

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 2 月 28 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 2 月 23 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： 小信号调谐放大器 实验类型： 设计性实验 同组学生： 张维豆

一、实验目的

- ① 掌握小信号调谐放大器的工作原理；
- ② 掌握频谱分析仪的基本使用方法；
- ③ 掌握调谐放大器电压增益、通频带及选择性的定义、测试及计算方法。

二、实验原理

小信号调谐放大器广泛用作高频和中频放大器，特别是用在通信接收端的前端电路，其主要目的就是实现对高频小信号的放大。谐振放大器的负载是采用谐振回路，具有放大、滤波和选频的作用。作为负载的谐振回路，通常采用LC组成的并联谐振电路。由于LC并联谐振回路的阻抗随着频率变化而变化，并联谐振回路在谐振频率处呈现为纯阻并达到最大值，即放大器在回路谐振频率上将具有最大的电压增益。若偏离谐振频率，增益将减小。

小信号是相对而言的，信号电平处在放大器的线性范围内，就可以认为是小信号。

- ① 小信号调谐放大器的主要性能指标：

小信号调谐放大器的幅频特性如图 2.1 所示。

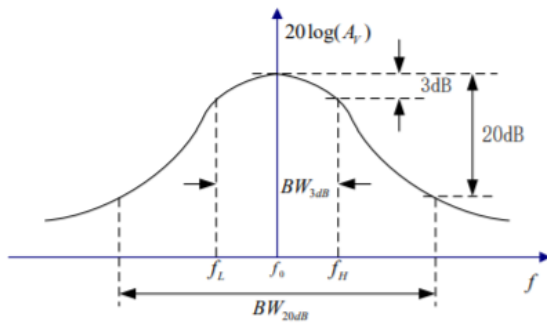


图 2.1 小信号调谐放大器幅频特性

衡量小信号调谐放大器的主要性能指标包括以下几个方面：

(1) 谐振频率 (f_0)

放大器调谐回路谐振时所对应的频率 f_0 称为放大器的谐振频率。

(2) 谐振电压增益 (A_{V0})

放大器处在谐振频率时，所对应的电压放大倍数 A_{V0} 称为调谐放大器的谐振电压增益。 A_{V0} 的表达式为输出电压与输入电压之比，即：

$$A_{V0} = \frac{V_o}{V_i}, \text{ 或 } A_{V0} = 20\log\left(\frac{V_o}{V_i}\right)$$

用功率增益表述时：

$$A_{P0} = \frac{P_o}{P_i}, \text{ 或 } A_{P0} = 10\log\left(\frac{P_o}{P_i}\right)$$

(3) 通频带 (BW_{3dB})

由于谐振回路的选频作用，当工作频率偏离谐振频率时，放大器的电压放大倍数下降，习惯上称电压增益下降到谐振电压增益的0.707倍 ($-3dB$) 时所对应的上下限频率之差称为放大器的通频带带宽 BW ，有时也称为 $3dB$ 带宽。其表达式为：

$$BW = f_H - f_L = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L}$$

式中， Q_L 为谐振回路的有载品质因数。

(4) 增益带宽积 ($A_{V0}BW_{3dB}$)

增益带宽积也是通信电子电路的一个重要指标。通常，增益带宽积可以认为是一个常数。放大器的总通频带宽度随着放大级数的增加而变窄， BW 越大，则增益越小，二者乘积保持不变。

(5) 选择性

放大器从含有各种不同频率的信号中选出有用信号，具有排除干扰信号的能力，称为放大器的选择性。选择性的基本指标是矩形系数，其中，定义矩形系数 $K_{v0.1}$ 是电压增益下降到谐振时电压增益的0.1倍 ($-20dB$) 时对应的带宽与其 $3dB$ 带宽之比，即：

$$K_{v0.1} = \frac{BW_{20dB}}{BW_{3dB}}$$

显然，矩形系数越接近 1，曲线就越接近矩形，滤除邻近波道干扰信号的能力愈强。

② 单调谐放大器：

图 2.2 是典型的单调谐回路小信号放大器。其交流等效电路及 y 参数等效电路如图 2.3 (b)、(c) 所示。在 y 参数等效电路的分析中，当单调谐放大器级联时，下级放大器输入负

载只考虑 y_{ie2} ， y_{re2} 的影响忽略不计。

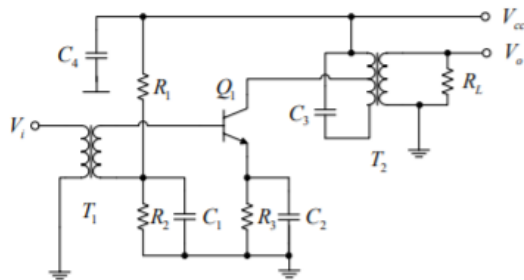


图 2.2 单调谐小信号放大器

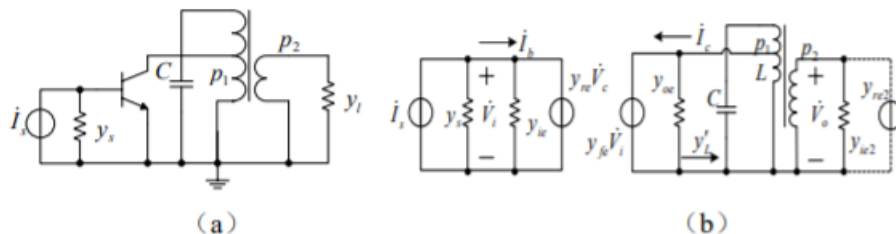


图 2.3 交流等效电路与 y 参数等效电路

电压增益：

$$A_V = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{G_P + p_1^2 g_{oe} + p_2^2 g_{ie2} + j\omega(C + p_1^2 C_{oe} + p_2^2 C_{ie2}) + \frac{1}{j\omega L}}$$

令：

$$g_\Sigma = G_P + p_1^2 g_{oe} + p_2^2 g_{ie2}$$

$$C_\Sigma = C + p_1^2 C_{oe} + p_2^2 C_{ie2}$$

则：

$$A_V = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}} \approx \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma \left[1 + j \frac{2Q_L \Delta f}{f_0} \right]}$$

式中，

$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$ 是放大器的调谐回路谐振频率；

$\Delta f = f - f_0$ 是工作频率对谐振频率的失谐；

$Q_L = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma}$ 是回路的有载品质因数。

小信号单调谐放大器的3dB带宽与简单的谐振回路相同，即： $BW = 2\Delta f_{0.707} = \frac{f_0}{Q_L}$ ，

所以： $g_\Sigma = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{Q_L} = 2\pi C_\Sigma 2\Delta f_{0.707}$ 。又因为 $A_{V0} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{2\pi C_\Sigma 2\Delta f_{0.707}}$ ，所以：

$$A_{V0} BW = A_{V0} 2\Delta f_{0.707} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{2\pi C_\Sigma}$$

即当晶体管选定，电路确定好以后，放大器的带宽增益乘积是一个常数，带宽愈窄，增

益愈高，反之亦然。调谐放大器的选频特性可以由矩形系数来描述，通过推导，LC并联谐振回路构成的单调谐放大器，其矩形系数 $K_{v0.1} = \frac{BW_{20dB}}{BW_{3dB}} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.707}} = \sqrt{100-1} \approx 9.95$ 。数值远大于1，故选择性不是很好。

③ 调谐放大器的级联与双调谐放大器：

如果放大器有 n 级级联，放大器的总增益是各级增益的乘积。假设各级放大器完全相同，放大器总的通频带为单级放大器通频带的 $\sqrt{2^n - 1}$ 倍。另外，随着级数的增加，选择性得到改善，但这种改善是有限的。

为了克服单调谐回路放大器的选择性差、通频带与增益之间矛盾较大的缺点，可采用双调谐回路放大器。双调谐回路放大器具有频带宽、选择性好的优点，并能较好地解决增益与通频带之间的矛盾，从而在通信接收设备中广泛应用。双调谐耦合谐振回路常用的有两种，互感耦合谐振回路和电容耦合谐振回路。本实验中采用的是电容耦合双调谐回路。

在双调谐放大器中，被放大后的信号通过互感耦合回路加到下级放大器的输入端，若耦合回路初、次级本身的损耗很小，则均可被忽略。

(1) 双调谐放大器的电压增益为：

$$A_{v0} = -\frac{v_o}{v_i} = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{2g_\Sigma}$$

(2) 通频带

当弱耦合时，幅频特性呈现为单峰；强耦合时，出现双峰；临界耦合时，呈现较平坦的顶部，此时双调谐放大器的通频带为：

$$BW = 2\Delta f_{0.7} = \frac{\sqrt{2}f_0}{Q_L}$$

三、实验电路分析

如图 3.1，为实验所用电路。该电路由晶体管 Q_3 、选频回路两部分组成。本实验中采用的谐振频率接近10.7MHz，调整 T_1 的电感量可改变谐振频率。作为双调谐放大器， T_1 、 T_2 需要同时进行调整。基极偏置电阻 WR_2 、 R_{17} 、 R_{18} 和射极电阻 R_{19} 决定了晶体管的静态工作点。调节可变电阻 WR_2 可以改变基极偏置电阻，调整晶体管的工作电流，进而改变放大器的增益。

通过开关 SW_3 的切换，可以调整电路形式或选择不同的耦合电容。当 SW_3 两位拨码开关设成“00”，即都设为“OFF”时，电路成为单调谐放大器，信号从 JP_5 输出；当 SW_3 设成其它状

态时，电路为双调谐放大器，切换不同的耦合电容可以改变耦合系数，进而影响电路的选频特性。

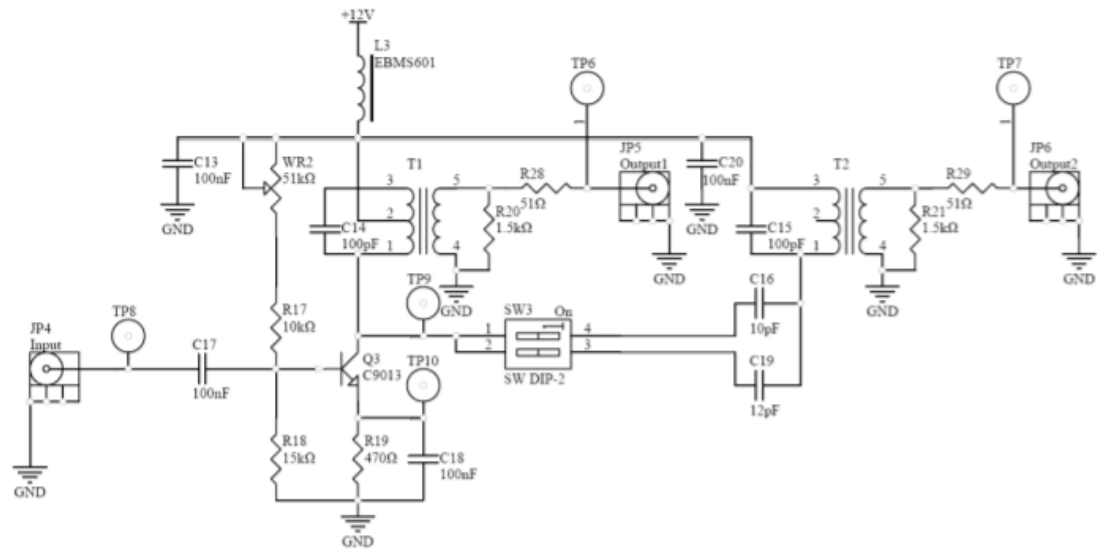


图 3.1 单、双调谐放大器实验电路

四、实验设备

- | | |
|---------------|------|
| ① 实验板 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、实验内容与步骤

① 单调谐小信号放大器实验：

(1) 测试电路搭建：

调谐放大器特性测试可采用点测法与扫频法。采用点测法时，小信号放大器的输入 JP_4 接高频信号源，输出用频谱分析仪或示波器观测，通过改变信号源频率来观测放大器输出信号功率或电压幅度进行测量；扫频法测试，采用扫频仪或带跟踪源的频谱分析仪进行测量。本实验采用带跟踪源的频谱仪进行测试。

如图 5.1 所示，连接实验板及测试设备，实验板的 SW_3 设为“00”状态，频谱分析仪的跟踪源输出连接实验板输入接口 JP_4 ，频谱分析仪的射频输入端连接实验板输出接口 JP_5 ，并打开电源。

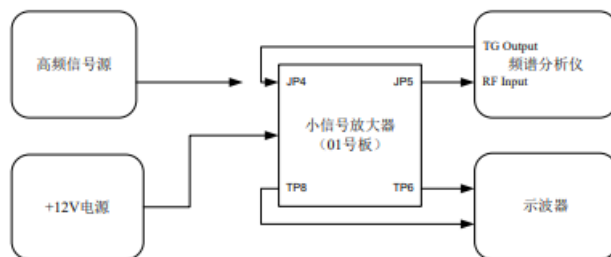


图 5.1 单、双调谐放大器连接框图

(2) 晶体管的静态工作点调整：

在不加输入信号时用万用表（直流电压测量档）测量 TP_{10} 对地电压（即电阻 R_{19} 两端的电压），调整可调电阻 WR_2 ，使 $V_{EQ} = 1.5V$ ，计算出此时的 $I_{EQ} = \frac{V_{EQ}}{R_{19}}$ （其中 $R_{19} = 470\Omega$ ）。

(3) 频谱分析仪设置：

复位频谱分析仪：【Pereset】；

设定频谱分析仪中心频率为 $10.7MHz$ ：【FREQ】【10.7】【MHz】；

设定扫宽度为 $20MHz$ ：【SPAN】【20】【MHz】；

设定参考电平为 $20dBm$ ：【AMPT】【参考电平】【20】【dBm】；

进入跟踪源 TG (Tracking Generator) 设置：【Source】；

设定输出功率为 $-20dBm$ ：【信号幅度】【-20】【dBm】；

打开跟踪源：【跟踪源】。

(4) 谐振频率测试：

谐振频率测试：【Peak】；读取光标的频率值即为谐振频率。

另一种频率计测量方式：【Marker Fctn】【频率计数】，右上角显示的为谐振频率。

(5) 谐振增益测试：

与以上步骤一致，设定频谱分析仪。按【Peak】，读取光标位置的功率值记为 P_o ，而此时的输入功率为跟踪源的输出功率，记为 P_i ，功率增益即为： $G = P_o - P_i$ 。

(6) 通频带测试：

方法 1：按【Peak】，将光标定标到峰值位置；按【Marker】【差值】，将差值光标移动到 $-3dB$ 位置；再按【差值】，将参考光标移动到另一边的 $-3dB$ 位置。此时读取到的差值光标频率值，即为 $3dB$ 通频带，记为 BW_{3dB} 。

方法 2：采用频谱仪的带宽测量功能，按【Marker Fctn】【N dB 带宽】【3】【dB】，屏幕显示的就是 $3dB$ 带宽值。

(7) 选择性测试：

电路的选择性往往用矩形系数来表征。采用与通频带测试相同的方法，测量 -20dB 带宽，方法参考通频带测试，测试结果记为 $BW_{20\text{dB}}$ 。则 $K_{v0.1} = \frac{BW_{20\text{dB}}}{BW_{3\text{dB}}}$ 。理论上，单调谐放大器的矩形系数接近10，选择性不是太理想。

(8) 静态工作点对谐振放大器增益和带宽的影响：

晶体管在不同的工作电流下，放大倍数也有所不同。因此，静态工作点也影响到调谐放大器的谐振增益和带宽。在输入为 -20dBm 不变的条件下，将晶体管的工作电流 I_C 从 1mA 调整到 5mA ，测量其谐振增益和带宽，并判断增益和带宽随工作电流变化的趋势。

② 双调谐小信号放大器实验：

(1) 测试电路搭建：

如图 5.1，连接实验板及测试设备，实验板的 SW_3 设为“10”状态，输入信号接 JP_4 输出信号出自 JP_6 ，并打开电源。将电路的静态工作电流调整到 3mA 左右。

(2) 耦合状态观测：

实验板 SW_3 状态的调整也改变了双调谐放大器的耦合度。分别将 SW_3 设成“10”、“01”和“11”，观测在弱耦合、临界耦合和强耦合条件下放大器的传输特性。

(3) 谐振增益测试：

在临界耦合状态下，测试双调谐放大器的谐振增益，并与单调谐放大器进行比较。

(4) 通频带测试：

在临界耦合状态下，测试双调谐放大器的通频带，并与单调谐放大器通频带进行比较。

(5) 选择性测试：

在临界耦合状态下，测试双调谐放大器的矩形系数 $K_{v0.1}$ ，并与单调谐放大器的矩形系数 $K_{v0.1}$ 进行比较。

六、实验结果记录与分析

① 单调谐小信号放大器实验

(1) 单调谐放大器传输特性曲线

如图 6.1，为 $V_{EQ} = 1.505\text{V}$ ， $I_{EQ} = \frac{V_{EQ}}{R_{19}} = 3.202\text{mA}$ 时单调谐小信号放大器的传输特性曲线，其与图 2.1 类似。可以看到，此时单调谐小信号放大器的谐振频率为 10.7MHz ，具有最大电压增益 8.95dBm ；当频率偏离谐振频率时，增益逐渐减小，与理论一致。当然，由于

实际电路的老化、外部环境的干扰等因素，幅频特性曲线未呈现出完全的对称性，且存在轻微抖动，但其并不影响我们的后续实验与分析。

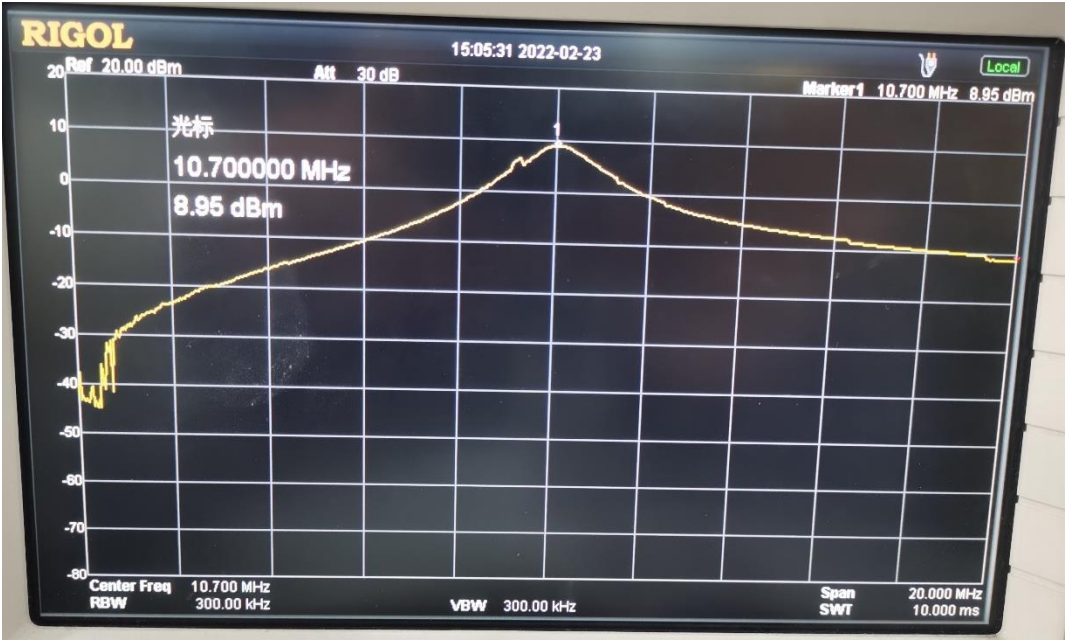


图 6.1 调谐放大器传输特性曲线

(2) 单调谐放大器主要性能指标

表 6.1 单调谐放大器主要性能指标

谐振频率 f_0	10.7MHz	3dB通频带 BW_{3dB}	1.3666MHz
输出功率 P_o	8.95dBm	20dB通频带 BW_{20dB}	13.5999MHz
输入功率 P_i	-20dBm	矩形系数 $K_{v0.1}$	9.9516
功率增益 G	28.95dBm		

如表 6.1，根据测量数据，小信号调谐放大器的谐振频率 f_0 为10.7MHz，功率增益为 $G = P_o - P_i = 28.95dBm$ 。利用频谱仪的带宽测量功能，测得3dB通频带宽 BW_{3dB} 为1.3666MHz，同时20dB通频带宽 $BW_{20dB} = 13.5999MHz$ ，于是 $K_{v0.1} = \frac{BW_{20dB}}{BW_{3dB}} = 9.9516$ ，与（二）中分析值9.95接近。可见，单调谐放大器的功率增益较好，但矩形系数较大，滤除邻近波道干扰信号的能力较差，选择性有待提高。

(3) 静态工作点对谐振放大器增益和带宽的影响

表 6.2 静态工作点影响测试表

工作电流（mA）	1.287	2	3	4	5	6
输出功率（dBm）	0.61	4.22	7.36	9.38	10.87	12.26
谐振增益（dBW）	-9.39	-5.78	-2.64	-0.62	0.87	2.26

3dB带宽 (kHz)	1366	1366	1366	1366	1366	1366
-------------	------	------	------	------	------	------

如表 6.2，在输入为 -20dBm 不变的条件下，调整 WR_2 ，使晶体管的工作电流 I_C 从 1.287mA 变化到 6mA 。可以发现，随着工作电流的增加，单调谐小信号放大器的输出功率逐渐增大，即谐振增益增加，但增加的速率逐渐减小，如图 6.2 所示；其 3dB 带宽基本稳定在 1.366MHz 左右，故谐振放大器的增益带宽积逐渐增大。

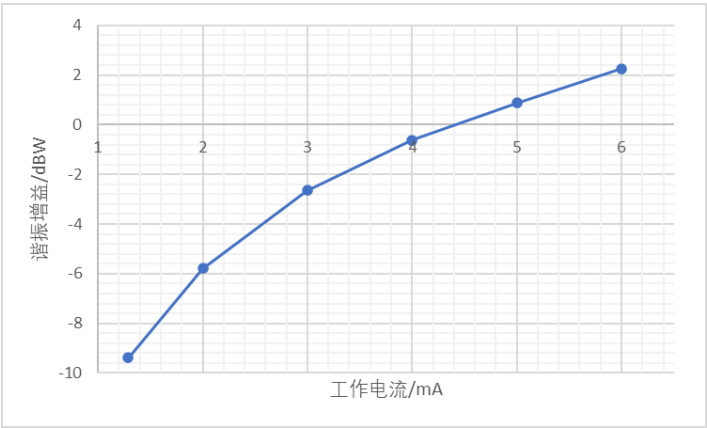


图 6.2 谐振增益随工作电流的变化趋势

② 双调谐小信号放大器实验

(1) 耦合状态观测

调整 WR_2 ，使 $V_{EQ} = 1.413\text{V}$ ， $I_{EQ} = \frac{V_{EQ}}{R_{19}} = 3.006\text{mA}$ ，将 SW_3 设为"10"，在弱耦合条件下放大器的传输特性曲线为：

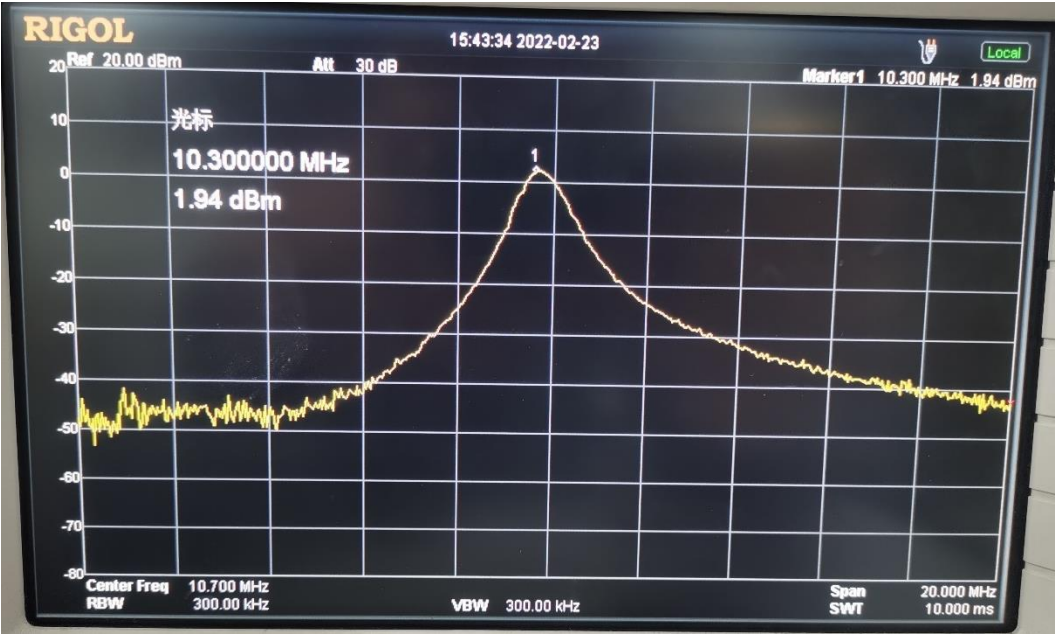


图 6.3 弱耦合条件下调谐放大器传输特性曲线

将 SW_3 设为"01", 在临界耦合条件下放大器的传输特性曲线如图 6.4 所示:

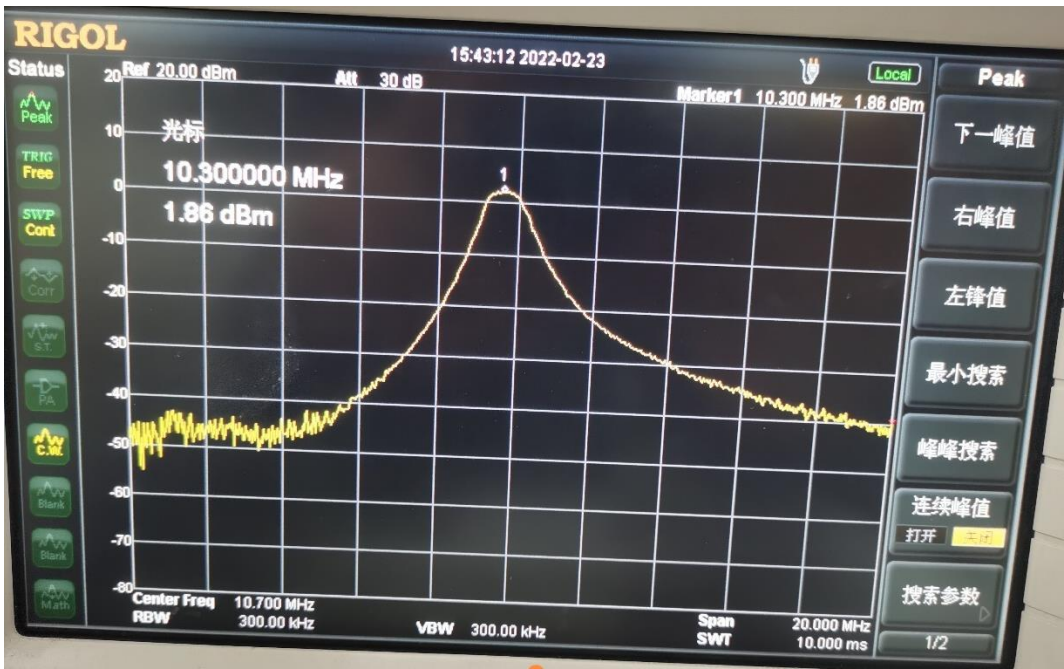


图 6.4 临界耦合条件下调谐放大器传输特性曲线

将 SW_3 设为"11", 在强耦合条件下放大器的传输特性曲线如下:

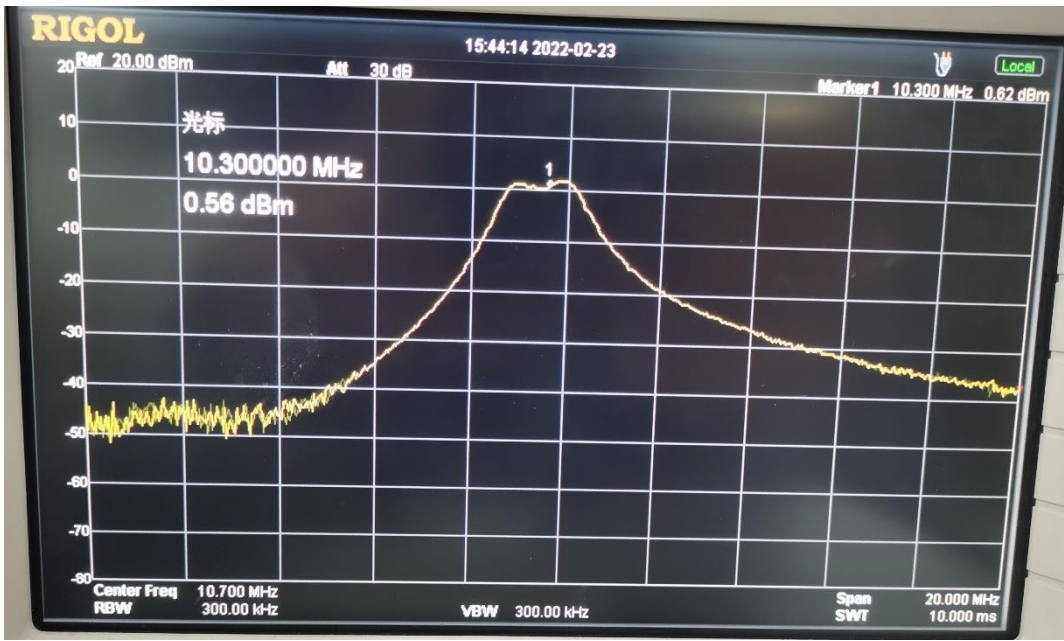


图 6.5 强耦合条件下调谐放大器传输特性曲线

比较三种耦合条件下放大器的传输特性曲线, 可以发现: 当弱耦合时, 幅频特性呈现为单峰; 当临界耦合时, 其顶部较为平坦; 当强耦合时, 幅频特性为双峰。在不同的耦合条件下, 放大器的谐振电压增益区别不大, 均在 1.9dBm 左右; 其通频带宽存在一定差异: 强耦合状态时最宽, 而弱耦合状态时最窄。

(2) 临界耦合条件下双调谐放大器主要性能指标

表 6.3 临界耦合时双调谐放大器主要性能指标

谐振频率 f_0	10.7MHz	3dB通频带 BW_{3dB}	1.6333MHz
输出功率 P_o	1.95dBm	20dB通频带 BW_{20dB}	4.1666MHz
输入功率 P_i	-20dBm	矩形系数 $K_{v0.1}$	2.5510
功率增益 G	21.95dBm		

如表 6.3，临界耦合时双调谐放大器的谐振增益为21.95dBm，相比于单调谐放大器的谐振增益有所降低；双调谐放大器的3dB通频带为1.6333MHz，比单调谐放大器宽，而20dB通频带为4.1666MHz，比单调谐放大器窄；因此，其矩形系数 $K_{v0.1} = \frac{BW_{20dB}}{BW_{3dB}} = 2.5510$ ，比单调谐放大器小得多，说明双调谐放大器的选择性更好。综上，双调谐回路放大器具有频带宽、选择性好的优点，能够较好地解决增益与通频带之间的矛盾，相比于单调谐放大器具有更好的性能。

七、思考题

① 高频小信号放大器的主要技术指标有哪些？

答：高频小信号放大器的主要技术指标包括谐振频率、谐振电压增益、通频带、增益带宽积、选择性、工作稳定性、噪声系数等。

② 单级单调谐放大器的电压增益与那些因素有关？当谐振回路中的并联电阻 R 变化时，增益及带宽将怎样变化？当谐振放大器的静态工作点变化时，增益及带宽将怎样变化？

答：因为

$$\dot{A}_V = \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}} \approx \frac{-p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma \left[1 + j \frac{2Q_L \Delta f}{f_0} \right]}$$

可见，单级单调谐放大器的电压增益与工作频率有关。当讨论的是谐振增益时，其主要与三极管正向传输导纳、负载导纳、谐振回路谐振导纳、接入系数等有关。

谐振回路中的并联电阻 R 是一个耗能元件，当其减小时，谐振回路的品质因数将会提高。因为

$$BW = \frac{f_0}{Q_L}$$

故随着并联电阻 R 的阻值减小，单调谐放大器的通频带宽将会减小，同时增益增加（增益带宽积不变），频率选择性提高。

当谐振放大器的静态工作点变化时,由实验结果可知:随着工作电流的增大,单调谐放大器的谐振增益将逐渐增大(增大速率逐渐降低),而带宽将保持不变,此时放大器的增益带宽积也会增大。

③ 回路的谐振频率和那些参数有关? 如何判断谐振回路处于谐振状态?

答:回路的谐振频率只由电路本身的参数 L 、 C 决定。为了判断谐振回路处于谐振状态,根据定义,可以比较电感、电容的电抗是否相等;也可以利用双踪示波器查看回路中的电流与电压波形是否同步,当两者同步时,回路处于谐振状态。