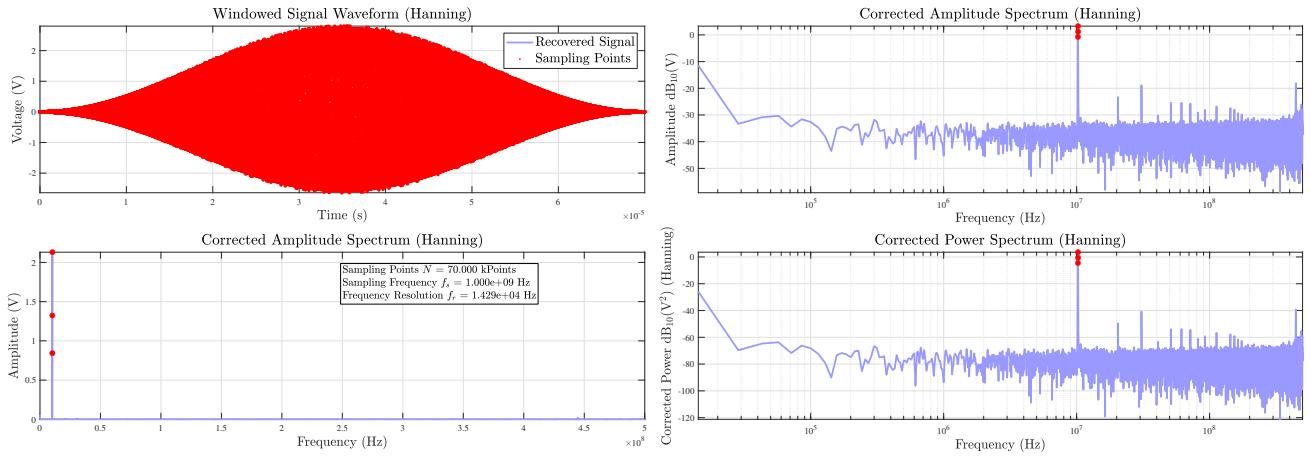


Figure 3: Spectrum analysis of input signal (10.245 MHz)

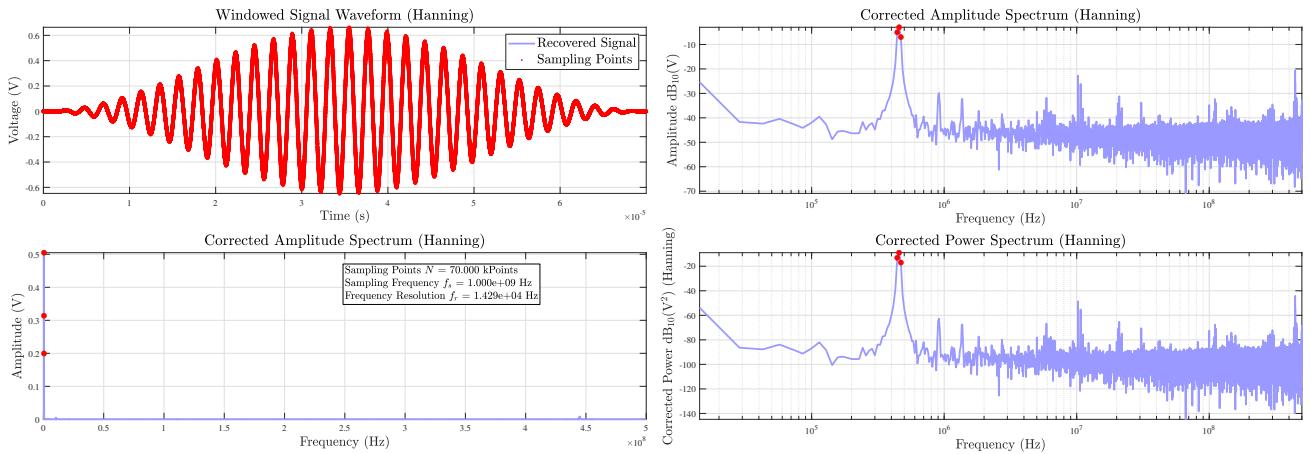


Figure 4: Spectrum analysis of down-converted output signal (0.455 MHz)

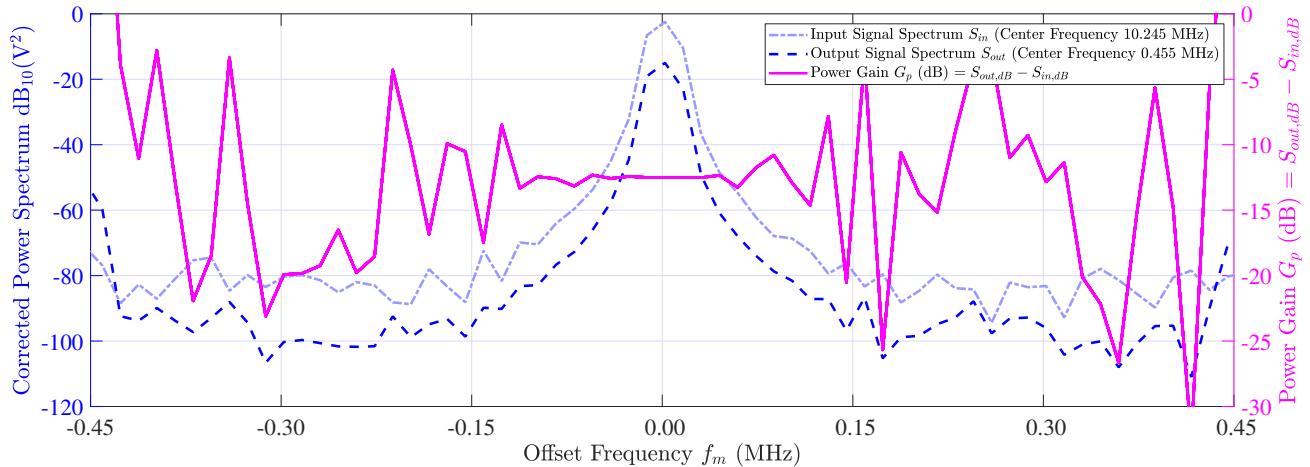


Figure 5: Spectrum comparison between input signal (10.245 MHz) and down-converted output signal (0.455 MHz)

从 Figure 5 可见，输入信号和输出信号的频谱特性（形状等、变化趋势等）基本一致，在频率偏移范围 $f_m \in (-0.10 \text{ MHz}, 0.10 \text{ MHz})$ 内，可近似认为“除了约 12.5 dB 的功率衰减外，二者频谱基本相同”，说明乘法混频器实现了预期下变频功能。

6 思考题

6.1 改变信号发生器提供的 IN1 输入频率时，输出波形和频率作何变化，为什么？

保持其它参数不变，改变本振输入信号的频率 f_{in} ，得到带有不同幅度的输出频率 $f_{out} = 10.7 \text{ MHz} - f_{in}$ ，如下图所示：

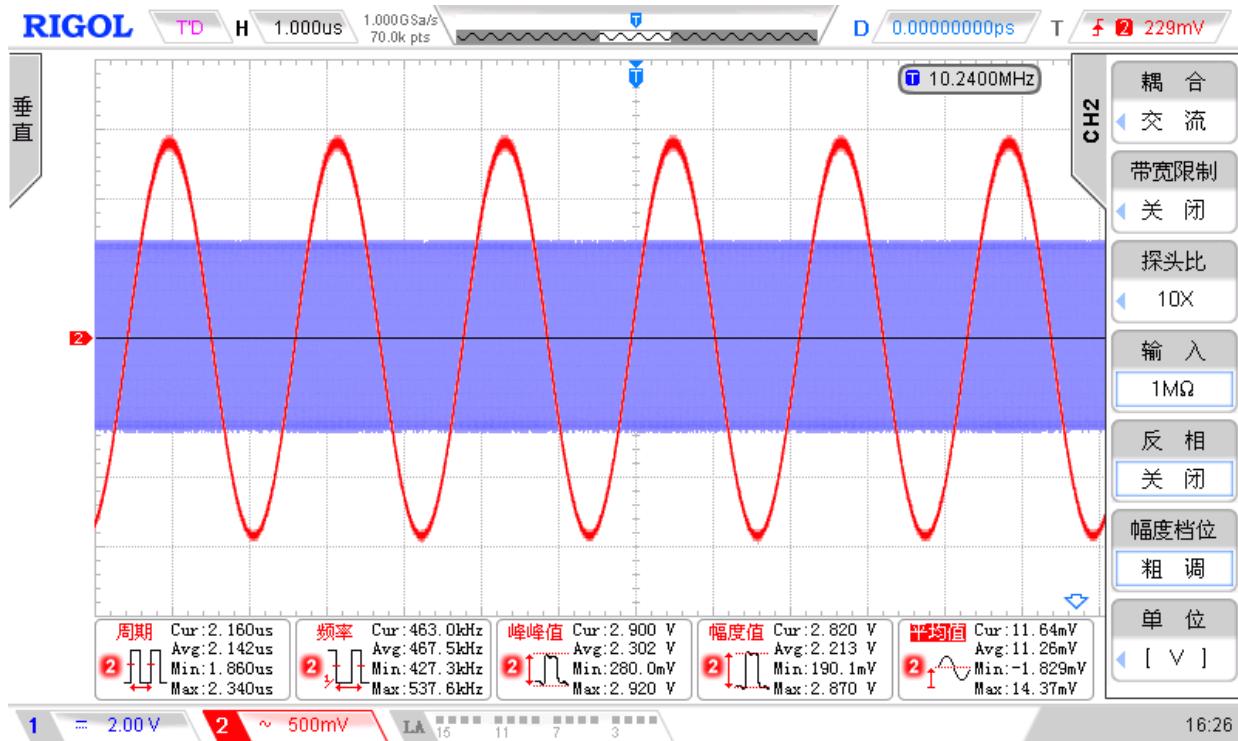


Figure 6: Measured waveforms of input signal (CH1, blue, 10.240 MHz) and down-converted output (CH2, red, 0.460 MHz)

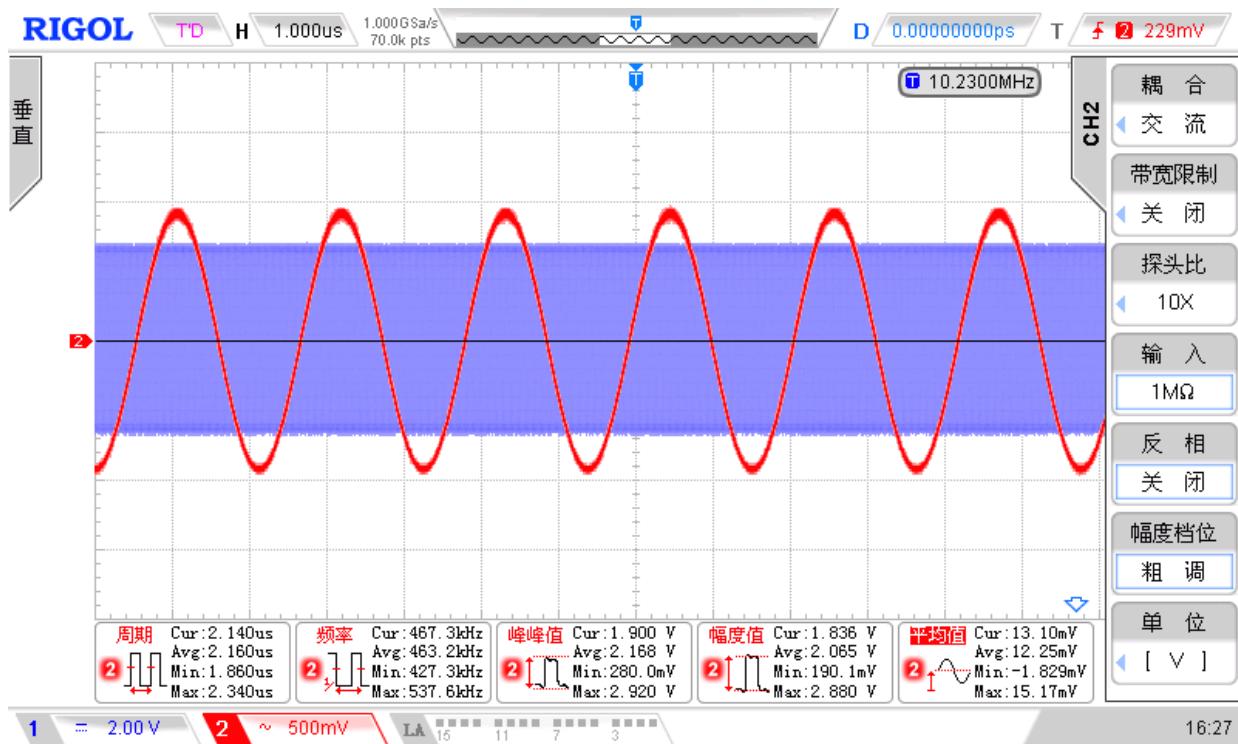


Figure 7: Measured waveforms of input signal (CH1, blue, 10.230 MHz) and down-converted output (CH2, red, 0.470 MHz)

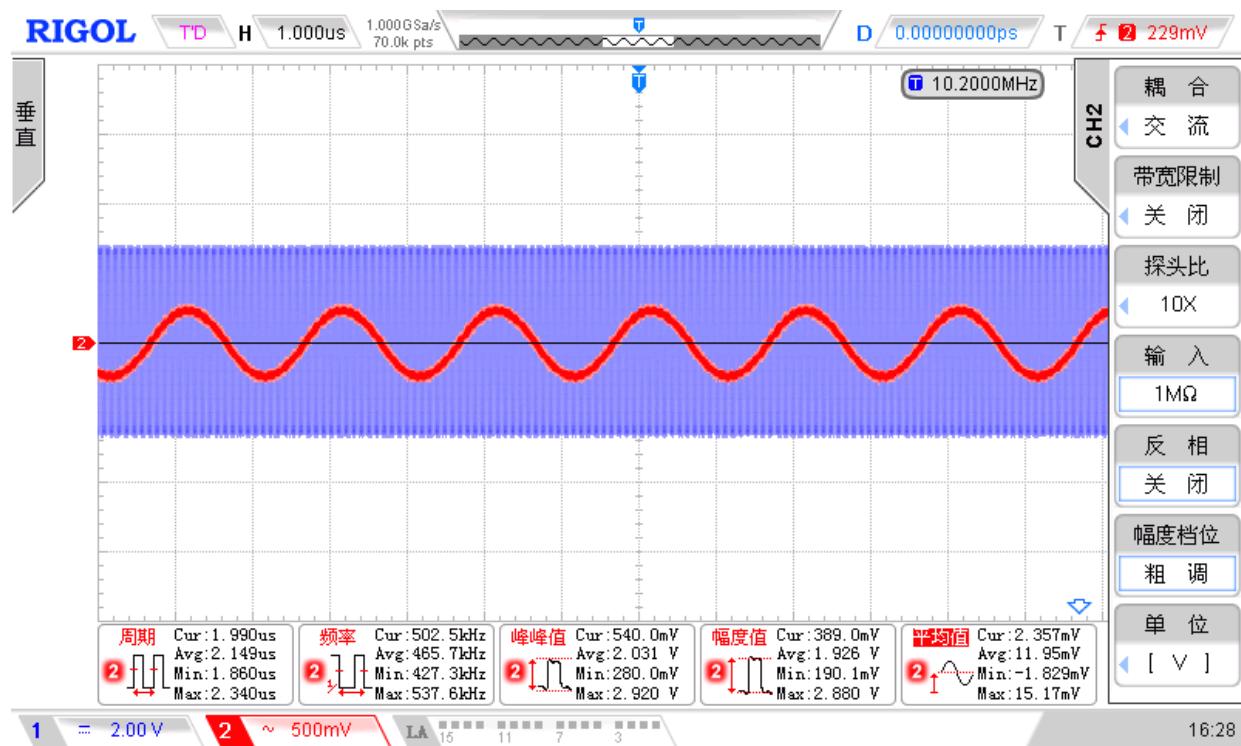


Figure 8: Measured waveforms of input signal (CH1, blue, 10.200 MHz) and down-converted output (CH2, red, 0.500 MHz)

幅度之所以发生改变，是因为混频器输出信号经过了一个带通滤波器，输出信号频率越接近该滤波器的中心频率，衰减量就越小，输出幅值就越大；反之，幅值会越来越小。上图还能观察出，实验板模块上带通滤波器的中心频率并不是 0.455 MHz，而是约为 0.460 MHz。

附录 A 原始数据记录表

注：本次实验所有数据均以.txt 格式保存在电脑中，已由赵嘉明助教核验过。由于数据基本都为波形采样数据，整体数据量较多，故此处不再单独附上原始数据。

附录 B 实验预习报告

《非线性电路实验》预习报告

实验名称: Multiplier-Based Mixer 指导教师: 冯鹏 fengpeng06@semi.ac.cn
 姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-06
 实验日期: 2025.12.04 实验地点: 西实验楼(8号楼) 308 是否调课/补课: 否 成绩: _____

1 实验目的

- (1) 进一步学习变频电路的相关理论;
- (2) 掌握乘法混频电路的工作原理和调试方法。

2 实验仪器

- (1) 高频实验箱 - 集成乘法调幅/混频实验板 (……)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (……)
- (3) 信号发生器 GW INSTEK AFG-2225 (……)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (……)

3 实验原理

3.1 Basic Principles of Mixer

在通信系统中，经常需要将信号自某一频率变换为另一频率，例如把一个已调的高频信号变成另一个较低频率的同类已调信号 (Downconversion, 下变频)，又或者把一个已调的低频信号变成另一个较高频率的同类已调信号 (Upconversion, 上变频)。完成这种频率变换的电路称为变频器或混频器，它是无线通信系统中的重要组成部分。

混频器 (Mixer) 通常由非线性器件作为核心 (二极管、晶体管、模拟乘法器模块)，配合其它有源模块和无源器件组成，这些器件会将输入信号注入到非线性器件中，由其完成混频操作。近年混频器方面的技术前沿表明，混频器的带宽主要受到无源器件限制，而非受到二极管或晶体管的限制，因为后者的带宽一般能很好地满足要求。因此，设计高性能混频器的关键在于合理设计无源器件网络，以实现所需的频率响应特性。

作为射频系统中的关键组件，混频器的主要参数有：

- (1) 功率增益 (Power Gain): $G_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ ，表示输出信号功率与输入信号功率之比；
- (2) 噪声系数 (Noise Figure): $NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$ ，表示输入信号与输出信号的信噪比之比；
- (3) 混频失真与干扰：混频器的失真包括频率失真等非线性失真，此外由于器件的非线性还存在着组合频率干扰，这些干扰往往伴随有用信号而存在，严重影响混频器正常工作，因此需关注减小混频失真与干扰；
- (4) 选择性：指混频器选出有用输出信号而滤除其他干扰信号的能力，选择性越好输出的频谱纯度越高，往往取决于输出端的带通滤波器的性能。

3.2 实验电路简要分析

本次实验采用的 Multiplier-Based Mixer (乘法器混频器) 如 Figure 1 所示，用于将高频输入信号 f_{in} 下变频 (Downconversion) 为中频输出信号 f_{out} 。

该电路整体上也分为两级，对混频功能而言，第一级为由模拟乘法器构成的混频电路，配合外围的电容电阻来控制输入信号的幅度；频率为 455 kHz 的输出经电容耦合接入作为输出隔离的第二级 (Common Collector)。

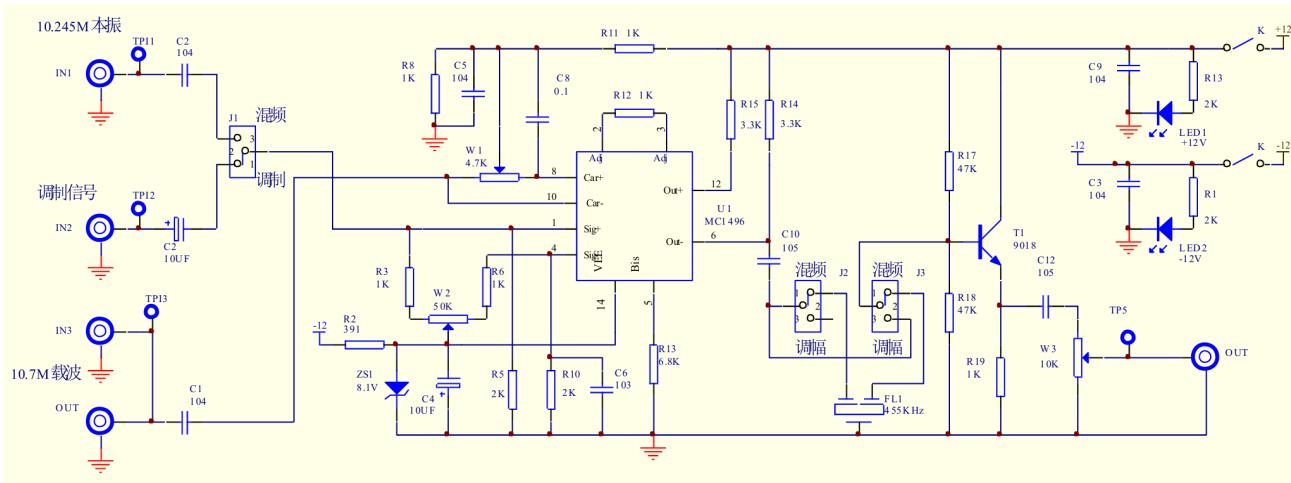


Figure 1: Multiplier-Based Mixer Schematic

实验时, 将跳线 J1, J2, J3 的二号端口连接到一号端口 (也即“混频”功能, 连接到三号端口对应“调幅”功能), 并在 IN1 (TP1) 和 IN3 (TP3) 分别输入本振 $f_{in} = 10.245\text{MHz}$ 和载波 $f_c = 10.700\text{ MHz}$, 此时混频器输出中频信号 $f_{out} = |f_{in} - f_c| = 455\text{kHz}$ 。

4 实验内容与步骤

- (1) 在实验箱上插上集成乘法器混频电路实验模块和正弦波振荡电路实验模块, 接通实验箱电源。
- (2) 在 IN1 端接入由信号发生器产生的 10.245 MHz 本振信号; 然后利用 NCE-05 实验中的正弦波振荡电路输出 10.7 MHz 载波信号, 接入混频器模块 IN3 (TP3) 端;
- (3) 调节 IN1 输入信号幅度和电阻 W1, 用示波器采样输出波形, 将数据导出到电脑用 MATLAB 进行傅里叶分析, 直至得到 455 kHz 输出信号;
- (4) 调节可变电阻 W2, 继续用 MATLAB 对输出信号进行傅里叶分析, 直至得到幅度合适、信噪比最好、失真度最小的 455 kHz 输出信号;

5 思考题

5.1 改变信号发生器提供的 IN1 输入频率时, 输出波形和频率作何变化, 为什么?

附录 C MATLAB Codes

```

1 NCE-06 Mixer (2025.12.04)
2
3 NCE-06 示波器数据读取与保存
4 clc, clear
5 address = 'USB0::0x1AB1::0x04B0::DS2F203700277::INSTR';
6 depth_level = 4; % 1 ~ 4
7 % rate_level = 2;
8
9 ch1 = 1;
10 ch2 = 1;
11
12 % MyOscilloscope_MS02202A_Read_TwoCh(address, 0);
13
14 if ch1 == 1
15     % CH1
16     flag_plot = 0;
17     ch = 1;
18     stc1 = MyOscilloscope_MS02202A_Read(address, ch, depth_level, flag_plot);
19     stc1.stc_spectrum.plot4.axes.XLim = [0.1e6, 0.5e9];
20     amplitude = stc1.stc_spectrum.STC.y_oneSided;
21     freq = stc1.stc_spectrum.STC.fAxis_oneSided;
22     power = stc1.stc_spectrum.STC.power_oneSided;
23     fr = stc1.stc_spectrum.STC.fr;
24     fs = stc1.stc_spectrum.STC.fs;
25
26     v_n1 = stc1.data';
27     t_n1 = stc1.time;
28     stc1 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n1, fs, 1, 10);
29 end
30
31 if ch2 == 1
32     % CH1
33     flag_plot = 0;
34     ch = 2;
35     stc2 = MyOscilloscope_MS02202A_Read(address, ch, depth_level, flag_plot);
36     stc2.stc_spectrum.plot4.axes.XLim = [0.1e6, 0.5e9];
37     amplitude = stc2.stc_spectrum.STC.y_oneSided;
38     freq = stc2.stc_spectrum.STC.fAxis_oneSided;
39     power = stc2.stc_spectrum.STC.power_oneSided;
40     fr = stc2.stc_spectrum.STC.fr;
41     fs = stc2.stc_spectrum.STC.fs;
42
43     v_n2 = stc2.data';
44     t_n2 = stc2.time;
45     stc2 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n2, fs, 1, 10);
46 end
47
48
49 %% 保存采样数据
50 name = ' CH1 本振 (10.245 MHz) 与 CH2 下变频输出 (0.455 MHz)'
51
52 export_name = [D:/aa_MyExperimentData/Raw data backup/, datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS'), '__', '
53     NCE-06__volt_vs_time__', name];
54 writematrix([v_n1', t_n1', v_n2', t_n2'], export_name + ".txt", 'Delimiter', 'tab');
55
56 MyYYPlot(t_n1, v_n1, t_n2, v_n2);
57 xlim([0, 10e-06])
58 MyFigure_ChangeSize_2048x512

```

```

59 % 单个点的函数构建与测试
60
61
62 filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-48-53__NCE-06__volt_vs_time__ CH1 本振
   (10.245 MHz) 与 CH2 下变频输出 (0.455 MHz).txt";
63 data = readmatrix(filename);
64 v_n1 = data(:, 1)'; t_n1 = data(:, 2)';
65 v_n2 = data(:, 3)'; t_n2 = data(:, 4)';
66 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
67
68 MyYYPlot(t_n1, v_n1, t_n2, v_n2);
69 xlim([0 5*(1/10e6)])
70
71
72 stc1 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n1, fs, 1);
73 MyFigure_ChangeSize([3, 1] *512 .* [2, 2] )
74 %MyExport_pdf_modal
75 stc2 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n2, fs, 1);
76 MyFigure_ChangeSize([3, 1] *512 .* [2, 2] )
77 %MyExport_pdf_modal
78
79 freq = stc1.STC.fAxis_twoSided;
80 f1 = -(freq - 10.245e6);
81 f2 = freq - 0.455e6;
82 Pin = stc1.STC.power_twoSided_corrected;
83 Pout = stc2.STC.power_twoSided_corrected;
84 stc = MyPlot([f1/1e6; f2/1e6], [10*log10(Pin); 10*log10(Pout)]);
85 stc.axes.XLim = [-0.45, +0.45];
86 stc.axes.XTick = -0.45:0.15:0.45;
87 stc.axes.XTickLabel = num2str((-0.45:0.15:0.45)', '%.2f');
88 stc.axes.YLim = [-120, 0];
89 stc.label.x.String = 'Offset Frequency $f_m$ (MHz)';
90 stc.label.y.String = 'Corrected Power Spectrum $\mathbf{dB_{\{10\}}(V^2)}$';
91
92
93 %% 作处理
94 data1 = [stc.plot.plot_1.XData; stc.plot.plot_1.YData];
95 data2 = [stc.plot.plot_2.XData; stc.plot.plot_2.YData];
96 X = [];
97 Y1 = [];
98 Y2 = [];
99 % input offset freq 要作映射
100 for i = 1:length(data1(1, :))
101     ind = find(round(data1(1, i) - data2(1, :), 3) == 0, 1);
102     if ind
103         X = [X, data2(1, ind)];
104         Y1 = [Y1, data1(2, i)];
105         Y2 = [Y2, data2(2, ind)];
106     end
107
108 end
109 X
110 Y1
111 Y2
112
113
114 yyaxis('right')
115 stc_ = MyPlot_ax(stc.axes, X, Y2 - Y1);
116 stc_.axes.YColor = 'm';
117 stc_.plot.plot_1.LineStyle = '-';
118 stc_.plot.plot_1.Color = 'm';
119 stc_.label.y.String = 'Power Gain $G_p(f) = S_{out}(f)/S_{in}(f)$';

```

```
120 | stc.axes.YLim = [-30, 0];
121 |
122 | yyaxis('left')
123 | stc.axes.YColor = 'b';
124 | stc.plot.plot_1.LineStyle = '-.';
125 | stc.plot.plot_2.LineStyle = '--';
126 | stc.leg.Visible = 'on';
127 | stc.leg.String = [
128 | "Input Signal Spectrum $S_{in}$(Center Frequency 10.245 MHz)"
129 | "Output Signal Spectrum $S_{out}$(Center Frequency 0.455 MHz)"
130 | "Power Gain $G_p, dB(f) = S_{out,dB}(f) - S_{in,dB}(f)$"
131 | ];
132 | stc.leg.Location = 'northeast';
133 | stc.leg.FontSize = 12;
134 | stc.axes.YLim = [-120, 0];
135 |
136 | MyFigure_ChangeSize([3, 1]*512)
```