



核辐射探测器前端电子学 设计方法研究



彭进先

国防科学技术大学



主要内容

1

液体闪烁体探测器的输出信号

2

电荷灵敏前置放大器设计

3

谱仪放大器设计

4

半实物仿真可行性分析

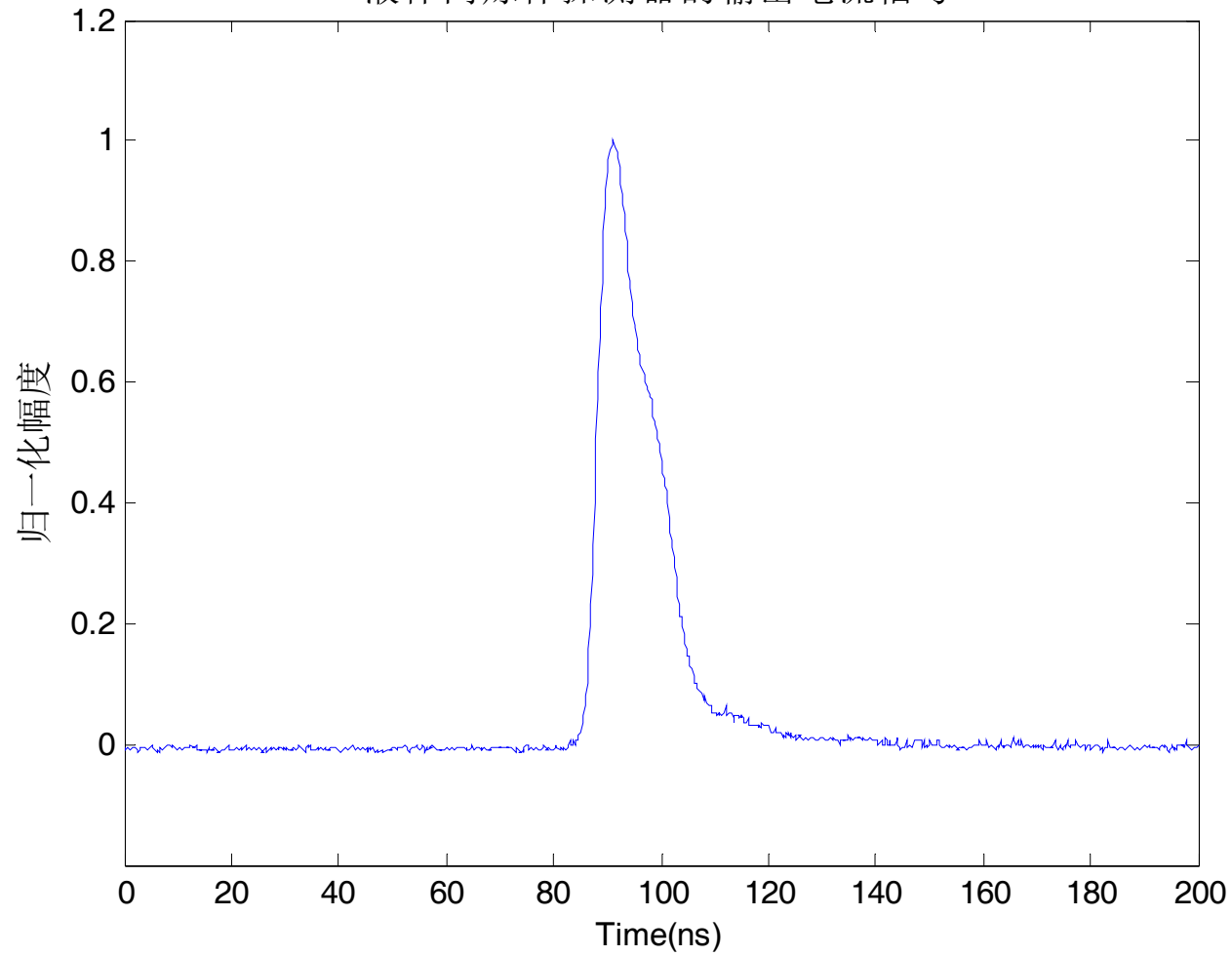
5

噪声特性的测试



1. BC501A型液体闪烁体探测器的输出信号

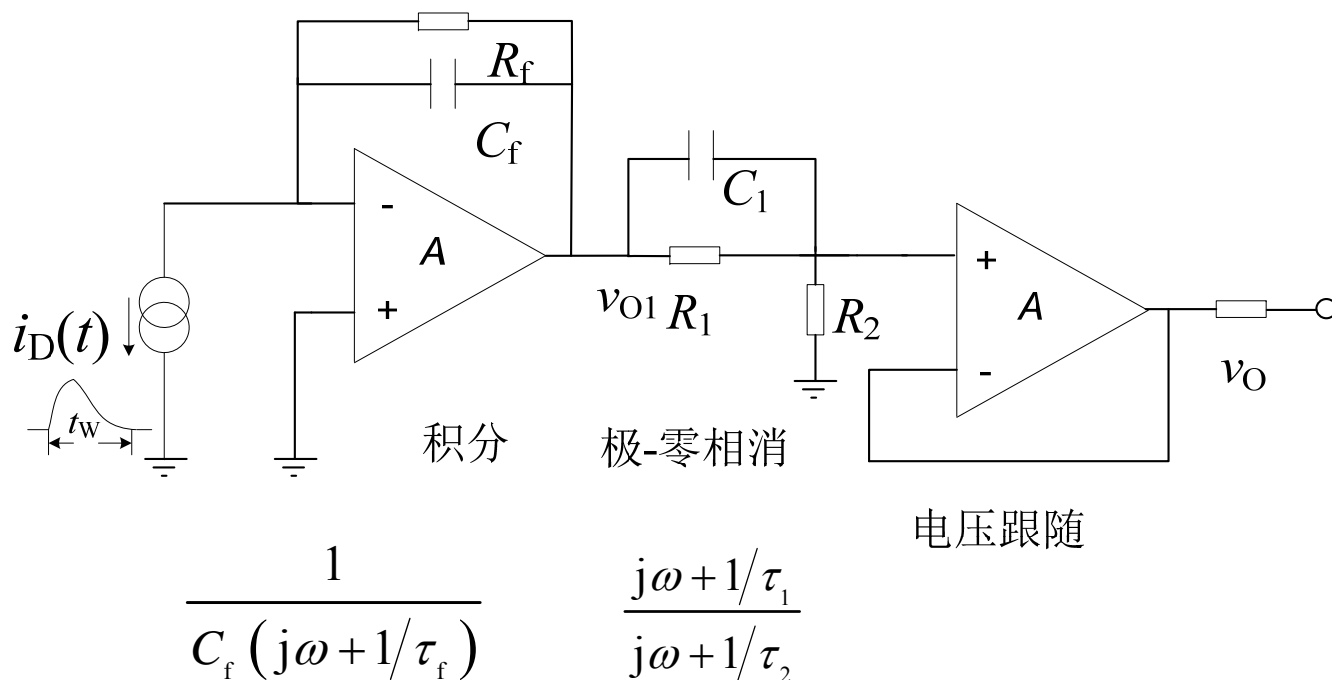
液体闪烁体探测器的输出电流信号





2. 电荷灵敏前置放大器设计

传统电荷灵敏前放设计多采用分立元件或分立元件+集成运放的设计思路，本文采用了基于集成运放的电荷灵敏前放设计结构。





2. 电荷灵敏前置放大器设计

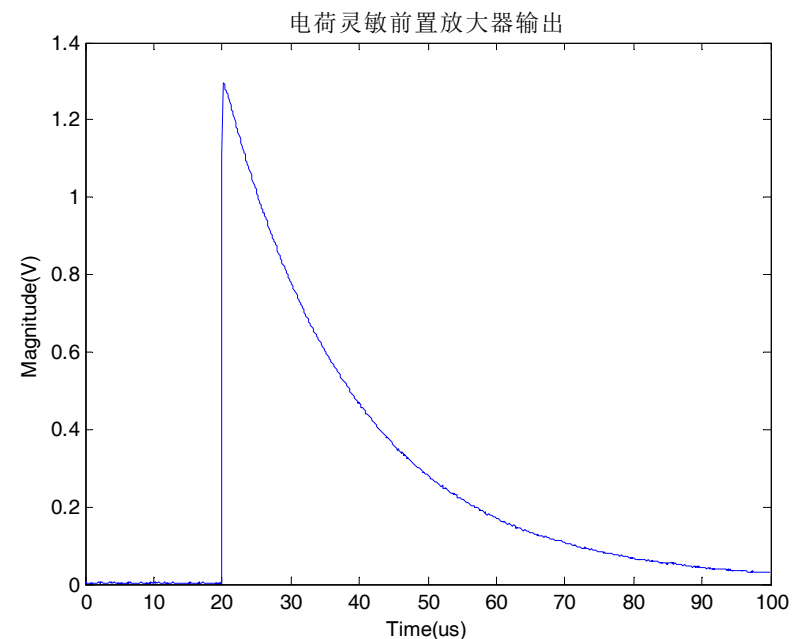
其中, $\tau_f = R_f C_f$ $\tau_1 = R_1 C_1$ $\tau_2 = \frac{R_2 R_1 C_1}{R_1 + R_2}$ 由 $\tau_f = \tau_1$

$H(j\omega) = \frac{1}{C_f (j\omega + 1/\tau_2)}$ 若输入理想的电流脉冲 $i_D(t) = Q\delta(t)$, 则

$$V_o(j\omega) = I_D(j\omega) H(j\omega) = \frac{Q}{C_f} \frac{1}{j\omega + 1/\tau_2}$$

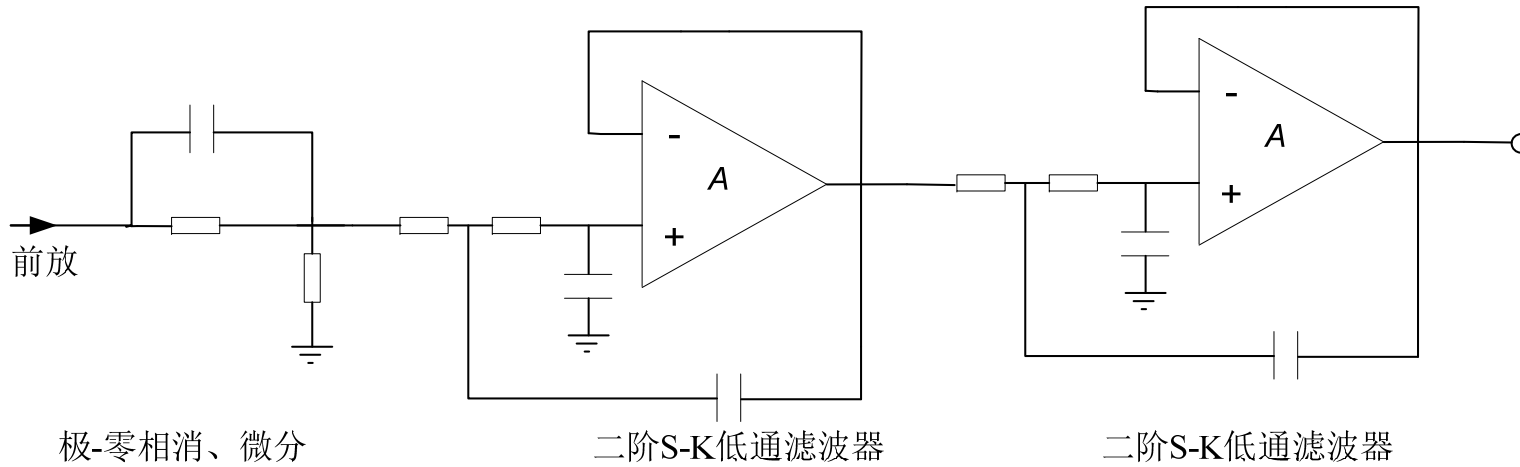
反变换得

$$v_o(t) = \frac{Q}{C_f} e^{-t/\tau_2} u(t)$$





3. 谱仪放大器设计



$$\frac{s + 1/\tau_1}{s + 1/\tau}$$

$$\frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}}$$

$$\frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}}$$

系统传递函数为

$$H(s) = \frac{s + \frac{1}{\tau_1}}{s + \frac{1}{\tau}} \frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}} \frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}}$$



3. 谱仪放大器设计

实际中，由于运放、电阻和电容并非理想的元件，实际的硬件电路输出和理论计算有一定的差距，一般要进行系数修正。令 $s=0$ ，则理论的放大倍数为0.05；而谱仪放大器的输入为1V的直流信号时，输出为0.031，修正的放大系数为0.62。因此修正后的传递函数为

$$H(s) = 0.62 \times \frac{s + \frac{1}{\tau_1}}{s + \frac{1}{\tau}} \frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}} \frac{2}{\tau^2} \frac{1}{s^2 + s\frac{2}{\tau} + \frac{2}{\tau^2}}$$



4. 半实物仿真可行性分析

①利用双线性变换法将连续时间系统函数 $H(s)$ 变为离散时间系统函数 $H(z)$

$$H(z) = 0.62 \times \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5}}$$

$$b_0 = \frac{1}{\tau_1} + 2f_s \quad b_1 = \frac{5}{\tau_1} + 6f_s \quad b_2 = \frac{10}{\tau_1} + 4f_s \quad b_4 = \frac{5}{\tau_1} - 6f_s \quad b_5 = \frac{1}{\tau_1} - 2f_s$$

$$a_0 = 8\tau^4 f_s^5 + 20\tau^3 f_s^4 + 24\tau^2 f_s^3 + 16\tau f_s^2 + 6f_s + \frac{1}{\tau} \quad a_1 = -40\tau^4 f_s^5 - 60\tau^3 f_s^4 - 24\tau^2 f_s^3 + 16\tau f_s^2 + 18f_s + \frac{5}{\tau}$$

$$a_2 = 80\tau^4 f_s^5 + 40\tau^3 f_s^4 - 48\tau^2 f_s^3 - 32\tau f_s^2 + 12f_s + \frac{10}{\tau} \quad a_3 = -80\tau^4 f_s^5 + 40\tau^3 f_s^4 + 48\tau^2 f_s^3 - 32\tau f_s^2 - 12f_s + \frac{10}{\tau}$$

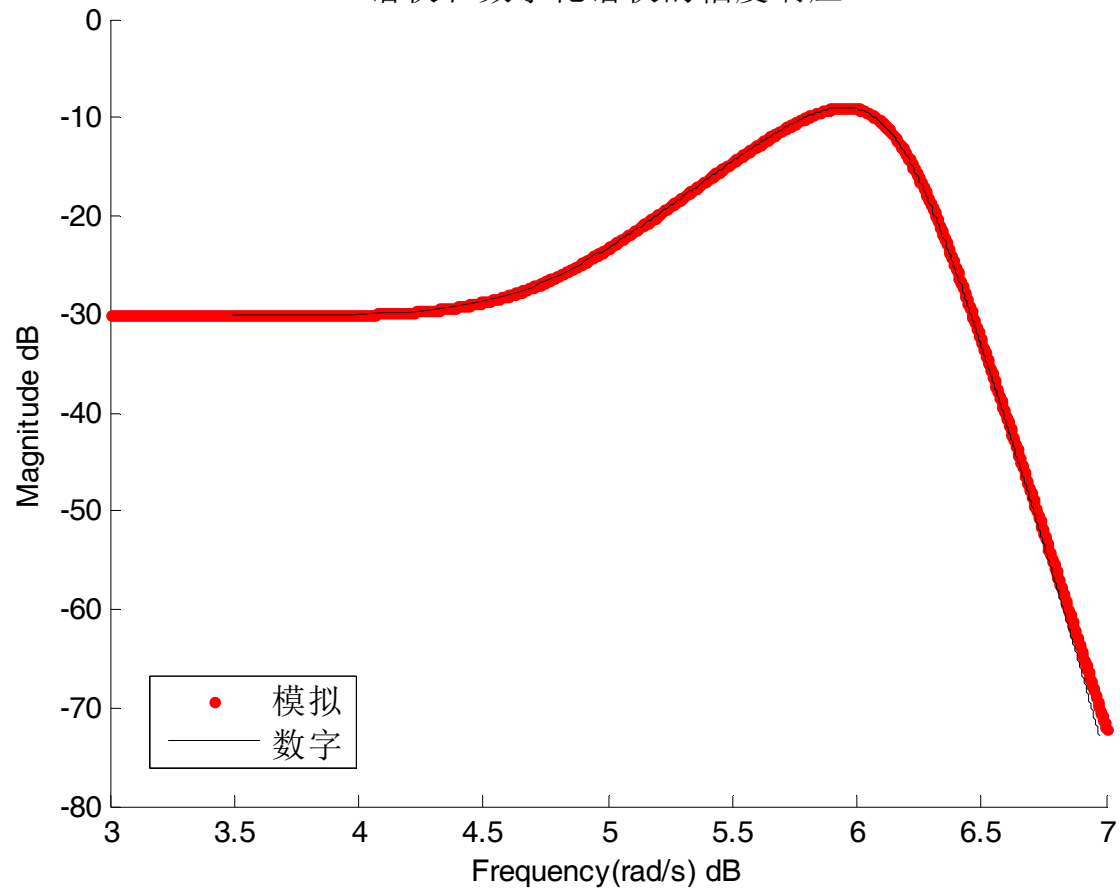
$$a_4 = 40\tau^4 f_s^5 - 60\tau^3 f_s^4 + 24\tau^2 f_s^3 + 16\tau f_s^2 - 18f_s + \frac{5}{\tau} \quad a_5 = -8\tau^4 f_s^5 + 20\tau^3 f_s^4 - 24\tau^2 f_s^3 + 16\tau f_s^2 - 6f_s + \frac{1}{\tau}$$



4. 半实物仿真可行性分析

将 $f_s=10^7\text{Hz}$, $\tau_1=20\mu\text{s}$, $\tau=1\mu\text{s}$ 代入 $H(s)$ 和 $H(z)$ 求得系统的幅频响应。

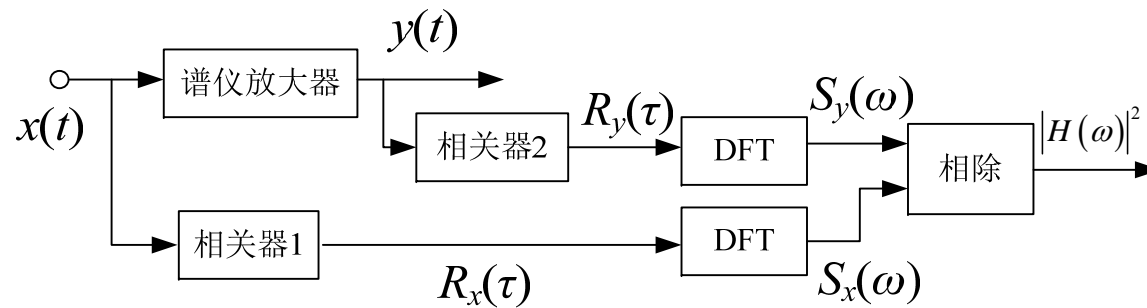
谱仪和数字化谱仪的幅度响应





4. 半实物仿真可行性分析

②利用自相关辨识系统的幅频响应

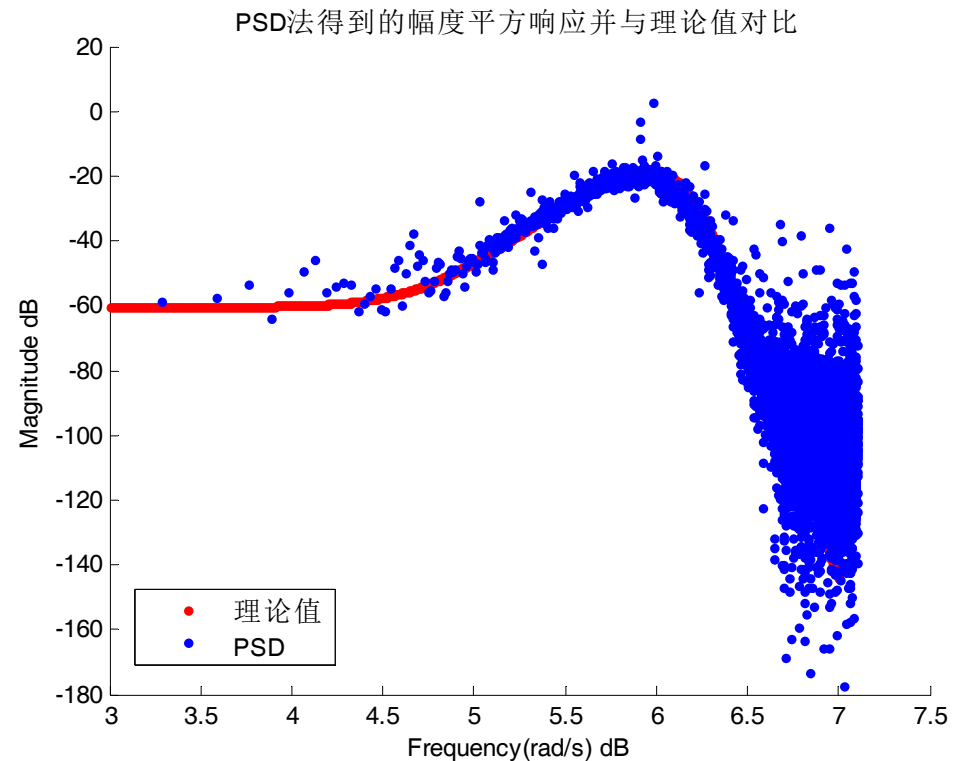


$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_y(\omega)}{S_x(\omega)}$$



4. 半实物仿真可行性分析

由Agilent 33522A产生
2MHz的带限噪声，得到系统的
幅度平方响应，理论值与PSD法
得到的对比（采样 10^7 Hz，采样
点数为10k，采用直接法作 2^{15} 点
的功率谱估计，则频率分辨率
约为 $305\text{Hz}=1.9 \times 10^3\text{rad/s}$ ），
可以验证二者基本吻合。



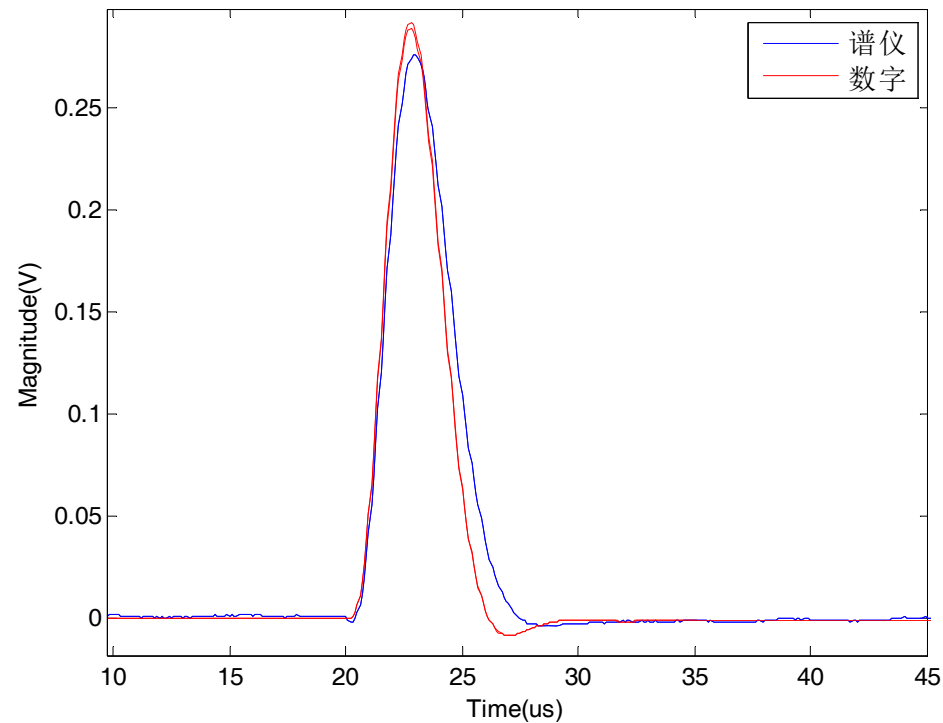


4. 半实物仿真可行性分析

③ 谱仪成形和数字化谱仪成形效果对比

调节Agilent 33522A使输出频率 $f=1\text{kHz}$ ，上升时间为 8.4ns 且宽度为 $500\mu\text{s}$ ，幅度为 1.5Vpp 的信号。

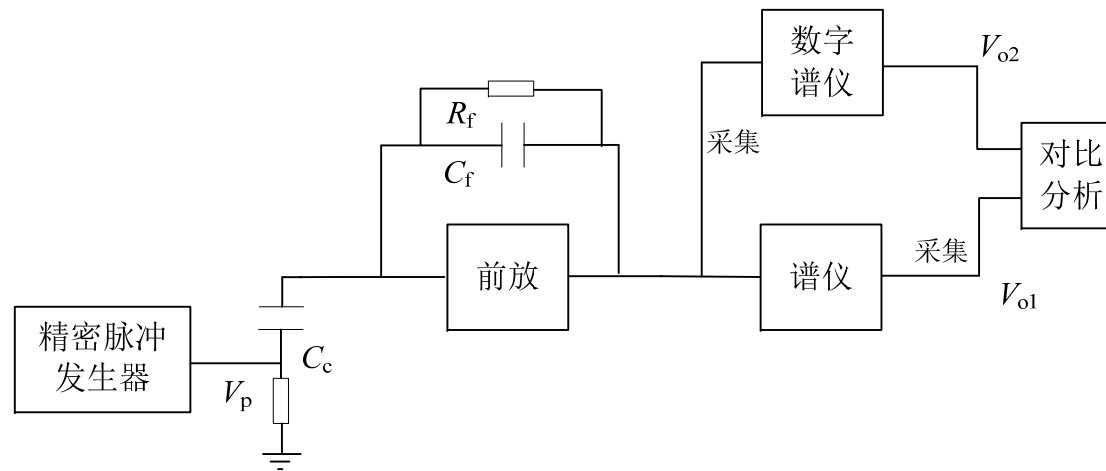
信号经过谱仪成形和数字成形的输出





5. 噪声特性测试

前置放大器的噪声特性和后接的成形滤波器器有关。下面分别用谱仪成形和数字化谱仪成形测量前放的噪声特性。



等效噪声电荷

$$\text{FWHM}_{\text{NC}} = 2.355 \frac{V_p}{V_o} C_c V_{\text{no}}$$



5. 噪声特性测试

前放的测试电容为200pF, $RC=CR=1\mu\text{s}$, 当输入为1.5Vpp时, 可得谱仪输出 $V_{o1}=0.276\text{V}$; 数字化谱仪输出 $V_{o2}=0.292\text{V}$ 。无信号输入时, 前放、谱仪及谱仪数字输出如下图所示

前放输出噪声均方根值为

$$8.37 \times 10^{-4}\text{V}$$

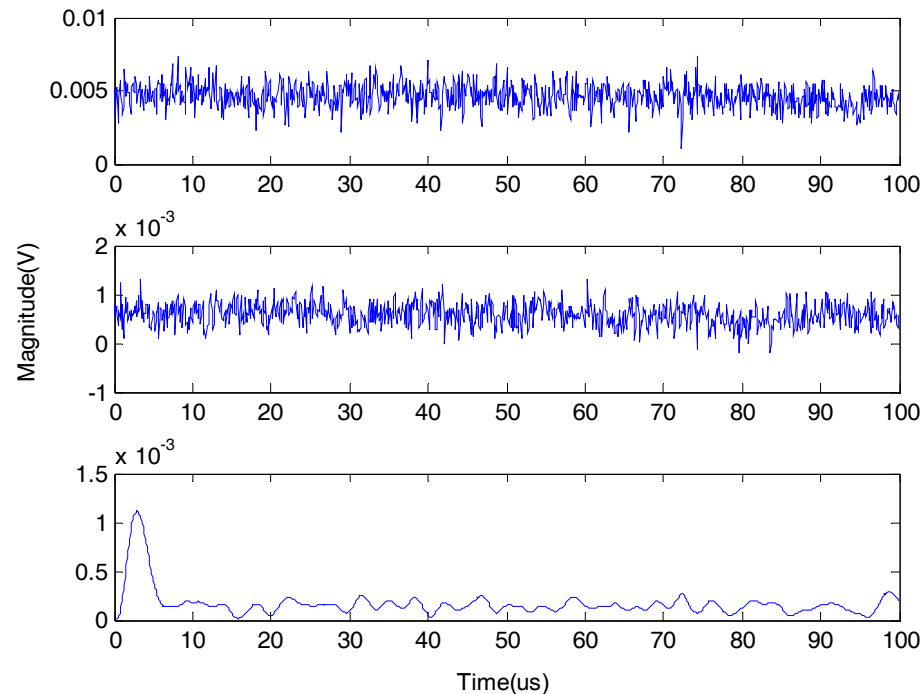
谱仪输出噪声的均方根值

$$V_{no1}=2.29 \times 10^{-4}\text{V}$$

数字成形输出的噪声均方

$$\text{根值 } V_{no2}=1.47 \times 10^{-4}\text{V}。$$

噪声经过谱仪成形和数字成形的输出





5. 噪声特性测试

谱仪放大器的输出等效噪声电荷

$$\text{FWHM}_{\text{NC1}} = 2.355 \frac{V_p}{V_{o1}} C_c V_{\text{no1}} = 2.355 \frac{1.5}{0.276} 200 \times 10^{-12} \times 2.29 \times 10^{-4} = 5.86 \times 10^{-13} \text{C}$$

数字化谱仪得到的等效噪声电荷

$$\text{FWHM}_{\text{NC2}} = 2.355 \frac{V_p}{V_{o2}} C_c V_{\text{no2}} = 2.355 \frac{1.5}{0.292} 200 \times 10^{-12} \times 1.47 \times 10^{-4} = 3.56 \times 10^{-13} \text{C}$$



5. 噪声特性测试

不难看出，数字化的谱仪得到的噪声更低，噪声性能提高了40%左右；原因是谱仪放大器抑制噪声的同时内部器件也产生了噪声，而数字化的方法不存在这个问题。但是，设计的前置放大器的噪声依然很大，达 10^6 个电子电荷量级。

本工作从理论上分析了半实物仿真的可行性，并进行了实验验证。数字化谱仪不仅性能优越，而且成本低，具有一定的实用价值。



Thank You !

欢迎各位老师批评指正