

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： 宽带低噪声放大器及 AGC 实验类型： 设计性实验 同组学生： 张维豆

一、实验目的

- ① 掌握自动增益控制放大器的实现方法和工作原理；
- ② 了解电路主要性能指标；
- ③ 对放大器的增益、噪声系数、1dB 压缩点进行测量和分析。

二、实验原理

低噪声放大器（LNA）位于射频接收机的前端，这就要求它的噪声越小越好，另外，为了抑制接收机后面各级电路噪声对系统的影响，低噪声放大器需要具有一定的增益。

由于受发射机功率大小、信号传输路径等的影响，接收信号的强弱是变化的，因此，放大器的增益应该是可调节的，如果由人工控制增益，实现起来不方便，也是很困难的。解决方法是采用自动增益控制电路（AGC），当放大器输入信号比较弱的时候，增益变大；而当输入信号比较强的时候，增益减小，使放大器的输出保持恒定。

- ① 低噪声放大器的主要性能指标：

- (1) 增益：

低噪声放大器的增益不能过大，也不能过小。过大会使下级电路的输入太大产生失真，过小又不能很好的抑制下面各级电路噪声的影响。另外，为了获得稳定的输出信号，根据输入信号的大小，增益要自动可调。

- (2) 噪声系数：

噪声系数定义为系统输入信噪功率比与输出信噪功率比的比值：

$$F = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

噪声系数用分贝表示：

$$NF(dB) = 10\log F$$

当多级放大器级联时，总的噪声系数为：

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

由此，可以看到第一级的噪声系数在系统中起着关键的作用。

噪声系数的测量普遍采用的方法有：使用噪声系数测量仪法、增益法和 Y 因子法，在此主要介绍增益法，这种方法主要基于频谱分析仪测量，主要适合高增益的或高噪声系数的情况。

将用分贝表示的噪声用功率谱密度表示，则噪声系数：

$$NF(dB) = N_{out}(dBm/Hz) - N_{in}(dBm/Hz) - Gain(dB)$$

$$Gain = 10\log(S_{out}/S_{in})$$

噪声主要考虑两个方面的因素：系统外部噪声和系统内部由于布朗运动，电子器件中的热噪声 $KT\Delta F$ ，其中， K 是波尔兹曼常量 $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ， T 是温度（开尔文）， ΔF 是噪声带宽。在室温下（290 开尔文），热噪声功率谱密度为 $-174 dBm/Hz$ 。因此，若只考虑热噪声的影响，系统的噪声系数：

$$NF(dB) = N_{out}(dBm/Hz) + 174 dBm/Hz - Gain(dB)$$

根据以上噪声系数公式，实验中使用频谱分析仪，采用增益法来测量系统的噪声系数。预先确定测试电路的增益，在电路输入端接 50Ω 电阻，输出噪声功率谱使用频谱分析仪测量。频谱仪测得的谱密度与分辨率带宽 (RBW) 相关，实际上是 RBW 内的功率 $N_{out}(dBm/RBW)$ ，需要转换为每 $1Hz$ 的功率：

$$N_{out}(dBm/Hz) = N_{out}(dBm/RBW) - 10\log(RBW)$$

将上式代入前式可得：

$$NF(dB) = N_{out}(dBm/RBW) - 10\log(RBW) + 174 dBm/Hz - Gain(dB)$$

据此便可以得到实验电路的噪声系数。

(3) 非线性（1dB 增益压缩点）：

考虑有源器件非线性特性对放大器线性的影响，尽管在小信号时输出电压与输入电压为线性关系，即放大器增益为固定值，但当输入信号增大到一定程度时，其增益会逐渐减小。因此定义 1dB 压缩点来衡量放大器的线性工作范围，1dB 压缩点定义为使增益比线性增益下降 1dB 时对应的输入、输出信号幅度值或功率值。若输入输出均用 dB 表示，1dB 压缩点如图 2.1 所示：

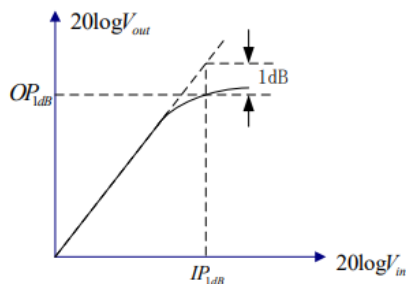


图 2.1 1dB增益压缩点

② AGC 主要性能指标:

(1) 动态范围:

在给定输出信号幅值变化的范围内，容许输入信号振幅的变化越大，则表明 AGC 电路的动态范围越宽，性能越好。

$$\text{AGC 电路的输入动态范围 } D_i(\text{dB}) = P_{imax}(\text{dBm}) - P_{imin}(\text{dBm})$$

$$\text{AGC 电路的输出动态范围 } D_o(\text{dB}) = P_{omax}(\text{dBm}) - P_{omin}(\text{dBm})$$

AGC 电路的动态增益范围就是输入动态范围与输出动态范围之比，也称为放大器的增益控制倍数，用 M_{AGC} 表示:

$$M_{AGC} = D_i - D_o = (P_{imax} - P_{imin}) - (P_{omax} - P_{omin}) = G_{max} - G_{min}$$

其中，

$G_{max} = P_{omin} - P_{imin}$ ，为放大器的最大功率增益，一般发生在输入信号为最小时；

$G_{min} = P_{omax} - P_{imax}$ ，为放大器的最小功率增益，一般发生在输入信号为最大时；

可见，要扩大 AGC 电路的控制范围，就要增大 AGC 电路的增益控制倍数 M_{AGC} ，也就是要求 AGC 电路有较大的增益变化范围。增加 AGC 电路控制的级数可以扩大 AGC 电路的控制范围。

一般广播收音机的 AGC 动态范围指标为：输入信号强度变化 26dB 时，输出电压的变化不超过 5dB 。在高级通信用接收机中，输入信号强度变化 60dB 时，输出电压变化不应超过 6dB ，输入信号在 $10\mu\text{V}$ (-57dBm) 以下时，AGC 不起作用。

(2) 响应时间:

由于 AGC 电路是用来对信号电平变化进行控制的闭环控制系统，因此，要求 AGC 电路的动作必须跟得上电平变化的速度。响应时间短，自然就能够迅速跟上输入信号电平的变化。但是当响应时间过短时，AGC 电路将随着信号的本身变化而变化（也就是 AGC 电路的动作随调制信号的规律而变化），这将对有用信号产生反调制作用，从而将导致信号的失真。因此，需要根据信号的性质和需要，设计适当的响应时间。可采用调节环路带宽，主要是调节

低通滤波器的带宽的方式调整响应时间，一般上限频率设计为 $10\sim 20\text{Hz}$ 。

(3) AD603 放大器芯片介绍：

AD603 是用于射频及中频自动增益控制（AGC）系统中的低噪声电压控制放大器。在 90MHz 带宽范围内提供 -11dB 到 31dB 的增益， 9MHz 带宽范围内提供 9dB 到 51dB 的增益。AD603 由增益控制接口，无源输入衰减器和固定增益放大器三部分组成，功能框图如图 2.2 所示。

加在梯形网络输入端的信号经过可变衰减器后，由固定增益放大器输出。衰减量由加在增益控制接口的电压值 V_G 确定，由 V_G 控制梯形网络的滑动触点到相应的节点处，实现 0 到 -42.14dB 的衰减。放大器的固定增益由 V_{out} 和 FDBK 两管脚间的连接方式决定。当两管脚之间短接时，增益为 -11dB 到 31dB ；当两管脚之间断开时，增益为 9dB 到 51dB ；当两管脚间外接一个电阻时，增益在上述两种情况之间。

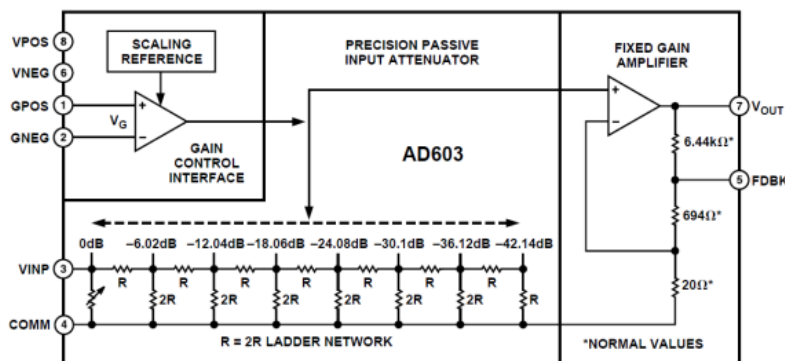


图 2.2 AD603 功能框图

为了得到更高增益的放大器，可以将两个或多个 AD603 级联起来，各级之间通常采用电容耦合。对于两级级联 AD603 放大器，整个增益控制范围为 84dB 。对于 70MHz 左右的带宽，增益范围在 -22dB 到 62dB 之间；对于 6MHz 带宽，增益范围在 22dB 到 102dB 之间。在级联模式下，有两种增益控制方式：并联模式和顺序模式。对于两级级联，顺序控制方式是将两片 AD603 的正增益控制输入端 (G_{POS}) 以并联形式由一个正电压 V_G 驱动，两级的负增益控制输入端 (G_{NEG}) 分别加一个稳定的电压，使 V_{G1} 和 V_{G2} 满足 1.05V 左右的电位差，则第一级的增益达到最大值时，第二级的增益才从最小值开始提高。这种方式可以得到最大的瞬态信噪比。

并联控制方式同样也是将两片 AD603 的正增益控制输入端 (G_{POS}) 以并联形式由一个正电压 V_G 驱动，而两级的负增益控制输入端 (G_{NEG}) 以并联形式接地或加一个稳定的电压，使 V_{G1} 等于 V_{G2} ，两级的增益同步化。这种方式可以获得比较小的增益误差波动。

三、实验电路分析

如图 3.1，为实验电路。电路中两个 AD603 放大器级联，由电容 C_9 耦合。采用顺序增益控制方式，两放大器 G_{NEG} 管脚间的电压差为 $1V$ 左右，由电阻 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 分压得到。两放大器的增益分别由 R_7 、 R_8 确定，本实验电路中取值为 $2.5k\Omega$ ，则单级最大增益约为 $42dB$ ，因此电路的最大增益可达 $84dB$ 。通过选取合适的 R_7 、 R_8 ，增益控制范围可在 $20dB$ 内变动。

电路中 Q_2 和 R_6 构成一个检波器，用于检测放大器输出信号幅度的变化； Q_1 和外围电阻构成一个简单的恒流源电路，其集电极电流保持基本不变；流入电容 C_4 的电流是 Q_1 与 Q_2 集电极电流的差值， Q_2 集电极的电流随着输出信号幅度的增加而增加。自动增益控制电压 V_{AGC} 是此差值的时间积分，因此它随输出信号幅度的变化而变化，从而达到自动调整放大器增益的目的。电路稳定时， Q_2 检波电流的平均值要与 Q_1 的电流平衡。如果放大器输出幅度太小不能满足这个条件， V_{AGC} 会增加，使得放大器增益增加，输出幅度变大，直到 Q_2 与 Q_1 的平均电流达到平衡。

开关 SW_4 及外围的电阻网络构成一可变衰减器。 SW_4 控制对输入信号的衰减量，设为“1000”（即接通第一路开关），衰减 $0dB$ ；设为“0100”，衰减 $20dB$ ；设为“0010”，衰减 $40dB$ ；设为“0001”，衰减 $60dB$ ；设为“0000”，衰减 $80dB$ 。

开关 SW_2 用以控制 AGC 环路。当开关 SW_2 处于断开（Open）状态时，整个放大电路处于开环状态，增益由可变电阻 WR_1 控制；当开关 SW_2 处于闭合（Close）状态时，整个放大电路处于闭环状态，可以实现自动增益控制功能。

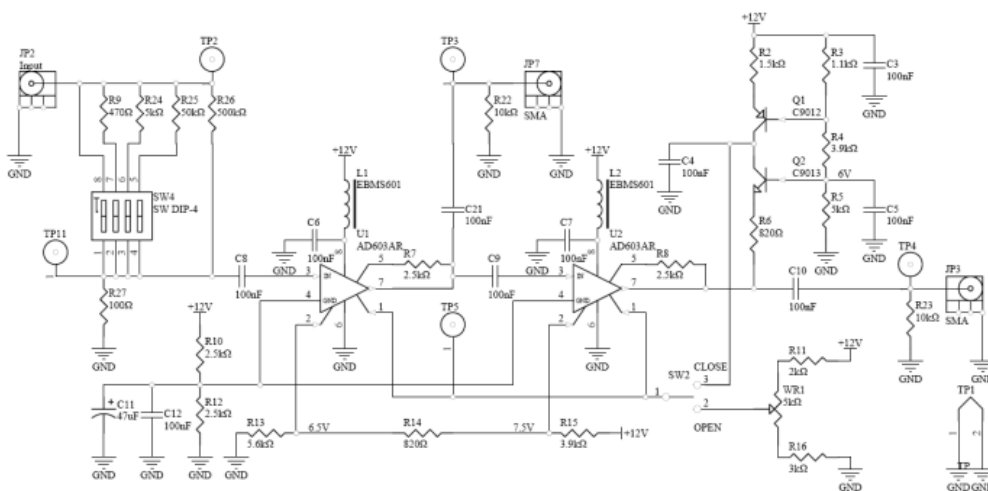


图 3.1 两级级联 AD603 放大器

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 测试电路搭建：

如图 5.1 所示，电路板由+12V电源供电。 JP_2 端是信号输入端，根据测试内容的需要，可分别接频谱分析仪的跟踪源输出或接高频信号发生器。 TP_{11} 是输入信号经过衰减之后的信号测试端，可以接到示波器上观察。 JP_3 、 TP_4 是经过两级级连放大器放大后的信号输出端，分别接到频谱分析仪和示波器上观测。另外，电路板上面的 JP_7 和 TP_3 是前一级放大器的信号输出端，也可以进行观测。

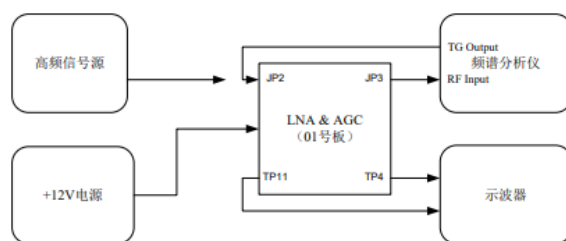


图 5.1 自动增益控制放大器测试连接框图

② 开环放大器的测量：

将开关 SW_2 置于断开状态，则放大器处于开环状态。接通 SW_4 上面的第三个开关（设为“0010”），将输入信号衰减40dB。

(1) 最大开环增益的测量：

高频信号源的输出连接到实验板的 JP_2 ；设定高频信号源产生幅值为 $-40dBm$ ，频率为 $10.7MHz$ 的正弦信号；设定频谱分析仪的中心频率为 $10.7MHz$ ，扫描宽度为 $100KHz$ ，调节可变电阻 WR_1 ，使输出信号最大且不失真，读取输出信号峰值，计算最大增益（计算时别忘了加上衰减的40dB）。

(2) 噪声系数NF的测量：

将电路板输入端与高频信号源断开，接 50Ω 电阻；设定可变衰减器衰减为0dB（将 SW_4 设为“1000”）；设定频谱分析仪扫描带宽为 $100KHz$ ，分辨率带宽为 $100Hz$ ，参考电平为 $-40dBm$ 。用频谱分析仪测量放大器在 $10.7MHz$ 频率点上的噪声功率值，作为放大器输出噪声的功率谱密度 $N_{out}(dBm/RBW)$ ，计算噪声系数。

(3) 1dB增益压缩点的测量：

放大器（或其它电路）在幅频特性的峰值处往往会首先出现1dB压缩，所以在1dB压缩点测试之前首先需要通过幅频特性的测量确定峰值频率。对于宽带放大器，该频率可设为通频带的中心频率附近。1dB压缩点测量时，通过改变输入信号的功率，测试相应输出功率的方式进行。

本实验首先需要设定放大电路的增益，具体步骤为：设定可变衰减器衰减为40dB（将 SW_4 设为“0010”）；在 JP_2 端由高频信号源输入大小为0dBm，频率为10.7MHz的正弦信号；调节可变电阻 WR_1 ，使 JP_3 端输出信号大小为0dBm，则此时放大器的增益为40dB。

进行1dB压缩点测量时，调整高频信号源的输出功率在0dBm至20dBm之间变化（实际输入在-40dBm至-20dBm之间变化），以1dBm为步进，记录对应的输入、输出信号功率值，计算相应输入功率下的放大器增益，从而判断线性增益、1dB压缩点处的输入功率 IP_{1dB} 和输出功率 OP_{1dB} 。

③ AGC 放大器特性测量：

将开关 SW_2 置于闭合状态，则放大器处于自动增益控制状态。当输入信号小于一定幅度时，AGC放大器增益达到最大。随着输入信号的加大，放大器的增益逐渐减小，输出信号幅度保持基本不变。

测量时，将输入信号衰减器设定为衰减20dB；在 JP_2 端由高频信号源输入大小为-50dBm，频率为10.7MHz的正弦信号，以10dBm为步进增加输入信号的功率，直到30dB。用频谱分析仪和示波器观察输出信号的大小，当输出信号功率不随输入信号功率的增加而增加时，放大器自动增益控制开始发挥作用。记录输入信号功率与输出信号功率，计算AGC放大器的最大功率增益 G_{max} ，最小功率增益 G_{min} ，以及动态增益范围 M_{AGC} 。

六、实验结果记录与分析

① 开环放大器的测量：

(1) 最大开环增益的测量：

根据实验步骤设置高频信号源及频谱分析仪后，读取到所要求的输出信号峰值为： $S_{out} = -7.89dBm$ ，而输入的信号峰值为 $S_{in} = -40dBm$ ，考虑到信号衰减40dB，故最大开环增益为： $Gain = -7.89 - (-40) + 40 = 72.11dB$ 。

(2) 噪声系数NF的测量：

由于分辨率带宽设置为 $RBW = 100\text{Hz}$ ，实验中测量得到 $N_{out} = -71.59\text{dBm}/RBW$ ，可算得： $NF(\text{dB}) = N_{out}(\text{dBm}/RBW) - 10\log(RBW) + 174\text{dBm}/\text{Hz} - \text{Gain}(\text{dB}) = -71.59 - 10\log(100) + 174 - 72.11 = 10.3\text{dB}$ 。

(3) 1dB增益压缩点的测量：

表 6.1 1dB增益压缩点测试表

输入功率 /dBm	-40	-39	-38	-37	-36	-35	-34	-33	-32	-31
输出功率 /dBm	0.05	0.96	1.85	2.77	3.71	4.66	5.52	6.54	7.54	8.51
增益/dB	40.05	39.96	39.85	39.77	39.71	39.66	39.52	39.54	39.54	39.51
输入功率 /dBm	-30	-29	-28	-27	-26	-25	-24	-23	-22	-21
输出功率 /dBm	9.48	10.63	11.62	12.61	13.56	14.06	14.37	14.59	14.73	14.78
增益/dB	39.48	39.63	39.62	39.61	39.56	39.06	38.37	37.59	36.73	35.78

如表 6.1，当输入功率以1dBm为步进从-40dBm到-26dBm变化时，放大器的线性增益约保持在39.5dB~40.0dB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-24dBm时，实际增益比理想线性增益下降约1dB，如图 6.1 所示，故1dB压缩点处的输入功率 $IP_{1dB} = -24\text{dBm}$ ，此时的输出功率为 $OP_{1dB} = 14.37\text{dBm}$ 。

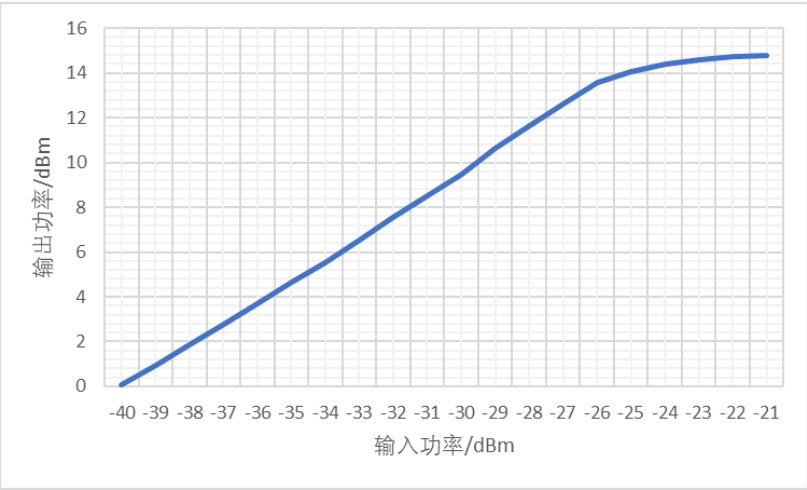


图 6.1 1dB增益压缩点的测量

② AGC 放大器特性测量：

表 6.2 AGC 性能测试表

输入功率 (dBm)	-56.02	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	23.98
输出功率 /dBm	-4.03	1.96	8.65	8.71	8.72	8.82	8.90	8.87	8.86	8.84
增益/dB	51.99	51.96	48.65	38.71	28.72	18.82	8.90	-1.13	-11.14	-15.14

如表 6.2，输入信号功率以10dBm为步进逐渐增加，当其不大于-50dBm时，放大器的增益基本保持在52dB左右；当输入信号功率大于-40dBm时，放大器的增益逐渐减小，但输出信号功率始终保持在8.8dBm左右，表明放大器的自动增益控制正常工作。根据表中数据，可以得到：

$$G_{max} = P_{omin} - P_{imin} = -4.03 - (-56.02) = 51.99dB$$

$$G_{min} = P_{omax} - P_{imax} = 8.84 - 23.98 = -15.14dB$$

$$\therefore M_{AGC} = G_{max} - G_{min} = 67.13dB$$

七、思考题

① 低噪声放大器的主要技术指标有哪些？

答：低噪声放大器的主要技术指标包括增益、噪声系数、1dB增益压缩点、稳定性等。

② 结合实验电路，简述自动增益控制放大器的电路工作原理。

答：实验电路由两个 AD603 放大器级联而成。在电路中， Q_2 和 R_6 组成了一个检波器，可以检测放大器输出信号幅度的变化； Q_1 和外围电阻构成了一个简单的恒流源电路，其集电极电流保持基本不变； Q_2 集电极的电流随着输出信号幅度的增加而增加。

不妨设 Q_1 与 Q_2 集电极电流的电流分别为 i_{c1} 、 i_{c2} ，则流入电容 C_4 的电流为 Q_1 与 Q_2 集电极电流的差值，即 $i_{c4} = i_{c1} - i_{c2}$ 。自动增益控制电压 VAGC 是 i_{c4} 对时间的积分，当输出信号幅度增加，即 i_{c2} 增加时， i_{c4} 将会减小，故 VAGC 减小，从而使得放大器增益降低；相反，当输出信号幅度较小时， i_{c2} 减小时， i_{c4} 将会增大，从而使 VAGC 增大，放大器增益增大。因此，随着输出信号幅度的变化，放大器的增益也会自动进行调整。当电路稳定时， Q_2 检波电流的平均值要与 Q_1 的电流平衡。若放大器输出幅度太小不能满足这个条件，VAGC 会增加，使得

放大器增益增加, 输出幅度变大, 直到 Q_2 与 Q_1 的平均电流达到平衡。

③ 实验电路中, 为何要在放大器输入端设置可变衰减器?

答: 加入可变衰减器是为了应对信号多种输入功率的需要, 扩大实验的测量范围。