

# 滤波成型

张轩，复旦大学核科学与技术系

**摘要：**本实验使用稳压电源和阻容网络产生不同的噪声输入到前置放大器中，并使用示波器的 FFT 功能和高频毫伏表观察这些噪声，用以研究主放大器的滤波成型对噪声的影响。

**关键词：**滤波成型 脉冲放大器 噪声

## 一、引言

在核信号测量系统中，影响测量的一个重要因素是前置放大器所产生的噪声。在使用半导体探测器时，这个问题特别严重。即使采用低噪声的前置放大器，噪声仍然不可避免。因此还必须采取其它方法来降低噪声，也就是要进一步提高信噪比。众所周知，噪声服从一定的统计规律，它的频谱与信号的频谱不同。利用噪声与信号频谱之间的差异，就有可能让噪声与信号通过一个滤波网络。滤波网络对噪声和信号有不同的衰减。如果它对噪声的衰减比对信号的衰减要多，那么通过这个网络后，信号比噪声大得多，也就提高了信噪比。

由于前置放大器本身的噪声较小，本实验使用稳压电源和阻容网络产生不同的噪声输入到前置放大器中，并使用示波器的 FFT 功能和高频毫伏表观察这些噪声，用以研究主放大器的滤波成型对噪声的影响。

本实验所测的数据一定程度上可以进行优化，例如图5，实际上是在 FFT 变换的结果中截取的一段。可以在示波器上进一步增加“时/隔”参数使得 FFT 的有效频率集中在我们感兴趣的 50 Hz 的低频波段。可以参考的公式为<sup>[1]</sup>：

$$f_{\max} = \frac{1}{d} = \frac{N}{Nd} = \frac{N}{T} = \frac{N}{8T_0}$$

其中  $f_{\max}$  是 FFT 后的最大频率， $d$  是采样间隔， $N$  是采样总数， $T$  是 FFT 变换的时间长度，也即示波器屏幕上的波形的时间， $T = Nd$ 。 $T_0$  是示波器一大格所代表的时间，示波器上有 8 个大格，故  $T = 8T_0$

## 二、实验目的

1. 研究观测  $a, b$  噪声的区别以及成型电路参数对噪声的影响；
2. 学习调整滤波成型电路获得最佳信噪比；

### 三、实验原理

#### 3.1 实验操作相关原理

本实验采用的是 CAKE611 型放大器，内设有极-零相消电路，与积分电路一起组成  $RC - (RC)^4$  滤波成形电路。

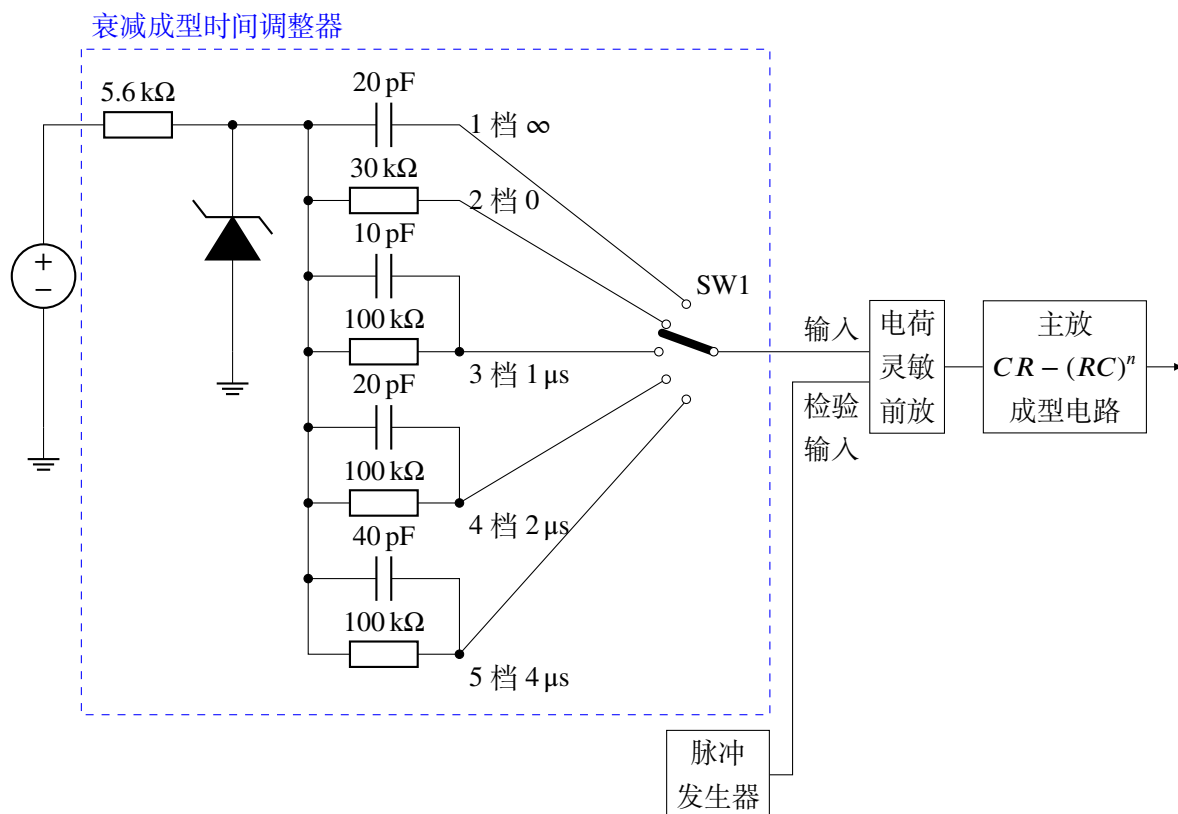


图 1 实验电路图

实验线路如图1所示，由于前放的噪声较小，为了突出实验效果，需要用一个噪声较大的器件来代替前放产生的噪声。我们选择在电荷灵敏前放外加稳压管作为噪声源，和电荷灵敏前放自身的噪声相比，外加噪声源起主要作用。

图1中  $SW_1$  可调节噪声转角时间常数， $SW_1$  为信号、噪声转换开关。接入电源时，稳压管两端产生的白噪声电压通过阻容网络注入电荷灵敏放大器，忽略  $R_f$  ( $R_f$  视为开路) 时，在主放大器输入端得到的噪声电压功率谱密度为  $a^2 + \frac{b^2}{\omega^2}$ ，噪声转角时间常数  $\tau_c = \frac{a}{b}$ 。调节波段开关  $SW_1$ ，可改变 a、b 噪声分量的比例。 $SW_1$  置于 1 至 5 档时， $\tau_c$  的大致数值分别为  $\infty$ 、0、1、2 和  $4\mu s$ ， $\tau_c = \infty$  时只有 a 声分量， $\tau_c = 0$  时仅有 b 噪声分量。电源不用时应断开。接入测试信号时，检验信号经电荷灵敏内部的  $1pF$  检验电容注入电荷灵敏放大器，检验信号由信号发生器提供。

## 3.2 主放大器的滤波成型

主放大器的  $RC - (RC)^4$  的滤波网络的传递函数为

$$H(s) = \frac{s\tau}{(1 + s\tau)^5} \quad (1)$$

其频率响应函数为，如图2所示

$$|H(i\omega)| = \frac{\omega\tau}{(1 + (\omega\tau)^2)^{5/2}} \quad (2)$$

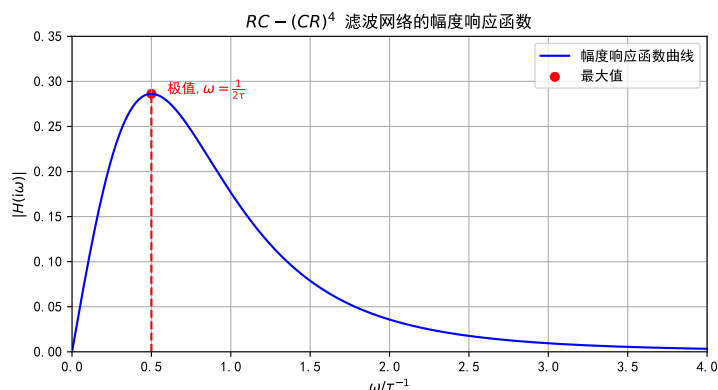


图 2 主放大器滤波网络的幅度响应函数

可见这是一个带通滤波器，对于频率在  $\tau^{-1}$  附近的信号进行放大而对其它频率的信号进行衰减。

## 四、实验装置

1. MSO2202 数字示波器 1 台
2. DG4102 脉冲发生器 1 台
3. CAKE151 型电荷前放 1 台
4. CAKE611 型放大器 1 台
5. SP2217 超高频毫伏表 1 台
6. DP832A 稳压电源 1 台
7. 自制电阻调整盒 1 个

## 五、实验过程

### 5.1 观察噪声波形和 50 Hz 干扰波形

**Step 1:** 不接主放，接通直流电源，根据噪声情况设置电压值为 15 ~ 20 V 左右，调节  $\tau_c = 0, \infty$ ，用示波器的 FFT 功能观察电荷灵敏前放的输出噪声在 100 kHz 以下的幅度和分布情况，使用高频毫伏表观察两种噪声的数值。

**Step 2:** 将电荷灵敏前放输入端开路，调节示波器观察记录电网 50 Hz 干扰在输出端产生的波形。

**Step 3:** 连接主放大器，设置增益为  $A = 100$ ，取  $\tau_c = 0, \infty$ ，设置微积分时间常数  $\tau_D = \tau_I = \tau$  从 0.5 变化到 6（改变滤波时间常数时会对主放大器增益产生影响，需要结合示波器确保主放大器的放大倍数是 100），利用 FFT 的功能观察它对不同频率噪声分量的滤波作用。利用高频毫伏表测量噪声的等效值并加以分析。

## 5.2 研究成形电路参数对噪声的影响

使用 DG4102 信号发生器的任意波功能，产生内建 Expfall 波形，设置周期为 500  $\mu\text{s}$ ，幅度为 100 mV 的正脉冲，从前放的检验输入端产生。设置主放大器的增益使得输出幅度在 10 V 左右。取  $\tau_c = 1, 2, 4 \mu\text{s}$ ，改变微、积分时间常数  $\tau_i = \tau_d = \tau$ ，在主放大器输出端测量噪声电压与信号幅度，从而可得到信号噪声比随微积分时间变化曲线。

## 六、实验结果和分析

值得一说的是，在 FFT 中，变换结果的第一个分量（ $f = 0$  的分量）是波形各处幅度的求和，这时 FFT 的本身的特性（参考 [1]）。同时也可以从连续傅里叶变换的结果看出（参考 [2]），连续傅里叶变换有

$$\mathcal{F}[f](\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \Rightarrow \mathcal{F}[f](0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt$$

所以若输入波形具有即便很小的正项偏移，则该正项偏移就会在频谱上产生一个  $\delta$  函数。即使偏移很小，也会在  $\omega = 0$  处产生无穷大。这个特性无论是连续傅里叶变换还是离散傅里叶变换都成立。

所以当输入脉冲具有一定程度的正向偏离时，该分量会远大于其它分量，在展示结果时可以将其去掉，也即去掉  $f = 0$  的结果。我的结果中已经将其去掉。实验室在示波器的 FFT 波形中看不出外界条件改变对 FFT 结果的影响也是因此。

### 6.1 观察噪声波形

在不接主放大器的情况下，设置电压值为 15 V。

当  $\tau_c = \infty$  时  $b = 0$ ，此时只有 a 噪声，噪声的功率谱密度为一条水平直线，各频率的噪声幅度都相等。实验时观测到的结果如图3所示。

当  $\tau_c = 0$  时  $a = 0$ ，此时只有 b 噪声，噪声的功率谱密度为  $\frac{b}{\omega}$ 。实验时观测到的结果如图4所示。

不难看出实验结果大致和预期一致，只有 a 噪声时，噪声集中在 0 ~ 500 kHz 中间。当只有 b 噪声时，噪声幅度谱近似按反比例分布。

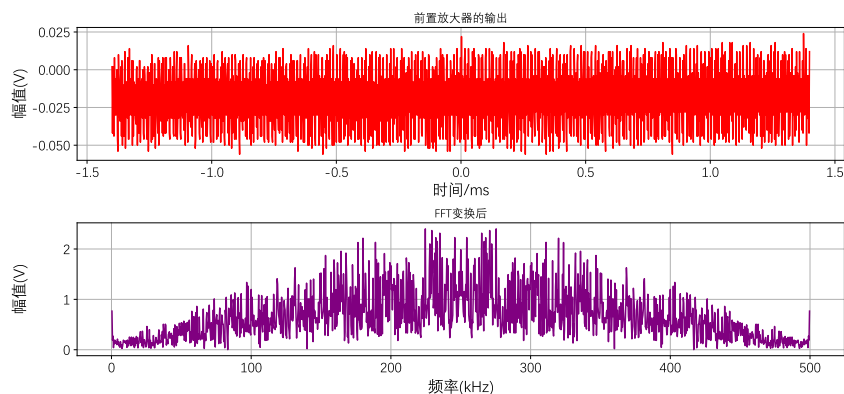


图 3  $\tau_c = \infty$  时前置放大器的噪声波形

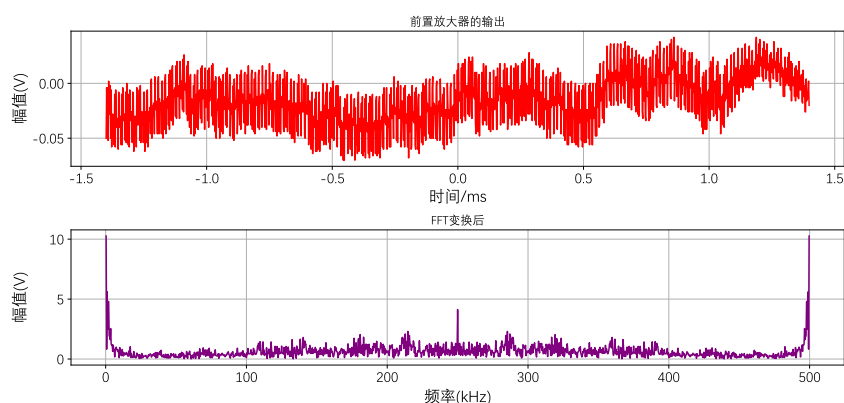


图 4  $\tau_c = 0$  时前置放大器的噪声波形

## 6.2 观察 50 Hz 干扰

将电荷灵敏前放的输入端开路，观察 50 Hz 噪声。结果如图5所示。

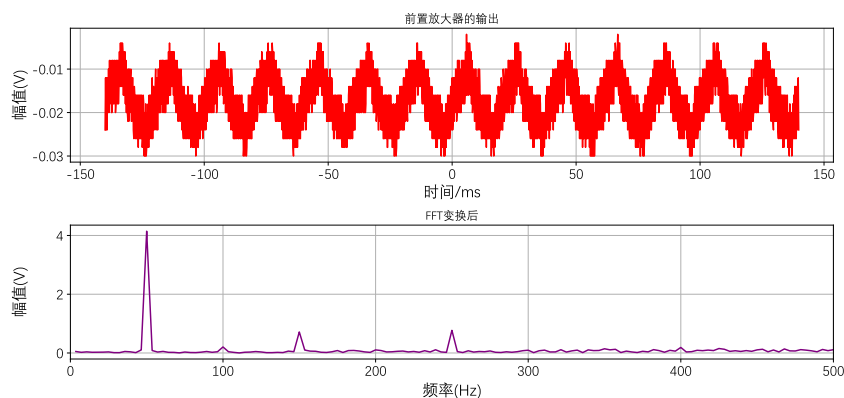


图 5  $\tau_c = 0$  时前置放大器的噪声波形

可见在 50 Hz 处存在一个明显的峰值，除此以外在 50 Hz 的整数倍处也有较弱的峰值，这都是 50 Hz 的噪声源产生的。该结果可以进一步改进，可以进一步增加采样间隔，即增加示波器上每一个代表的时间长度，从而缩小离散傅里叶变换的频谱范围。

50 Hz 噪声是我国电网造成的噪声，是各种噪声分析实验中最常见且难以去除的噪

声。

### 6.3 无输入信号时两种噪声的滤波结果

设置放大器的增益为 100，两种噪声经过滤波成型后的结果如图6所示

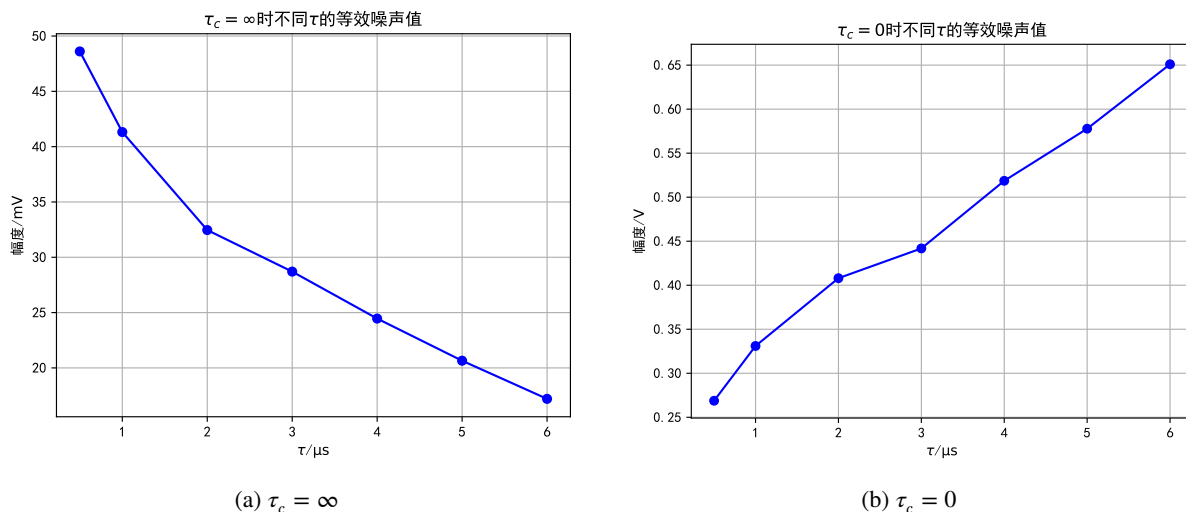


图 6 无输入信号时两种噪声的滤波结果

当  $\tau_c = \infty$ ，如图6a，只有 a 噪声时，随着主放大器时间常数增大噪声不断减小。因为主放大器时间常数越大，主放的幅度相应函数越集中于通过低频波段，高频波段分量将会减小，从而在高频毫伏表上测得的等效噪声值变小。

当  $\tau_c = 0$ ，如图6b，只有 b 噪声时，随着主放大器时间常数增大噪声不断增大。这是因为主放的幅度相应函数越集中于通过低频波段，但 b 噪声的频率越低噪声越大（噪声值和频率成反比例关系）。

### 6.4 在有输入的情况下研究主放时间常数对信噪比的影响

调节放大器的增益为 100，研究检验段有输入 Expfall 的情况下，噪声  $\tau_c = 1, 2, 4$  时，主放滤波成型时间对新造波的影响，结果如图7所示。

在图7c中，发现  $\tau = 4 \mu\text{s}$  的条件下测量的结果不符合其它测量结果的趋势，怀疑可能是测量失误导致，故将其去掉后展示在图中。

可以观察到，在不同的  $\tau_c$  条件下，主放大器取得不同的成型时间会对信噪比产生不同的影响。随着  $\tau_c$  增大，信噪比随  $\tau_c$  的关系逐渐从图6b转变为6a。

在  $\tau_c = 2 \mu\text{s}$  和  $\tau_c = 4 \mu\text{s}$  的条件下，存在最佳成型时间。从离散的数据中分析出它们的最佳成型时间为  $1 \mu\text{s}$ 。

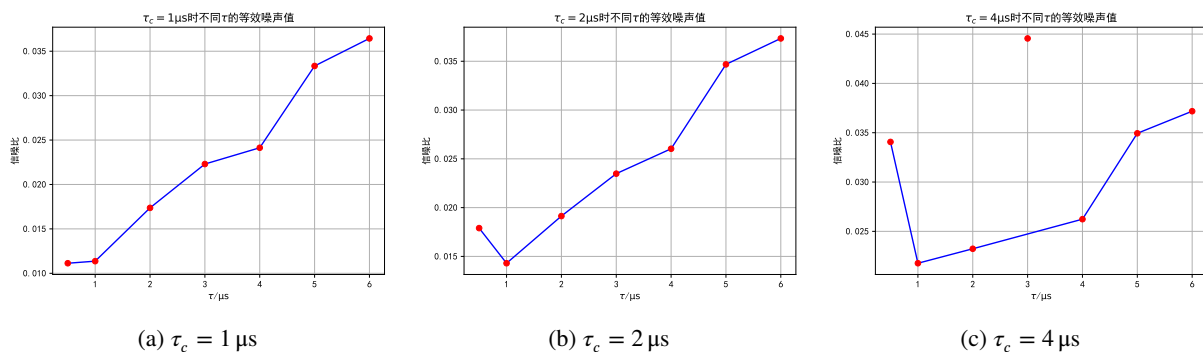


图 7 主放时间常数对信噪比的影响

## 七、实验结论

1. 通过示波器测得的数据观察了 a,b 两种噪声的频谱分布，对噪声有了初步的认知；
2. 在没有任何其它输入的情况下，通过示波器测得的数据观察了 50 Hz 噪声；
3. 观察了 a,b 两种噪声在主放大器产生的噪声，发现 a 噪声会随着成形时间的增大而减小，b 噪声则相反，会随着成形时间的增大而增大；
4. 观察了  $\tau_c = 1, 2, 4 \mu\text{s}$  的条件（两种噪声混叠）下滤波成形时间对信噪比的影响，且发现在  $\tau_c = 2, 4 \mu\text{s}$  的条件下存在最佳滤波时间，均为  $\tau = 1 \mu\text{s}$ ；

## 八、参考文献

- [1] OI Wiki Team. 快速傅里叶变换.
- [2] 古德曼. 傅里叶光学导论 = *Introduction to fourier optics*.