

# 基于 FFT 的波形甄选程序

段宇丞

专业班级：泰山学堂物理取向

---

## 摘要

光速不变原理致使基于激光多普勒效应的流体流速测量应用甚广，但在读取图像时往往因为缺乏有效判据而使图像甄选甚为困难，即使由人眼勉强选出图像，也往往由于误差太大致使所计算流速并不可信。本文在激光多普勒测速原理的基础上，结合 LabVIEW 优秀的实时测量数据处理能力，采用 FFT 技术开发了一个阈值可调的波形甄选程序，用于实时甄选实验波形，减小因人眼误差而造成的结果不确定性。

**关键词：**激光多普勒 FFT 波形 阈值

---

## 一、引言

1842 年奥地利人多普勒 (J.C.Doppler) 指出：当波源和观察者彼此接近时，收到的频率变高；而当波源和观察者彼此远离时，收到的频率变低。这种现象称为多普勒效应，可用于声学、光学、雷达等与波动有关的学科。不过，应该指出，声学多普勒效应与光学多普勒效应是有区别的。在声波中，决定频率变化的不仅是声源与观察者的相对运动，还要看两者哪一个在运动。声速与传播介质有关，而光不需要传播介质，不论光源与观察者彼此相对运动如何，光相对于光源或观察者的速率相同。因此，光学多普勒效应有更好的应用价值。1960 年代初激光技术兴起，由于激光优良的单色性和定向性及高强度，激光多普勒效应可以用来进行精密测量。

1964 年两个英国人 Yeh 和 Cummins 用激光流速计测量了层流管流分布，开创了激光多普勒测速技术。激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimeter, LDV)，是利用激光多普勒效应来测量流体或固体速度的一种仪器。由于它大多用于流体测量方面，因此也被称为激光多普勒风速仪 (Laser Doppler Anemometer, LDA)。也有称做激光测速仪或激光流速仪 (Laser Velocimeter, LV) 的。1970 年代便有产品上市，1980 年代中期随着微机的出现，电子技术的发展，技术日趋成熟。在剪切流、内流、两相流、分离流、燃烧、棒束间流等各复杂流动领域取得了丰硕的成果。激光测速在涉及流体测量方面，已成为产品研发不可或缺的手段。

但实验室级的多普勒测速装置主题框架简单，并没有适当的波形甄选和计算设备，本文针对此问题进行了创新研究。

## 二、实验原理

### 2.1 多普勒信号的产生

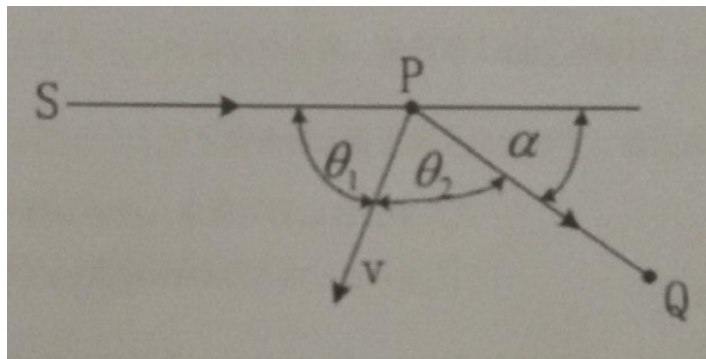


图 1 多普勒信号的产生

如图 1 所示，由光源  $S$  发出频率为  $f$  的单色光，被速度为  $v$  的粒子 (如空气中的一粒细小的粉尘)  $P$  散射，其散射光被  $Q$  点的探测器接收。由于多普勒效应，粒子  $P$  接收到的光频率为

$$f' = \frac{f}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta_1 \right) \quad (1)$$

式中  $c$  为光速。同样由于多普勒效应，在  $Q$  点所接收的粒子  $P$  的散射光频率为

$$f'' = \frac{f' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta_2} \quad (2)$$

那么  $Q$  点接收的频率为

$$\Delta f = f'' - f' = \frac{fv}{c} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (3)$$

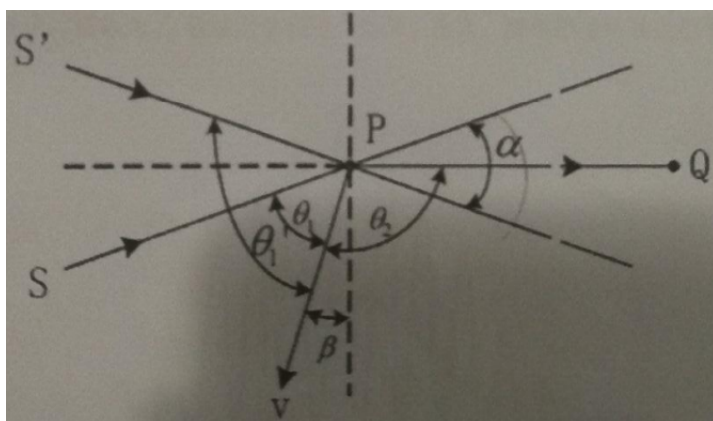


图 2 双光路多普勒信号的产生

如果粒子  $P$  以速度  $v$  进入两束相干光  $S$  和  $S'$  的交点, 并在  $Q$  点接收散射光, 如图 2 所示, 由于  $S$  和  $S'$  是方向不同的两束光, 在  $Q$  点将产生两种接收频率。对光束  $S$  的频率差同式 (3), 对于光束  $S'$  的频率差为

$$\Delta f' = \frac{fv}{c}(\cos \theta'_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

最后得到两种频率之差

$$f_D = \Delta f - \Delta f' = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos \beta \quad (5)$$

其中  $\lambda$  是相干光的波长,  $f_D$  是多普勒信号频率。在一定光路条件下,  $\frac{2}{\lambda} \sin(\frac{\alpha}{2})$  是一个常数, 于是式 (5) 可写成

$$f_D = \alpha \cos \beta \cdot v \quad (6)$$

其中  $\alpha$  是光机常数。可见, 当  $\beta$  为定值时 (粒子运动方向不变),  $f_D$  与粒子速度成正比关系。因此, 只要测量出  $f_D$  就可以得到速度  $v$ 。

这种用两束光相交于测量点的 LDV 方式称为双光束 LDV 或差动 LDV, 是一维流场测量最常用的方法。

## 2.2 $f_D$ 信号的接收

为使问题简化, 设  $\beta$  为 0, 即粒子运动方向与两束光夹角平分线垂直, 见图 2。注意到光路的对称, 两束光在  $Q$  点散射光的角频率差, 由式 (4) 和 (5) 可知  $\Delta\omega' = -\Delta\omega$ 。在两束光功率相等时,  $Q$  点的接收光强分别为

$$E_1 = E_0 \cos[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi_1] \quad (7)$$

$$E_2 = E_0 \cos[(\omega + \Delta\omega')t + \varphi_2] \quad (8)$$

其中  $\omega$  为相干光的角频率。光敏探测器, 如 APD(雪崩光敏二极管) 的输出电流与入射光强成正比。探测器的输出电流为

$$I(t) = kE^2 = k(E_1 + E_2)^2 \quad (9)$$

其中  $k$  为表征探测器灵敏度的系数。将式 (7) 和 (8) 代入 (9), 整理后

$$\begin{aligned} I(t) = kE_0^2 [1 + \cos(2\Delta\omega t + \varphi_1 - \varphi_2) + \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \\ \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\Delta\omega t + 2\varphi_1) + \frac{1}{2} \cos(2\omega t - 2\Delta\omega t + 2\varphi_2)] \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 光电流  $I(t)$  应由直流分量、差额项  $2\Delta\omega$ 、倍频项  $2\omega$  频率成分组成。但是由于探测器能够输出的光电流信号远远低于相干光的频率, 因此在光电流  $I(t)$  中只能出现差频项  $2\Delta\omega$  和直流分量。探测器输出的光电流为

$$I(t) = kE_0^2[1 + \cos(2\Delta\omega t + \varphi_1 - \varphi_2)] \quad (11)$$

根据上式即可测量出多普勒信号频率  $f_D$ , 得到粒子的速度。

由于激光束横截面上光强为高斯分布, 粒子只有进入两光束相交的区域才能产生散射, 一个粒子的信号波形如图 3 所示。前面所说的直流分量实际上是一个低频分量, 由图中的虚线表示。频率为  $f_D$  的波叠加到这个低频分量上, 波形的包络线近似高斯曲线。

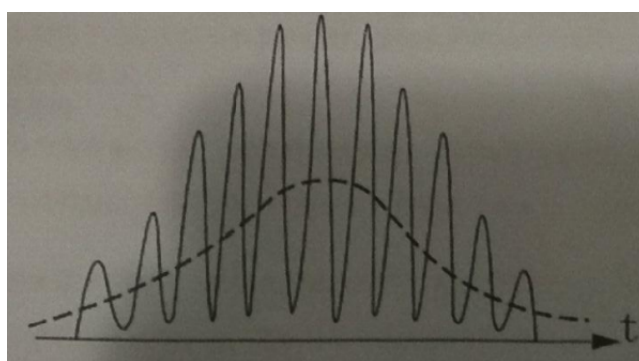


图 3 一个粒子产生的波群

但在实际应用中, 由于线路噪声、杂散光线以及流体流速不稳等因素, 往往无法得到稳定、完好的波形, 这就需要从瞬变的示波器波形中甄选出恰当的、具有较单一频率的波形。实验室惯常使用的方法是直接观察甄选波形, 但这样做误差过大而又费时费力, 甄选出的波形往往差强人意。

### 三、利用 LabVIEW 进行波形甄选

LabVIEW 软件中提供了多种波形处理函数, 可以利用这些函数编程进行自动处理数据。我们编写的波形甄选程序前面板如图 4 所示, 其中 VIEA resource name 为个人电脑 USB 接口、Source 为示波器输出通道、Timeout 为相邻采样时间间隔、Probe Attenuation 为波形放大倍数、Serial Configuration 为稳定性组件、STOP 为停止运行控件、Max\_frequency 为最优频率、Max\_Amplitude 为最优频率相应的 Fourier 振幅、Waveform Data 展示输入波形、FFT Result 展示快速 Fourier 变换后的波形、Threshold value 设置相应的下降比例阈值、 $\Delta F/T$  表示与阈值相应的峰宽度、Path result 指定 Array of good results 的储存路径、Path 2 指定甄选出的较优结果储存路径、head topics 指定甄选结果名称、unit 指定甄选结果的相应单位、Initial Value 给定初值、T 指定时间、Good result 展示甄选出的较优结果、Size of array 展示 Array of good results 的大小、Format of picture 指定图片格式、

Path 展示图片路径。

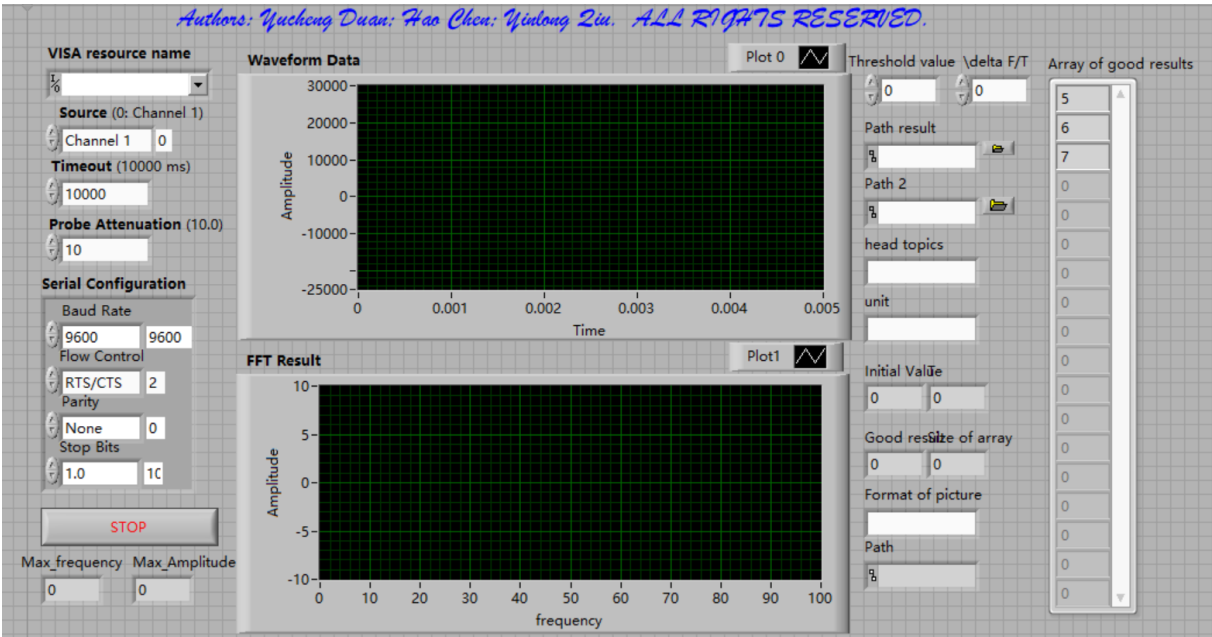


图 4 数据处理前面板

相应的甄选后面板程序如图 5 所示，

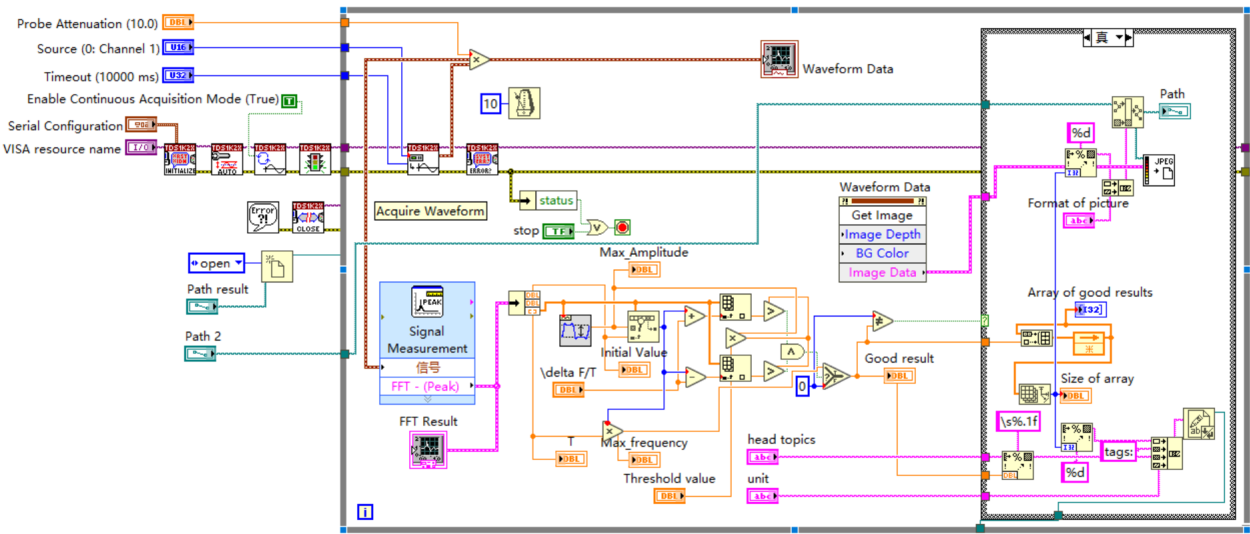


图 5 后面板程序

本甄选程序主要思路来源于图 3，为获得误差较小的实验结果，显然，我们需要甄选出附加在高斯光束上的差频信号尽量单一的波形，这点仅靠肉眼观察难免产生较大误差。借助 Fourier 变换观点，我们可以在频域空间考虑此问题，很明显，若接收到的时域波形频率成分足够单一，则其 Fourier 变换后的频域波形应该呈现非常尖锐的单峰，这可通过峰的锐度 (即阈值/波形下降到此阈值时的宽度) 来衡量，由此即可发展出整个程序。

Probe Attenuation (10.0) DBI

Source (0: Channel 1) UI6

Timeout (10000 ms) U32

Enable Continuous Acquisition Mode (True) T

Serial Configuration DBI

VISA resource name I/O

TDS1K2X INITIALIZE

TDS1K2X AUTO

TDS1K2X

TDS1K2X

TDS1K2X

TDS1K2X

10

Scope

图 6 波形输入模块

如图 6 所示为波形输入的模块，该模块负责从示波器的选定通道上每隔一个采样间隔读取一个波形。

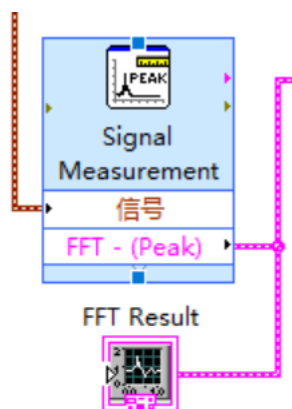


图 7 FFT 模块

如图 7 所示为 FFT 模块，该模块负责将输入波形快速 Fourier 变换之后输出到下一级并输出该频域波形。

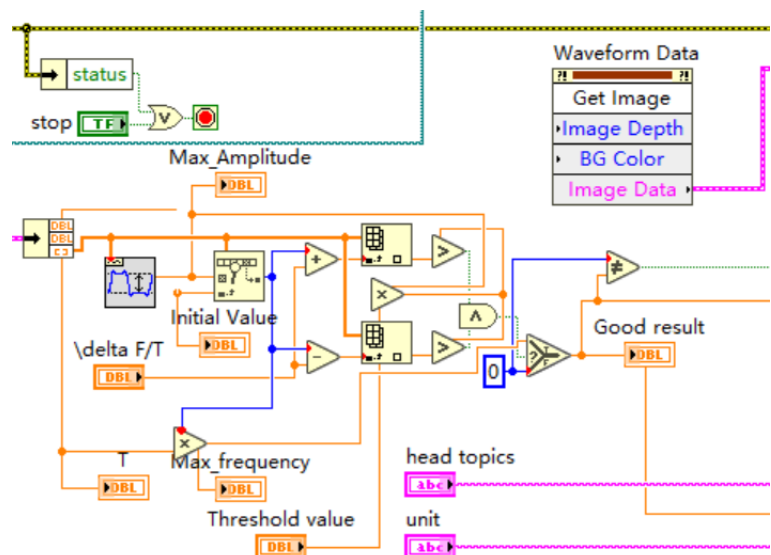


图 8 波形甄选模块

如图 8 所示为本程序波形甄选模块，该模块负责读取上一级 FFT 的输出结果，然后通过比较选出最高峰，计算峰的锐度并判断峰是否达标，若达标 (尖峰锐度够高) 则输出该波形并标识波形可用，否则标识该波形不可用。

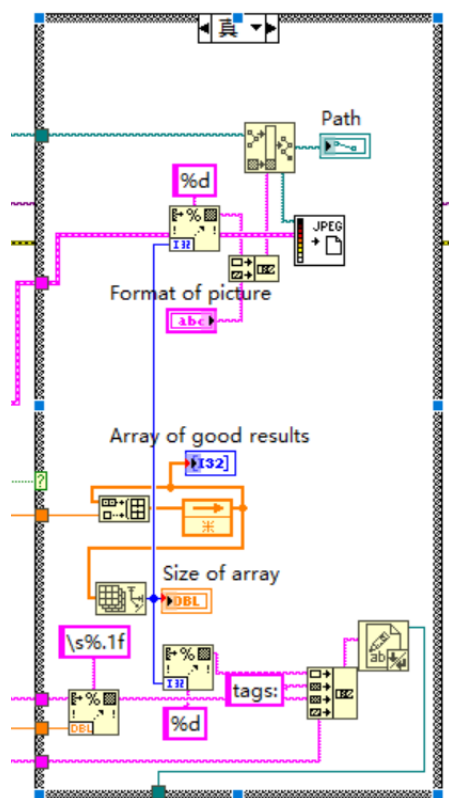


图 9 输出模块

如图 9 所示为本程序主体输出模块，该模块负责输出甄别结果。



有了该程序的甄别结果，即可方便合理地计算出  $f_D$  从而得出流体流速。根据所选阈值还能简单估计出所测值的误差。

#### 四、实验结果

实时操作后，程序运行效果良好，如图 10 所示，当信号符合判断条件时，“Result”一栏中将显示此信号峰频，并被录入右方的数据栏。

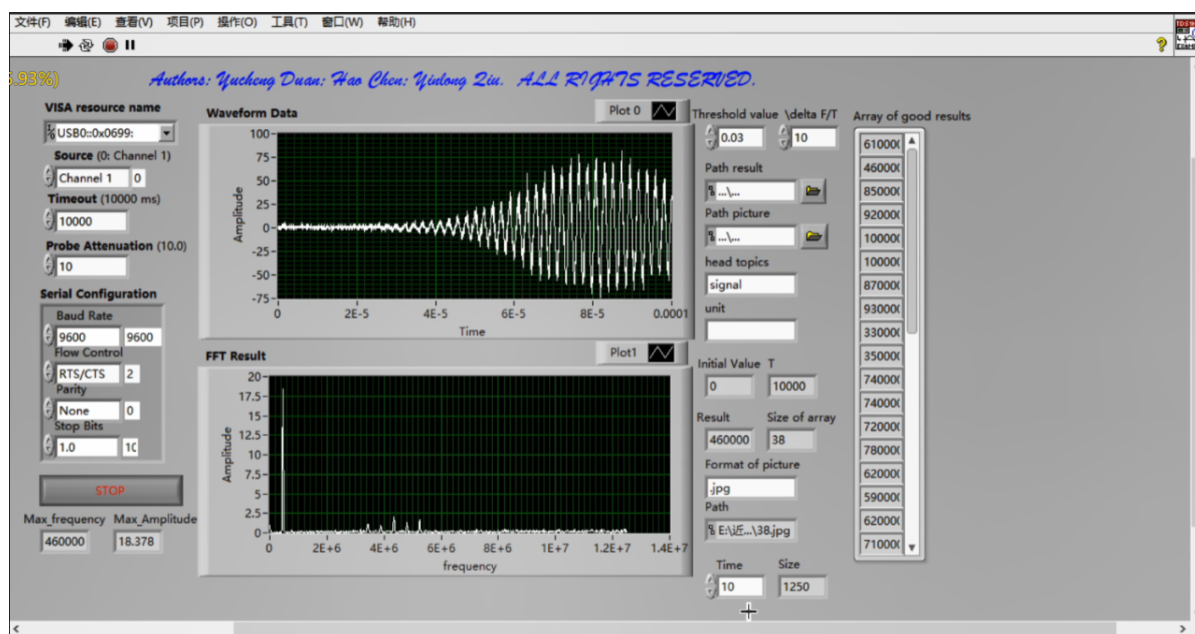


图 10 单频性好的波形

如图 11 所示，单频性差的波形未被选中，此时“Result”一栏中为空。

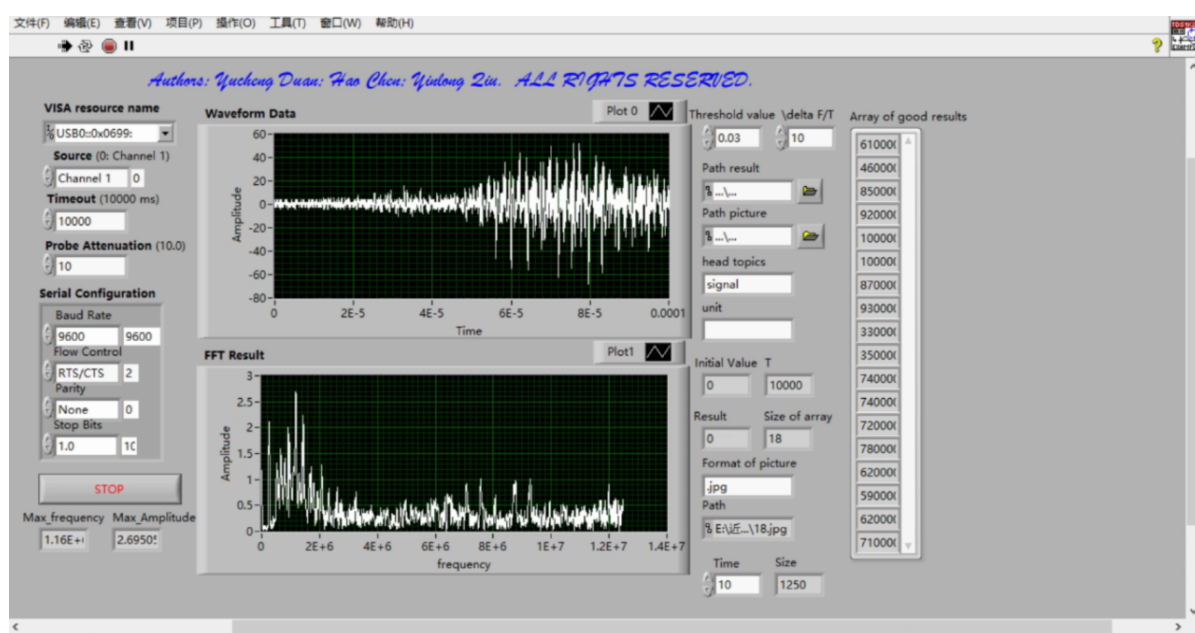


图 11 单频性差的波形



## 五、对流速分布的分析

在实验过程中，我们发现同一流速场测出的频率存在一定不同，故猜想这是否是由于麦克斯韦分布律导致的。如果是的话，则频率的分布应为类高斯曲线。所以，我们对同一个流速场采样 5 分钟，得到一系列频率数据：

```
0tags:signal 610000.0Hz
1tags:signal 460000.0Hz
2tags:signal 850000.0Hz
3tags:signal 920000.0Hz
4tags:signal 1000000.0Hz
5tags:signal 1000000.0Hz
6tags:signal 870000.0Hz
7tags:signal 930000.0Hz
8tags:signal 330000.0Hz
9tags:signal 350000.0Hz
10tags:signal 740000.0Hz
11tags:signal 740000.0Hz
12tags:signal 720000.0Hz
13tags:signal 780000.0Hz
14tags:signal 620000.0Hz
15tags:signal 590000.0Hz
16tags:signal 620000.0Hz
17tags:signal 710000.0Hz
18tags:signal 580000.0Hz
19tags:signal 480000.0Hz
20tags:signal 550000.0Hz
21tags:signal 670000.0Hz
22tags:signal 1110000.0Hz
23tags:signal 1040000.0Hz
24tags:signal 620000.0Hz
25tags:signal 710000.0Hz
```

图 12 优秀频率的记录

对这些频率使用 MATLAB 进行遴选，记录每个数据出现的频次，结果如下：

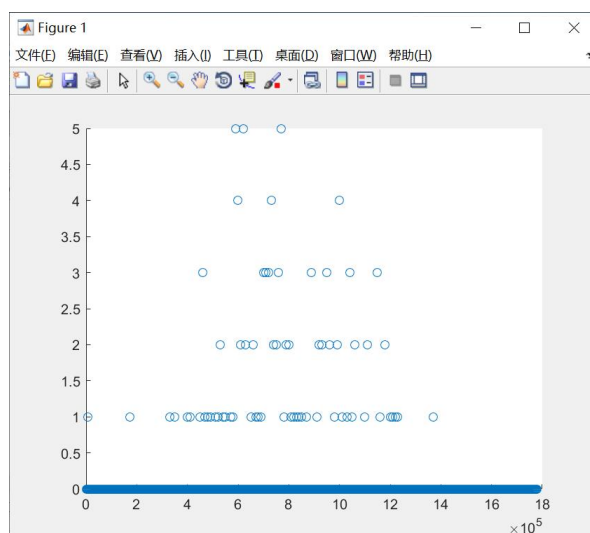


图 13 频率分布图

如图可见频率的分布大致为高斯曲线。证明流场速率分布有弥散性，算平均速度时可以近似取中心频率计算。

## 六、结束语

本实验中，利用 LabVIEW 编写的波形甄选程序，不仅减少了人为因素引起的误差，使测量结果的精度大大提高，还给出了可自由设置地波形甄选标准，并由此进一步估计计算误差，大大提高了本实验的科学严谨性。

多次电脑采集数据使得可以分析频率分布，使得我们可以使用中心频率代表流场速度。

## 参考文献

[1] 吉淑娇, 商微微, 雷艳敏. LabVIEW 程序设计与应用 [M]. 清华大学出版社, 2010, 1-189.