

过程参数检测作业报告

2017011010 杜澍滢 自 71

图 1 所示是一种超声流量计的结构，其中两个超声传感器均可工作在发送和接受方式下(Sensor1 发送信号时 Sensor2 接收信号, Sensor2 发送信号时 Sensor1 接收信号)，假设 ϕ 为两个超声传感器连线与管道轴向的夹角， D 为管道直径，声速为 c ，箭头所示为流体流动方向。

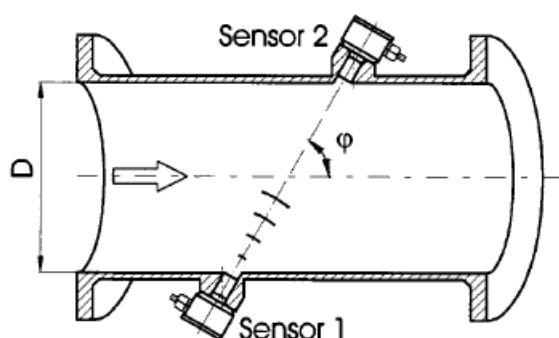


图 1

采用“时差法”测量流量的原理在于通过计算超声波顺流传播信号（Sensor1 发送超声波，Sensor2 接收超声波）及逆流传播信号（Sensor2 发送超声波，Sensor1 接收超声波）之间的时间差来求得管道内流体平均流速并进而得到流量。用公式表示为：

$$t_{12} = \frac{D}{\sin \phi (c + \bar{v} \cos \phi)}$$

$$t_{21} = \frac{D}{\sin \phi (c - \bar{v} \cos \phi)}$$

$$\Delta t = (t_{21} - t_{12}) = \frac{D}{\sin \phi} \left(\frac{2\bar{v} \cos \phi}{c^2 - \bar{v}^2 \cos^2 \phi} \right) \approx \frac{2D\bar{v} \cos \phi}{c^2 \sin \phi} = \frac{2D\bar{v}}{c^2} \operatorname{ctg} \phi$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta t c^2}{2D} \operatorname{tg} \phi \quad Q = \frac{\pi D^2}{4} \bar{v} \quad (\text{其中 } \bar{v} \text{ 为流体平均流速, } Q \text{ 为流量})$$

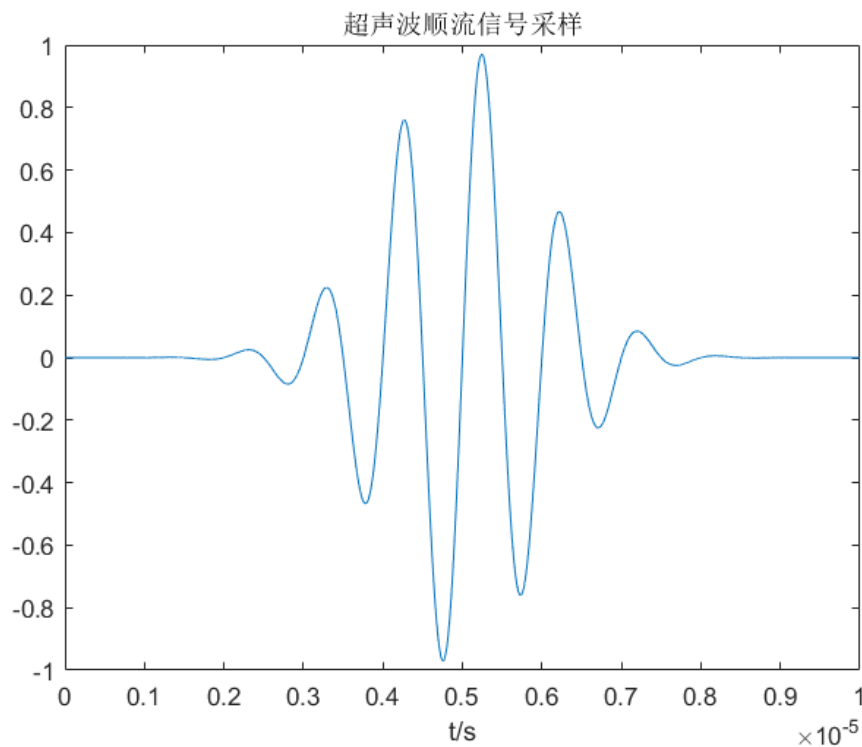
“时差法”超声波流量计的核心问题是如何获得顺流信号与逆流信号之间的时间差。

1) 假设超声波顺流传播信号（Sensor1 发射，Sensor2 接收）可以表示为：

$$s_{12} = \sin(2\pi ft)e^{\frac{-a(t-\tau)^2}{2}}$$

其中： $f = 1\text{MHz}$ （产生超声波的压电晶体的固有振荡频率，即用于流量测量的超声波的频率）， $a = 1 \times 10^{12}$ ， $\tau = 5 \times 10^{-6}$ 秒，取信号长度为 2τ （即 t 从 0 到 2τ ），现对信号 s_{12} 进行采样，采用 Matlab 画出采样频率 f_s 为 1GHz 下 s_{12} 波形；

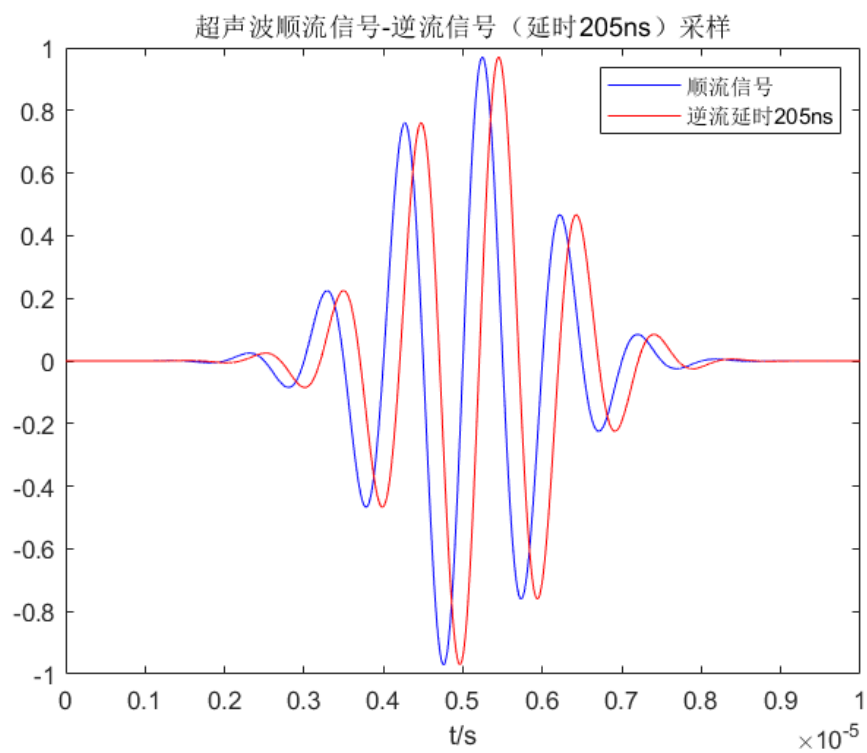
【答】



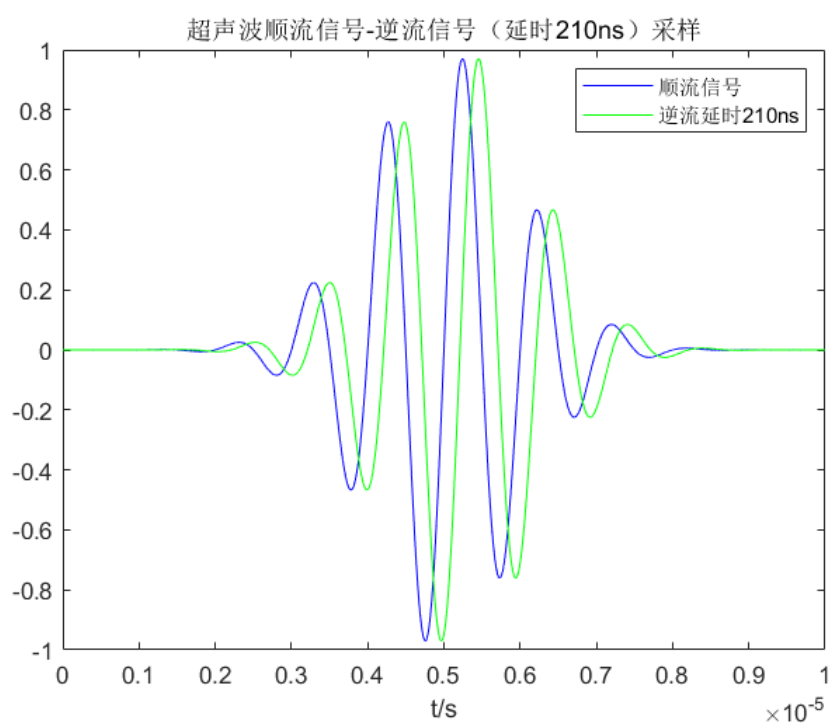
- 2) 超声波逆流传播信号（Sensor2 发射，Sensor1 接收）可以看作顺流传播信号的一个延时信号，延时即前述逆流信号与顺流信号间的时间差。若信号采样频率 f_s 为 1GHz，采用 Matlab 在同一张图上给出顺流信号 s_{12} 及时差 Δt 分别为 205ns、210ns、215ns 下逆流信号 s_{21} 波形。

【答】

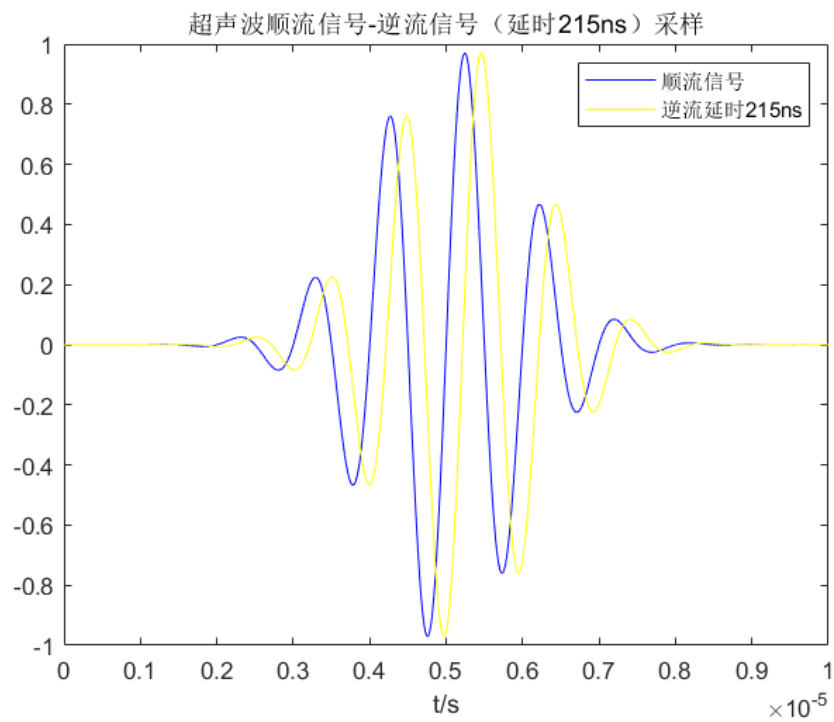
$\Delta t = 205\text{ns}$ ：



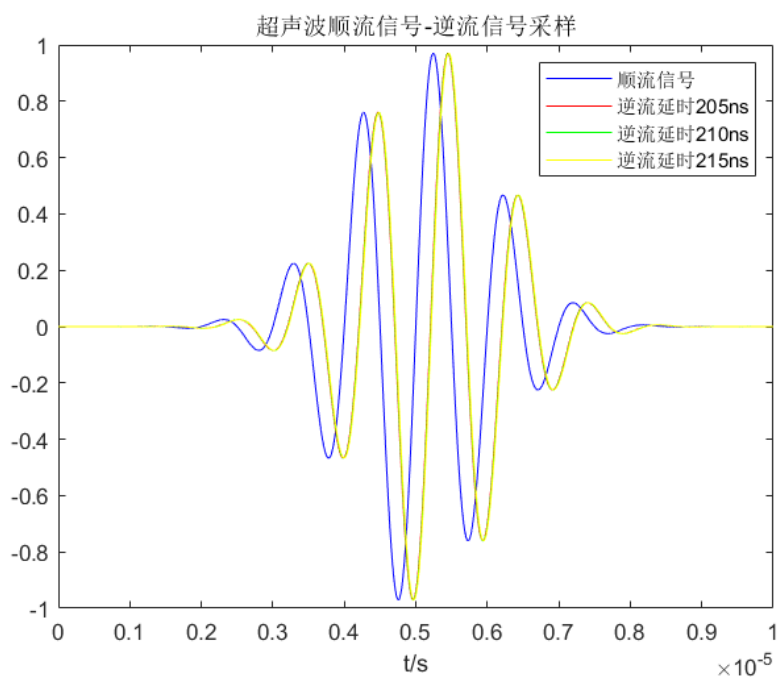
$\Delta t = 210\text{ns}$:



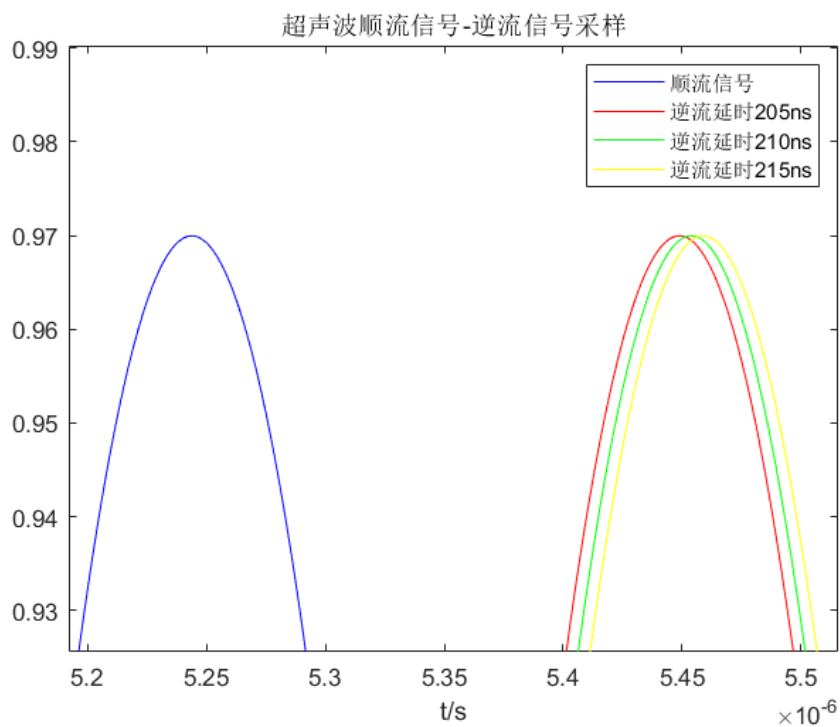
$\Delta t = 215\text{ns}$:



全部画在一张图上：

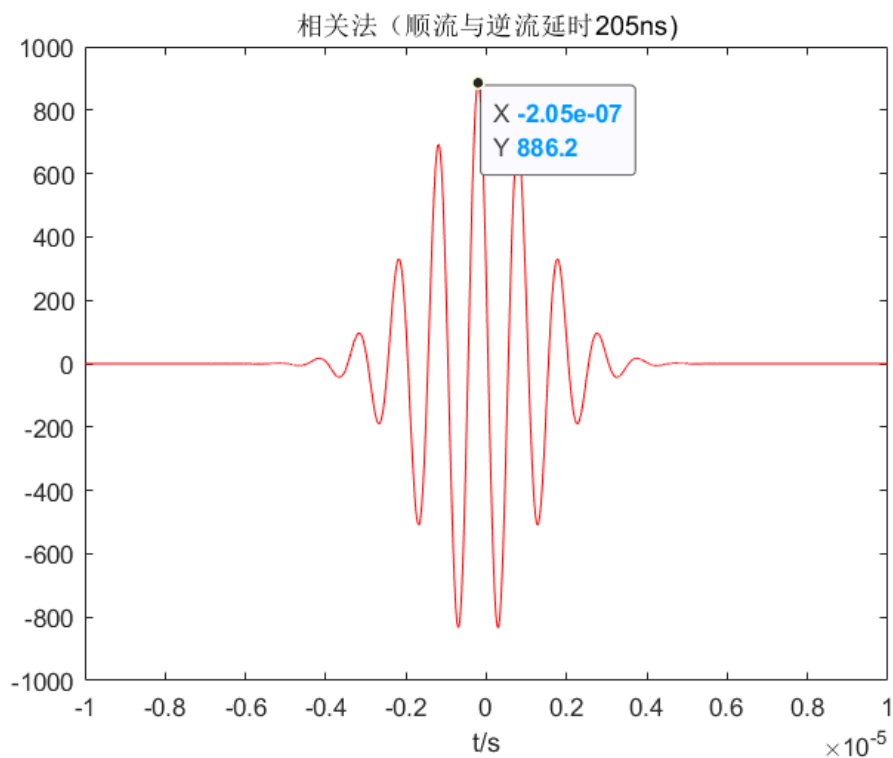


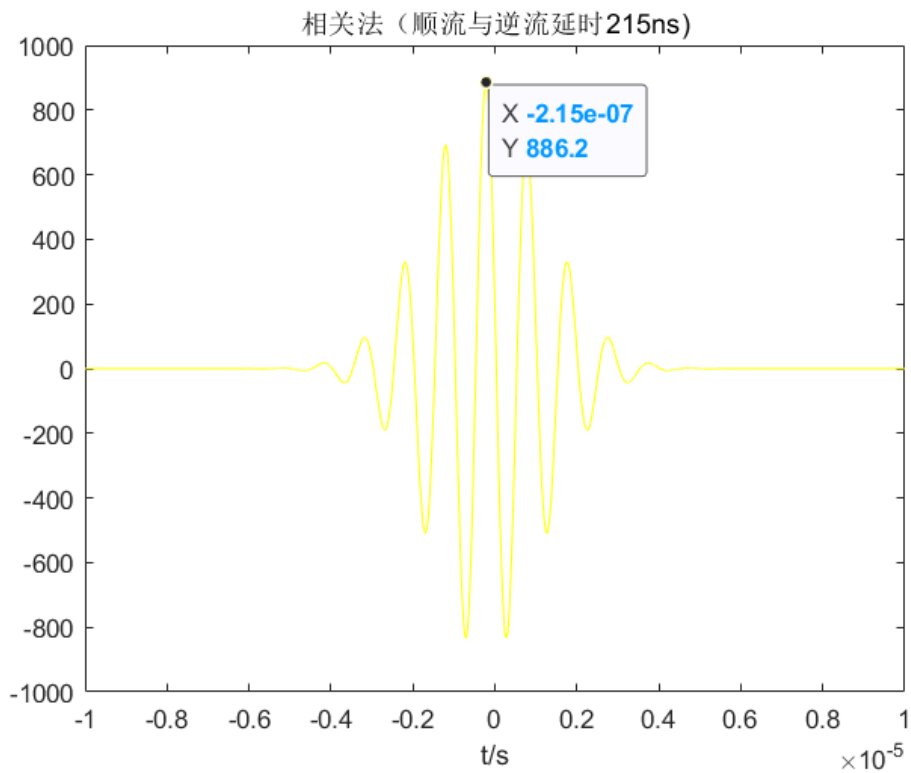
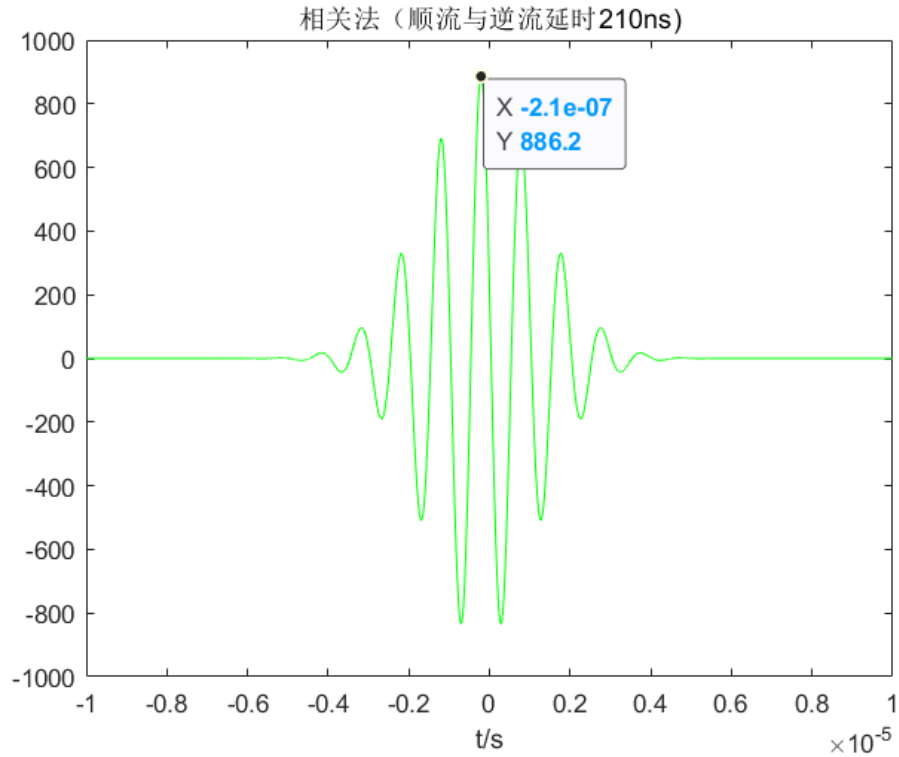
放大后查看：



- 3) 时差法超声波流量计实际信号处理过程即根据顺流信号 s_{12} 及逆流信号 s_{21} 估计二者间的时差然后计算流量，采用 1) 及 2) 中产生的顺流及逆流信号，利用相关法估计 s_{12} 和 s_{21} 间的时差。

【答】





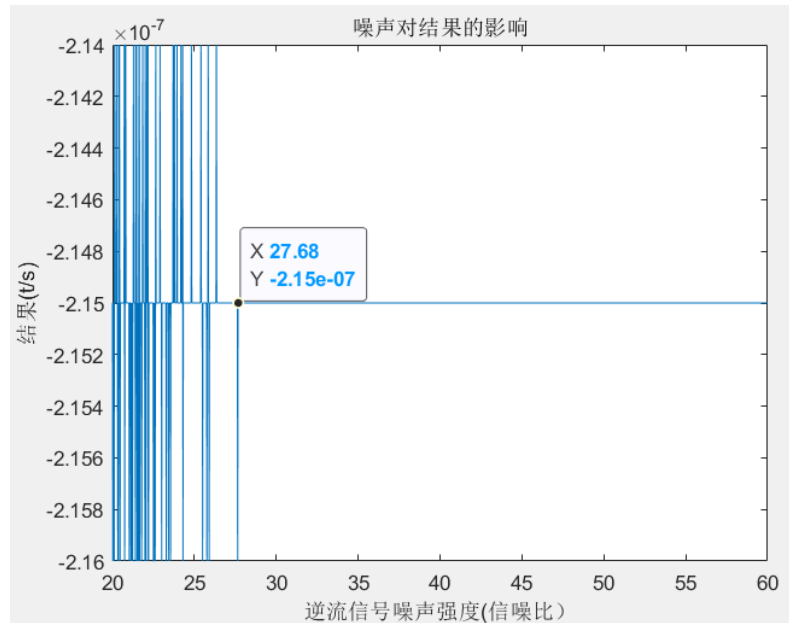
由图可得通过相关法可以准确求得两个信号的时间差。

- 4) 实际过程中在对顺流及逆流信号进行采样时必然会引入测量噪声（来自流体本身或电子测量系统），在 1) 及 2) 中产生的顺流及逆流信号上加入不同强度的噪声（以信噪比分别为 20, 40, 50, 60dB 左右为例），利用相关法估计 s_{12} 和 s_{21} 间的时差，

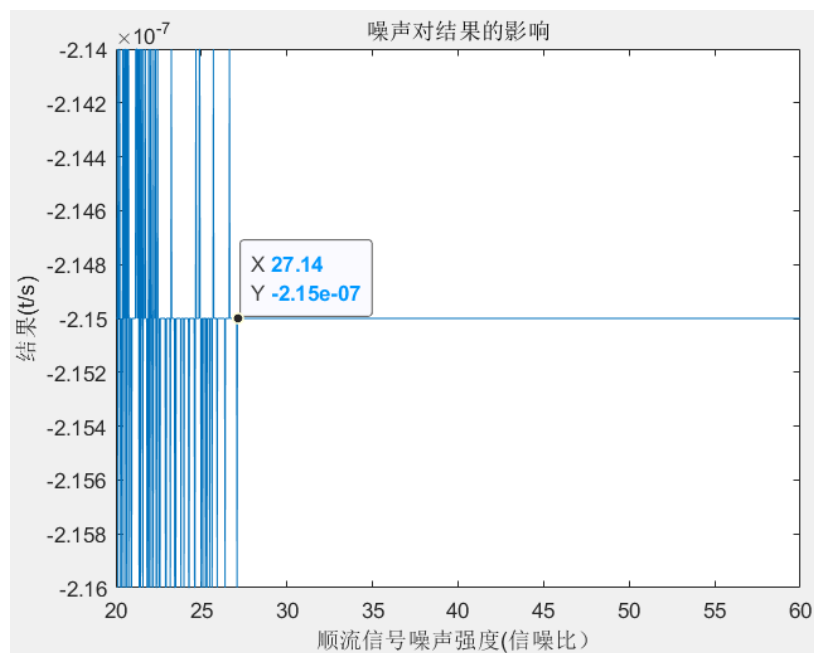
并研究噪声对时差估计的影响。（提示：噪声可以采用 randn 函数产生随机误差序列加入到信号序列中来模拟，噪声的强度可以由 randn 产生的随机序列的方差控制）。

【答】这里以延时 215ns 的逆流信号为例，使用 awgn() 函数，在 20dB~60dB 的区间内等间隔取了 2000 个信噪比的值来为顺逆流信号添加噪声，分为下面四种情况：

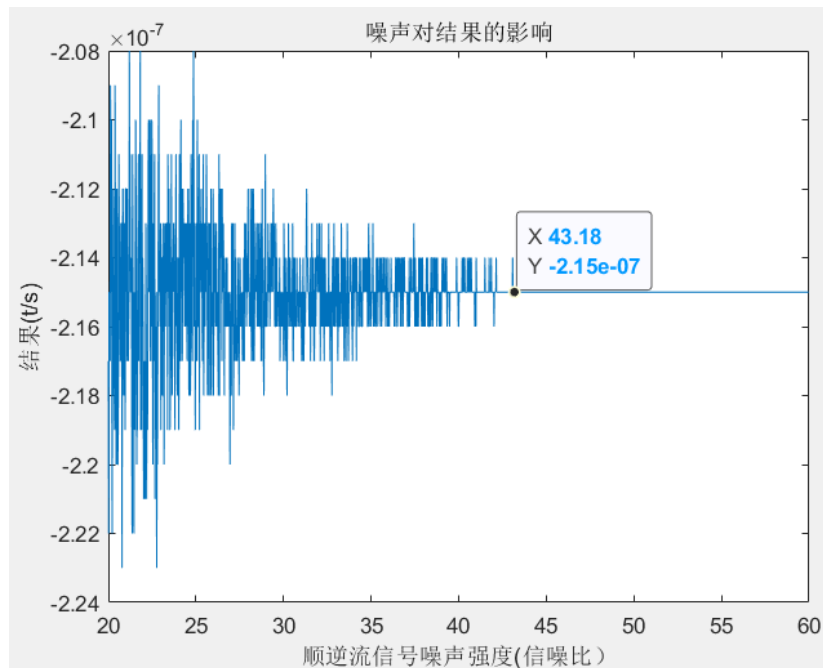
（1）顺流信号不加噪声逆流信号加噪声：



（2）顺流信号加噪声逆流信号不加噪声：

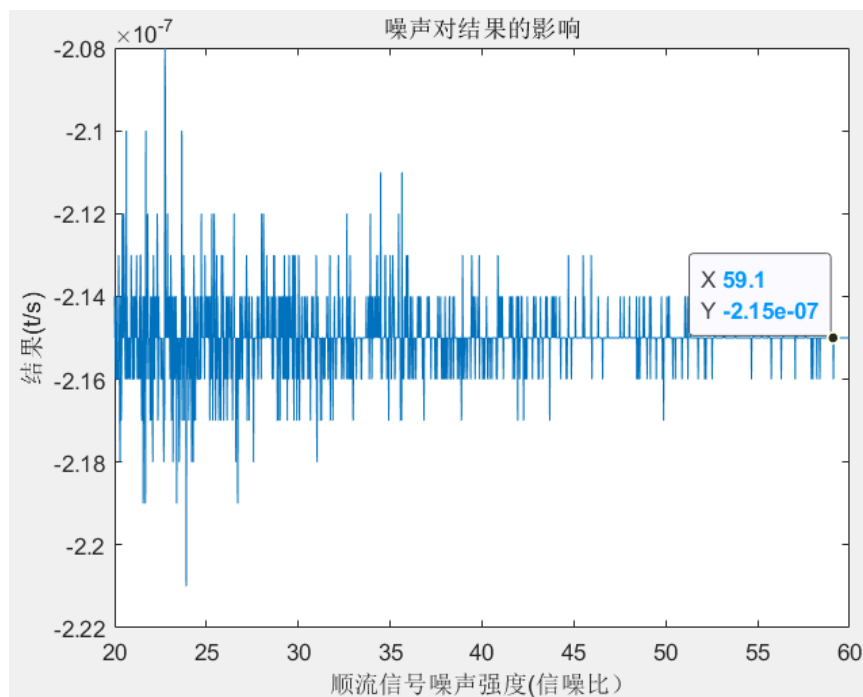


（3）顺逆流信号加相同强度噪声：



(4) 顺逆流信号加不同强度噪声：

这里顺流信号信噪比为 2000 个取值依序递增，逆流信号信噪比则为 2000 个取值的随机乱序。



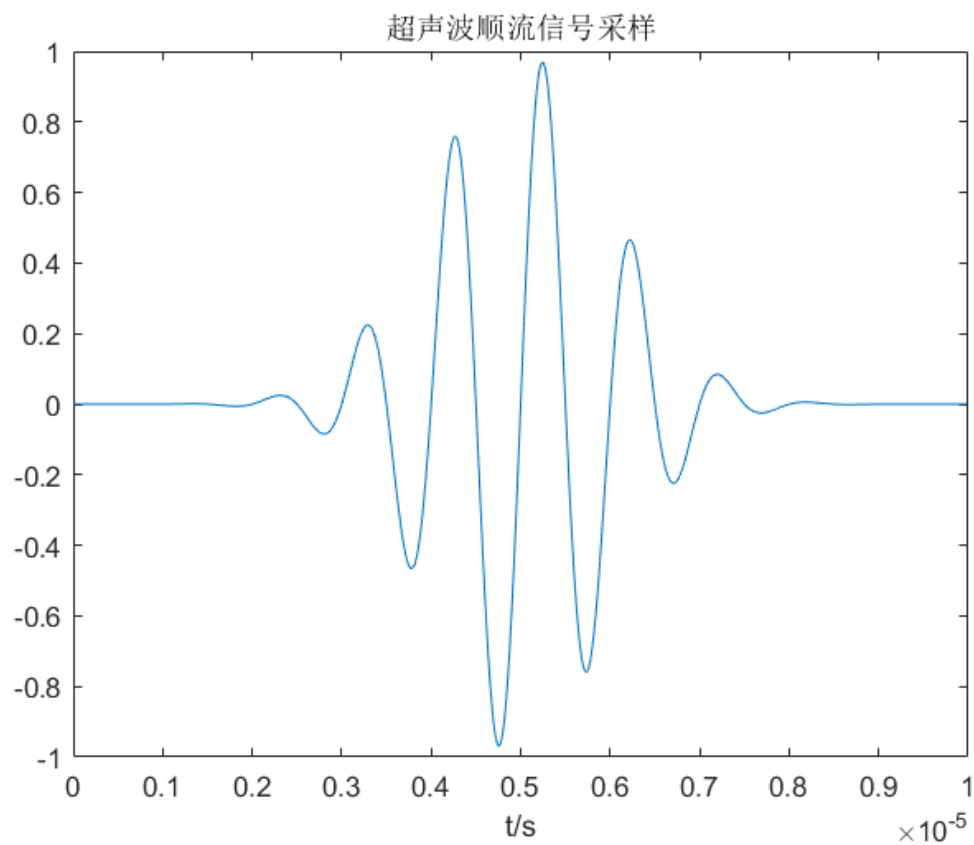
由上面四张图分析可知不管是对于顺流还是逆流数据，噪声越大则测量误差越大。

5) 在设计时差法超声波流量测量实际系统时，由于考虑到成本等因素，用于顺流信号 s_{12} 及逆流信号 s_{21} 采样的 A/D 转换器的采样频率不可能太高，若信号采样频率为 50MHz，重新考虑问题 1) ~4) 并重点考虑获得更准确的时差估计的算法及测量噪

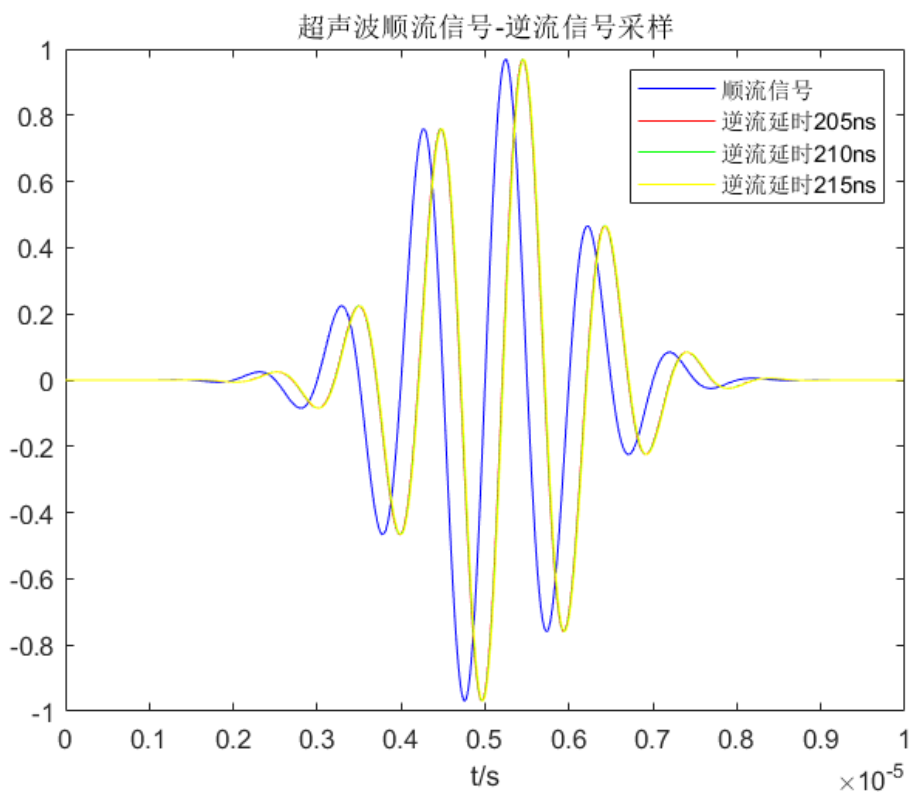
声对时差估计算法的影响。（提示：重点考虑当时差不等于采样周期的整数倍时如何准确估计出时差。采样频率为 50MHz 时 s_{12} 和 s_{21} 互相关函数相邻 2 点间的时间间隔为 1 个采样周期即 20ns, s_{12} 和 s_{21} 间时差不等于 20ns 的整数倍时如何获得准确的时差估计）

【答】

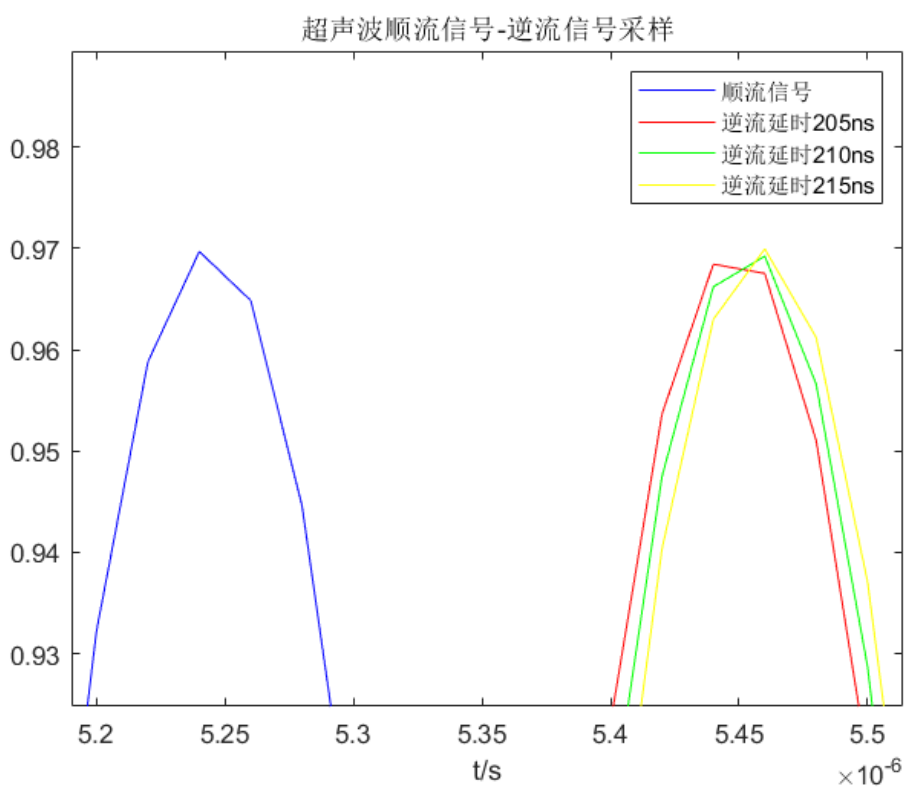
① 采样频率设为 50MHz 后顺流信号：



② 逆流信号：



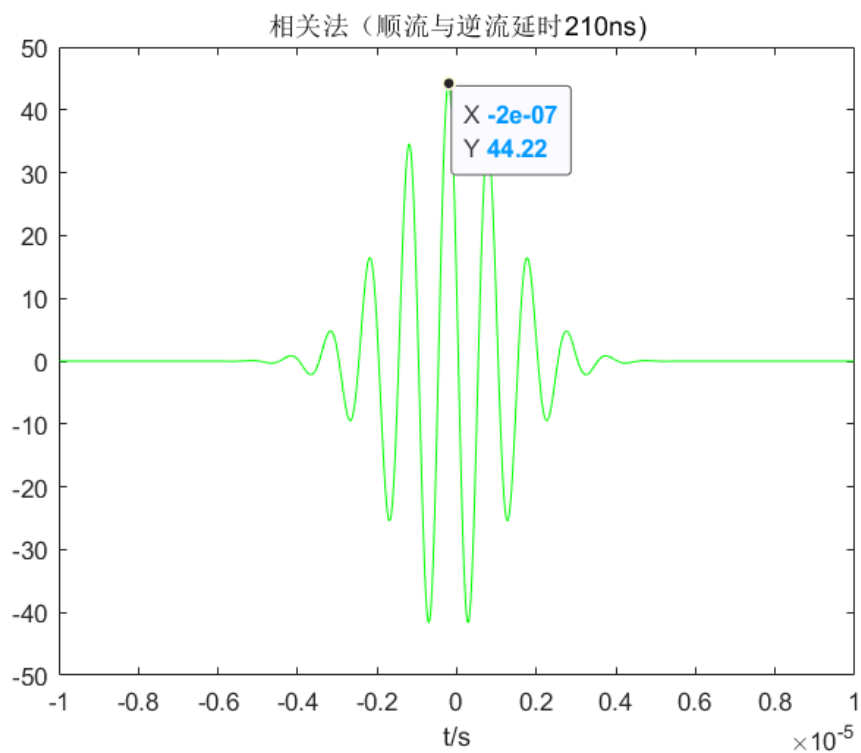
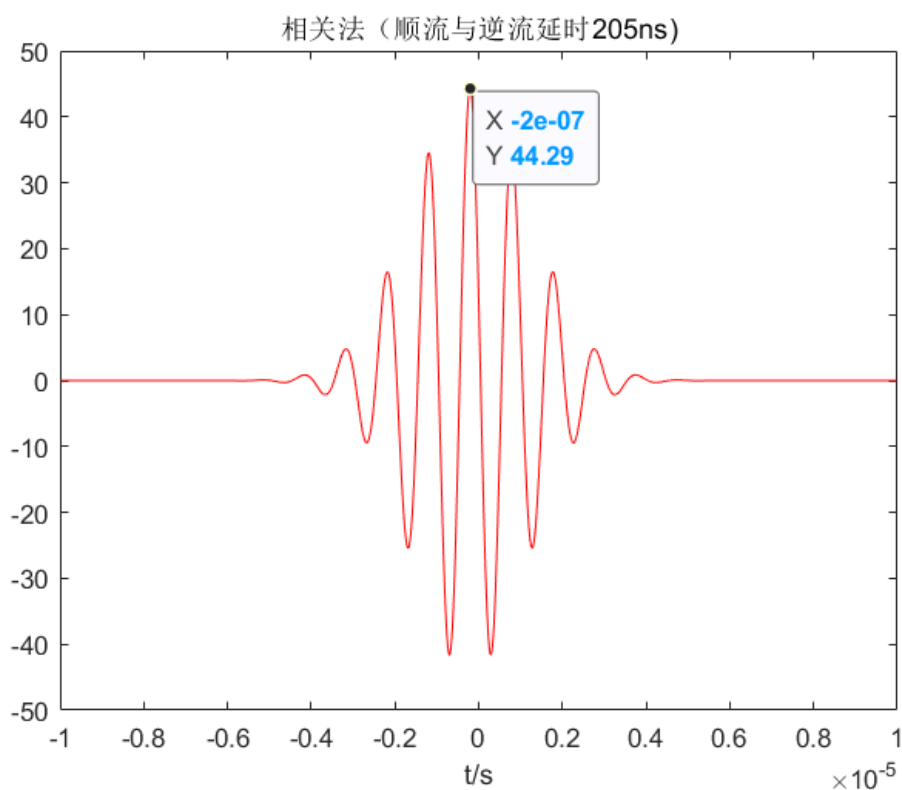
放大后查看:

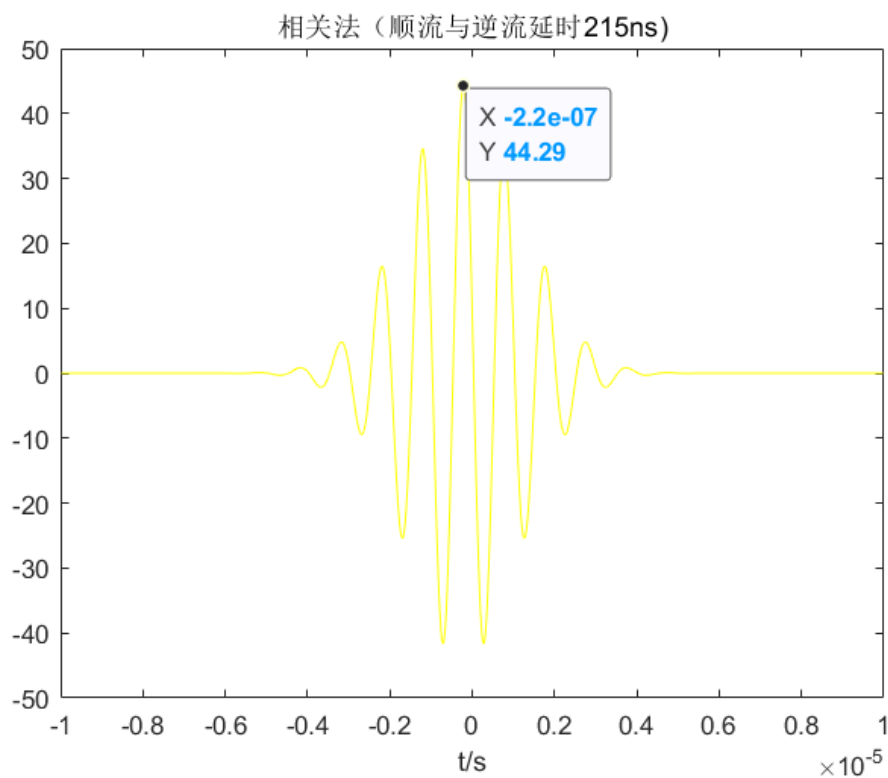


可以注意到由于采样频率的下降，信号波形变得不够光滑了，出现了明显的折线。

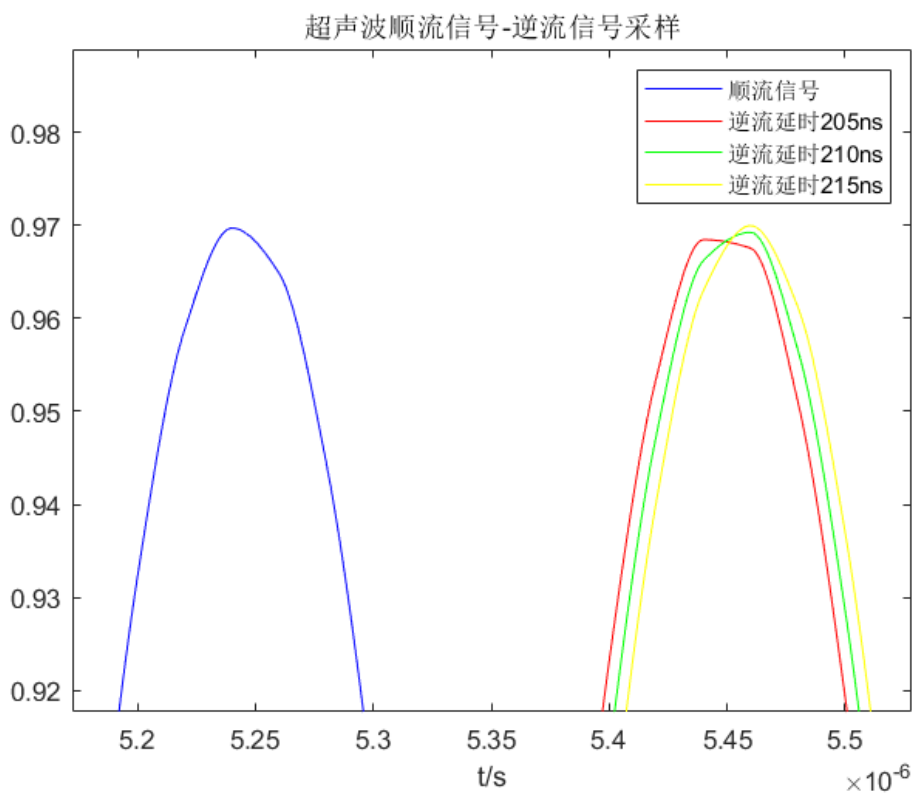
③ 计算时差:

由题可知，如果保持之前的计算方法，得到的时间差将是采样周期 20ns 的整数倍，但真实的时间差并不是 20ns 的整数倍，这将导致较大误差：

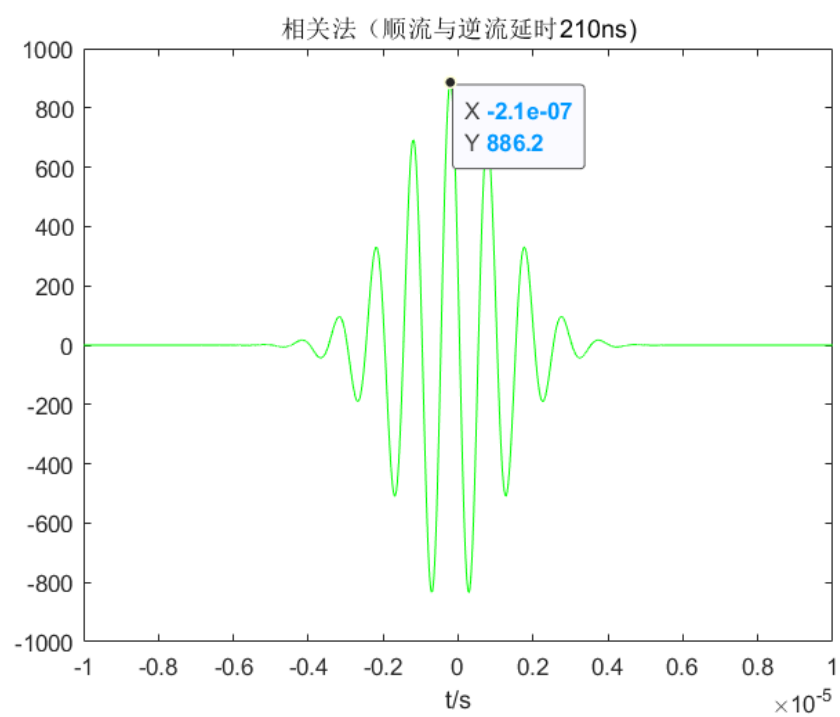
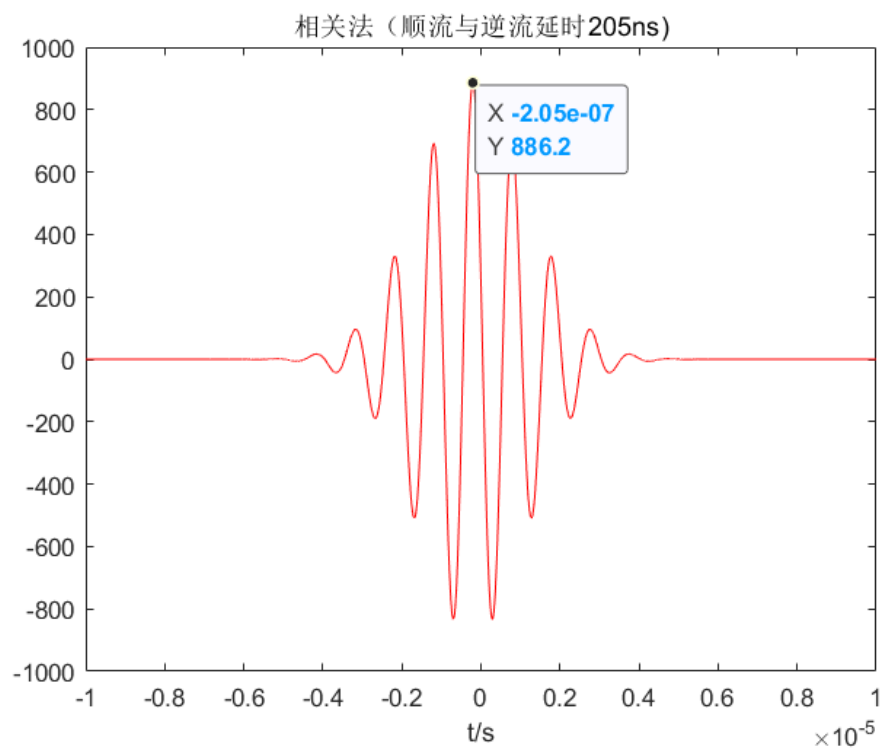


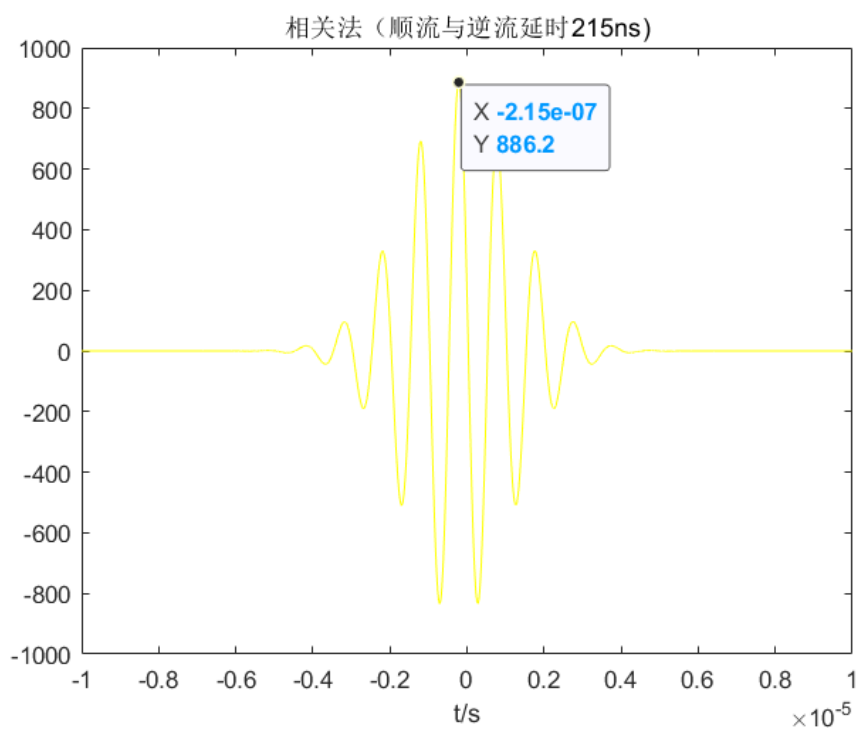


为了改进结果，对降低了采样频率后的数据进行插值处理，选用二次插值方法插值到原采样频率，得到如下曲线，可见插值后变光滑了：



再进行相关性分析得到：





④ 按照(4)中的方法对顺逆流信号施加不同强度的噪声后再插值并进行相关运算得到：

