

## MSP430FR604x 超声波液体流量计量算法详解

Charles Zhao

North West China AA2 Team

### 摘要

MSP430FR604x 中集成了超声波前端 USS 模块。利用 USS 模块内部集成的高速 ADC 记录超声波在液体中上行回波和下行回波的波形，可通过算法精确得到超声波传播的 dTOF 和 absTOF 值，从而可精准得到液体瞬时流量。本文详细介绍了 MSP430FR604x USS 算法库中，通过 ADC 采样波形计算 dTOF 和 absTOF 算法的原理及其 Python 语言实现，以使用户更好地理解 MSP430FR604x 通过超声波测量液体流量的算法。

### 目录

1	基于TOF的液体流量测量算法介绍.....	2
2	相对飞行时间dTOF计算.....	4
3	绝对飞行时间absTOF计算.....	8
4	小结.....	10
	参考文献.....	12

### 图例

图 1	基于TOF 的超声波流量测量方法.....	2
图 2	USS模块及回波波形采样.....	3
图 3	离散序列相关运算计算过程.....	4
图 4	相关运算提取时间差示意图.....	4
图 5	插值运算提高dTOF计算精度.....	5
图 6	水管实测结果计算dTOF示意图.....	6
图 7	absTOF计算步骤.....	9
图 8	USS算法库软件框图.....	11

## 1 基于 TOF 的液体流量测量算法介绍

本文将详细介绍在 MSP430FR604x 中实现的基于飞行时间(Time of Flight, TOF)的高精度超声波液体流量测量算法。使用基于 TOF 的超声波测量液体流速的方法如图 1 所示。

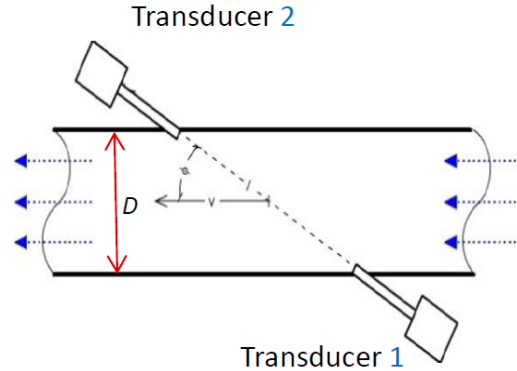


图 1 基于 TOF 的超声波流量测量方法

超声波在换能器 1 和换能器 2 之间的传播时间受到管道内液体流速  $v$  和声速  $c$  的影响。记超声波从换能器 1 传播到换能器 2 的时间为  $T_{12}$ （上行），从换能器 2 传播到换能器 1 的传播时间为  $T_{21}$ （下行），换能器与水管夹角为  $\phi$ ，两个换能器之间的距离为  $l$ ，可以推出：

$$T_{12} = \frac{l}{c + v \cos \phi}$$

$$T_{21} = \frac{l}{c - v \cos \phi}$$

由于声速会受到温度等因素影响，从  $T_{12}$  和  $T_{21}$  并不能直接得出准确的液体流速。对上式简单整理可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{L}{T_{12}} - c &= c - \frac{L}{T_{21}} = v \cos \phi \\ v &= \frac{L}{2 \cos \phi} \cdot \frac{T_{21} - T_{12}}{T_{21} T_{12}} \end{aligned}$$

此时对流速的测量就不会受到声速变化的影响。记水管直径为  $D$ ，单位时间内液体瞬时流量  $Q$  可以表示为：

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v = \frac{\pi D^2 L}{8 \cos \phi} \cdot \frac{T_{21} - T_{12}}{T_{21} T_{12}} = \text{pipe related constant} \cdot \frac{T_{21} - T_{12}}{T_{21} T_{12}}$$

除与管道有关参数组成的常数外，通过对  $T_{12}$  和  $T_{21}$  以及两者的差值的测量就可以得知管道内的瞬时流量。其中  $T_{12}$  和  $T_{21}$  被称为绝对飞行时间 (absTOF)， $\Delta T = T_{21} - T_{12}$  被称为相对飞行时间 (dTOF)。

以声速  $c=1473\text{m/s}$ 、水速  $v=1\text{m/s}$ 、 $l=0.1\text{m}$ 、 $f=30^\circ$  为例：

$$T_{12} = \frac{L}{c + v\cos(\theta)} = \frac{0.1}{1473 + 1\cos(30^\circ)} = 67.85\mu\text{s}$$

$$T_{21} = \frac{L}{c - v\cos(\theta)} = \frac{0.2}{1473 - 1\cos(30^\circ)} = 67.93\mu\text{s}$$

$$\Delta T = T_{21} - T_{12} = 79.83\text{ns}$$

假定 dTOF 是由分别测量两个  $T_{12}$  和  $T_{21}$  作差得来。若  $T_{12}$  测量时产生了万分之一，即 6.8ns 的偏差，dTOF 的值则会偏移 6.8ns 产生 8.5% 的误差，直接导致瞬时流量的测量结果产生 8.5% 的误差。所以仅测量绝对飞行时间  $T_{12}$  和  $T_{21}$  不能精确测得管道内的瞬时流量。

MSP430FR604x 中集成了超声前端 USS 模块。USS 模块中包括可产生不同频率脉冲的 PPG (Programmable Pulse Generation)、换能器驱动物理层接口、-6.5dB 至 30.8dB 可编程增益放大器 (PGA, Programmable Gain Amplifier) 以及 12 位高速、高性能 8M 采样率 Sigma-Delta ADC (SDHS)。如图 2 所示，无需额外的信号调理电路，USS 模块可以产生激励直接驱动超声波换能器，利用集成的高速 ADC 记录上行回波采样序列 UPS[n] 和下行回波采样序列 DNS[n]，继而通过算法精确得到 dTOF 和 absTOF 的值。相比于传统 TDC 方法，精度更好、系统集成度更高。

本文后续章节将详细介绍 MSP430FR604x 中实现的基于上下行回波的 ADC 采样波形精确提取 dTOF 和 absTOF 的算法。

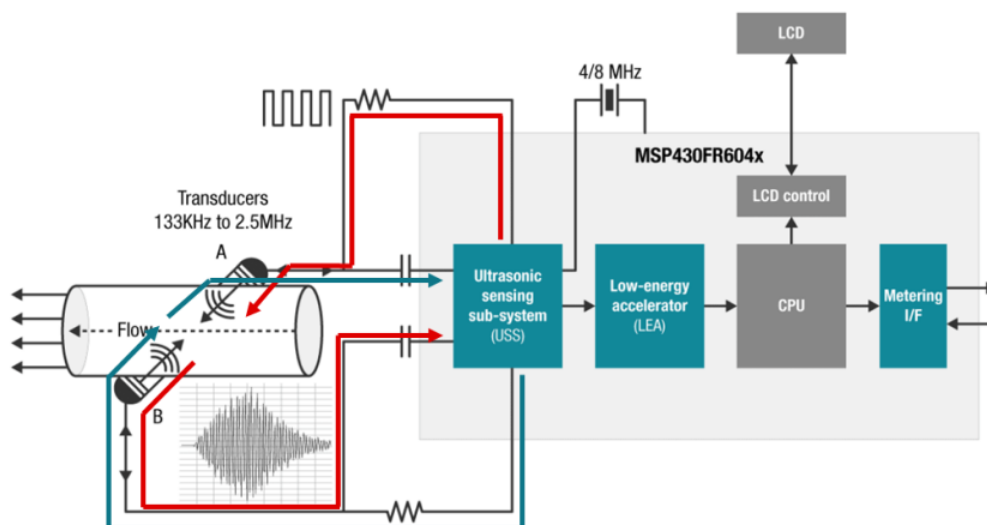


图 2 USS 模块及回波波形采样

## 2 相对飞行时间 dTOF 计算

相对飞行的时间的精度对于流量测量的精度至关重要。FR604x 中通过相关(Correlation)运算获取上行回波和下行回波 ADC 采样波形的时间差。相比于 TDC 算法，相关运算的抗干扰能力更好。

对于两个信号  $x(t)$ 、 $y(t)$  和其采样之后的信号  $x[n]$ 、 $y[n]$ ，相关运算的计算方法如下：

$$\text{Corr}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt, \text{ 连续信号}$$

$$\text{Corr}[m] = \sum_{-\infty}^{+\infty} x[n]y[n - m], \text{ 离散信号}$$

以  $x[n] = [1, 0, 3]$   $y[n] = [-1, 2, 0]$  为例， $x[n]$  和  $y[n]$  的相关运算过程如下图所示：

m	-2					
x[n]			1	0	3	
y[n-m]	-1	2	0			
x[n]y[n-m]			0			
Corr[m]	0					

m	-2	-1				
x[n]			1	0	3	
y[n-m]		-1	2	0		
x[n]y[n-m]			2	0		
Corr[m]	0	2				

m	-2	-1	0			
x[n]			1	0	3	
y[n-m]			-1	2	0	
x[n]y[n-m]			-1	0	0	
Corr[m]	0	2	-1			

m	-2	-1	0	1		
x[n]			1	0	3	
y[n-m]				-1	2	0
x[n]y[n-m]				0	6	
Corr[m]	0	2	-1	6		

m	-2	-1	0	1	2		
x[n]			1	0	3		
y[n-m]					-1	2	0
x[n]y[n-m]						-3	
Corr[m]	0	2	-1	6	-3		

图 3 离散序列相关运算计算过程

相关运算可以理解为在时域上不断地移动  $y[n]$ ，去计算不同时间偏移量  $m$  下  $x[n]$  波形与  $y[n]$  波形的匹配程度，两个波形越匹配，相关运算结果的值越大。如图 4 蓝线所示，如果  $x[n]$  和  $y[n]$  的波形一致， $y[n]$  比  $x[n]$  延迟  $k$  个采样点，则相关运算结果  $\text{Corr}[m]$  在  $m=-k$  的时候取到最大值。相关运算的好处在于其抗噪能力。因为噪声与目标波形的相似程度极低，所以即使有噪声叠加在  $x[n]$  和  $y[n]$  上，其对相关运算结果的影响远小于目标波形对相关运算结果的影响。从图 4 的黄线也可以看出，当  $x[n]$  和  $y[n]$  在受到噪声干扰产生了一定失真的情况下，相关运算仍可以准确找到两个信号之间的偏移量。

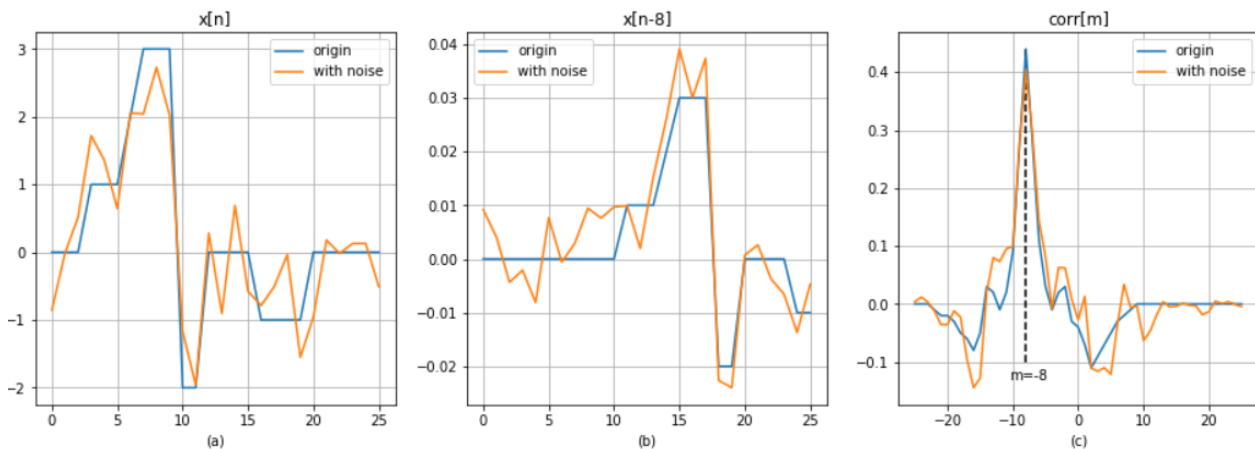


图 4 相关运算提取时间差示意图

对于上行回波序列  $UPS[n]$  和下行回波序列  $DNS[n]$ ，两者波形完全一致，由于液体流速导致两个回波存在时间差  $dTOF$ 。因此，可对  $UPS[n]$  和  $DNS[n]$  进行相关运算，找到两者的时间差，用于准确提取  $dTOF$  的值。

在相关运算的基础上，还可以通过插值的方法进一步提高相对时间差的计算精度。考虑如下情况，信号  $x(t)$  和其时延 3.37 秒的信号  $x(t-3.37)$  可表示为：

$$x(t) = 0.02(t - 8)^2 + 1.5$$

$$x(t - 3.37) = 0.02(t - 11.37)^2 + 1.5$$

对  $x(t)$  和  $x(t-3.37)$  以 1Hz 频率进行采样得到  $x[n]$  和  $x[n-3.37]$  如下图(a)和(b)所示：

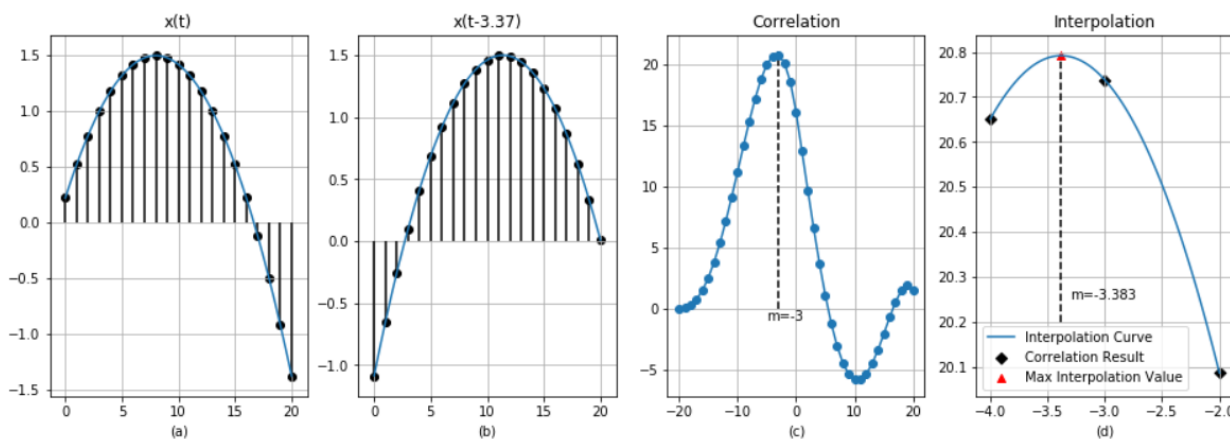


图 5 插值运算提高  $dTOF$  计算精度

如(c)所示，计算  $x[n]$  和  $x[n-3.37]$  的相关，可以看到  $m=-3$  时相关结果最大，即得到的  $dTOF$  为 3s，与真实值 3.37s 还有 11.0% 的误差。此时计算出的离散相关运算结果序列，等同于对与两个原始连续信号相关运算之后再以同样的采样率进行采样。所以此相关运算结果序列的最大值，并不一定是真实相关运算结果的最大值。

为提升  $dTOF$  的计算精度，如(d)所示，可对相关结果的最大值点及其相邻两点进行插值，找到真实相关运算结果波形最大值点的时延，作为最终的  $dTOF$  结果。插值方式包括二次插值、余弦插值等等。超声波换能器的发送和接收波形在实际应用中接近幅度在变化的单频正弦波，所以上下行回波的相关运算结果也是幅度在变化的单频正弦波，采用余弦插值可以最准确地找到两个信号之间的时间差。因此在 FR604x 液体流量计量算法  $dTOF$  测量中加入了余弦插值算法。图 4 中可以看到，余弦插值之后  $dTOF$  计算结果变为了 3.383s，误差显著减小到了 0.4%。

综上所述，FR604x 基于 ADC 采样波形计算相对飞行时间的过程如下：

- (1) USS 模块发射上行激励脉冲并采样得到回波序列  $UPS[n]$
- (2) USS 模块发射下行激励脉冲并采样得到回波序列  $DNS[n]$
- (3) 计算  $UPS[n]$  和  $DNS[n]$  的相关结果：

$$\text{Corr}[m] = \sum_{-\infty}^{+\infty} \text{UPS}[n] \text{DNS}[n - m]$$

(4) 找到  $\text{Corr}[m]$  的最大值点索引  $m'$ :

$$m' = \text{argmax}(\text{Corr}[m])$$

(5) 对  $\text{Corr}[m'-1]$ ,  $\text{Corr}[m']$ ,  $\text{Corr}[m'+1]$  进行余弦插值, 找到插值后极值点对  $m'$  的偏移量  $\delta$ :

$$\omega = \cos^{-1}\left(\frac{\text{Corr}[m' - 1] + \text{Corr}[m' + 1]}{2\text{Corr}[m']}\right)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Corr}[m' - 1] - \text{Corr}[m' + 1]}{2\text{Corr}[m']\sin(\omega)}\right)$$

$$\delta = -\frac{\varphi}{\omega}$$

(6) 计算 dTOF:

$$\text{dTOF} = -\frac{m + \delta}{\text{sample\_rate}}$$

图 6 展示了利用 MSP430FR6047 EVM 在水管零流量下实测的上下行回波数据计算相关运算结果的示意图。

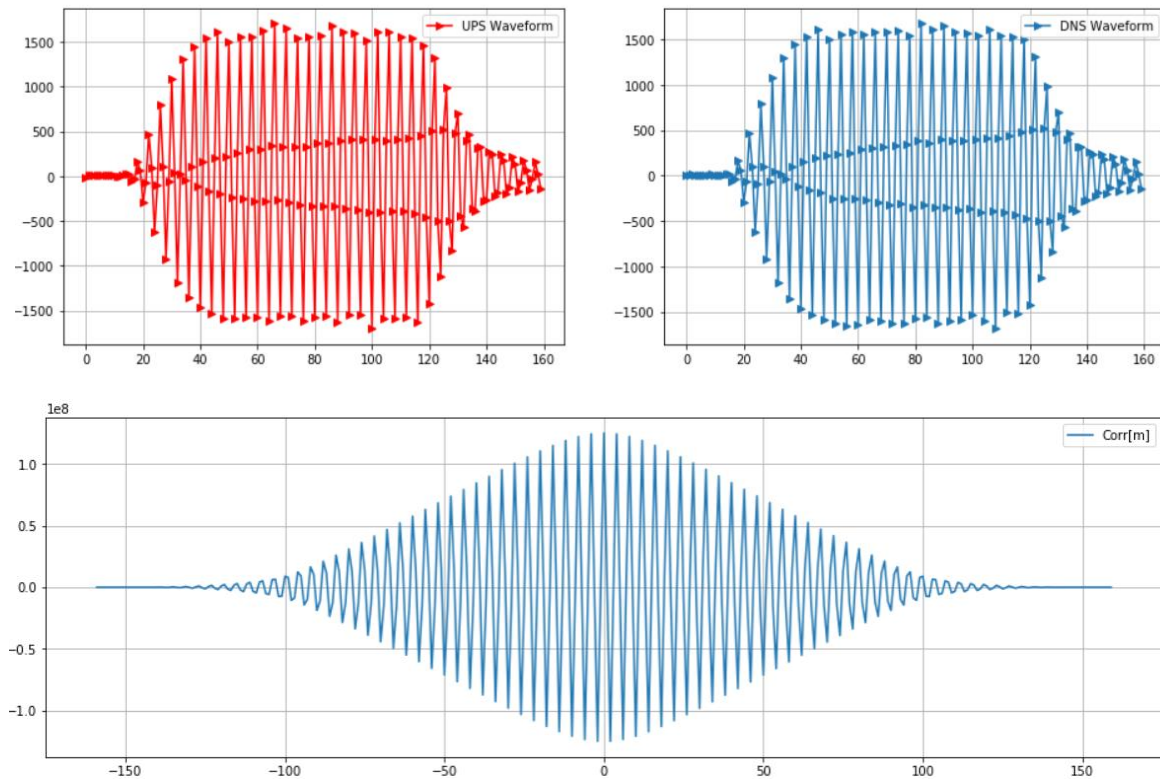


图 6 水管实测结果计算 dTOF 示意图

为了更好地展示算法思路，本文还完成了 MSP430FR604x 超声波液体流量计量算法的 Python 语言实现，并可直接读取上位机软件 USS Design Center 生成的.csv 波形文件计算 dTOF 和 absTOF。特别需要说明的是，Python 实现只是为了展现算法思路，与 USS 软件算法库的内部实现仍有区别。

dTOF 部分的 Python 实现如下：

```

1. # 数组元素右移 n 位，空白补零
2.
3. def Shift(xn, n):
4.     if n == 0:
5.         return xn
6.     elif n >= 0:
7.         return np.concatenate((np.full(n, 0.), xn[:-n]))
8.     else:
9.         return np.concatenate((xn[-n:], np.full(-n, 0.)))
10.
11. # 相关运算
12. # xn, yn: 为输入信号序列
13. # corr_result: 相关运算结果
14. # corr_index: 相关运算结果索引
15.
16. def Correlation(xn, yn):
17.
18.     len_x = len(xn)
19.     len_y = len(yn)
20.
21.     # 计算输出信号长度
22.     len_out = len_x + len_y - 1
23.
24.     # 初始化输出
25.     corr_result = np.zeros(len_out)
26.     corr_index = np.zeros(len_out)
27.
28.     # 中间变量
29.     x_expand = np.zeros(len_x + 2 * (len_y - 1))
30.     y_expand = np.zeros(len_x + 2 * (len_y - 1))
31.
32.     x_expand[(len_y - 1) : (len_y - 1 + len_x)] = xn
33.     y_expand[0 : len_y] = yn
34.
35.     # 计算相关
36.     for i in range(len_out):
37.
38.         # 计算 xn 与移位后 yn 的点积
39.         corr_result[i] = np.sum(x_expand * y_expand)
40.         corr_index[i] = i - len_y + 1
41.
42.         # y 序列移位
43.         y_expand = Shift(y_expand, 1)
44.
45.     return corr_index, corr_result

```



### 3 绝对飞行时间 absTOF 计算

在发出一系列的激励脉冲后，换能器接收到的回波波形的包络一般呈纺锤形。采用合理的配置参数和系统设计，可以使特定激励的回波信号幅值在最大回波信号幅值的一定比例内波动 (e.g. 第二个激励的回波的信号幅值在回波信号最大幅值的 20% 左右小范围波动)。FR604x 中就是利用了这一特性计算上行回波采样序列 UPS[n] 和下行回波采样序列 DNS[n] 的绝对飞行时间。

以 UPS 为例，FR604x 基于 ADC 采样波形计算 absTOF 的过程如下：

#### (1) 插值找到每个激励回波的峰值：

与上节介绍的余弦插值原理相同，对回波信号的采样序列进行插值，可以准确找到每个激励回波信号的峰值点。absTOF 的计算需要对所有的回波都进行插值。余弦插值虽然准确，但是其中大量三角函数计算不利于算法高速且低功耗地实现。为了减少插值的计算量，absTOF 的计算过程中使用的是二次插值。

对于任意三点(a, f(a)), (b, f(b)), (c, f(c))，满足  $a < b < c$  且  $f(b) \geq f(a)$  且  $f(b) \geq f(c)$ ，则有唯一抛物线 q 通过三点：

$$q(x) = f(a) \frac{(x-b)(x-c)}{(a-b)(a-c)} + f(b) \frac{(x-c)(x-a)}{(b-c)(b-a)} + f(c) \frac{(x-a)(x-b)}{(c-a)(c-b)}$$

q(x) 达到极值点时的 x 可表示为：

$$x_{max} = b + \frac{1}{2} \frac{[f(a) - f(b)](c-b)^2 - [f(c) - f(b)](b-a)^2}{[f(a) - f(b)](c-b) + [f(c) - f(b)](b-a)} = b + \delta$$

故插值的第一步是遍历 ADC 采样序列，找到所有 i 满足  $UPS[i] \geq UPS[i-1]$  且  $UPS[i] \geq UPS[i-1]$ 。然后再对 UPS[i-1], UPS[i], UPS[i+1] 进行插值。此时上述计算公式可简化为：

$$\delta = \frac{UPS[i-1] - UPS[i+1]}{2(UPS[i-1] - 2UPS[i] + UPS[i+1])}$$

$$q(b + \delta) = \frac{1}{2} UPS[i-1] \delta(\delta - 1) - UPS[i] (\delta - 1)(\delta + 1) + \frac{1}{2} UPS[i+1] \delta(\delta + 1)$$

#### (2) 找到回波最大幅值

记插值之后，回波峰值点组成的序列为  $Lobe_{max}[i]$ 。有回波的最大幅值：

$$UPS_{max} = \max(Lobe_{max}[i])$$

#### (3) 设定阈值

这一步的目的是使用回波最大幅值的一定比例作为检测某一特定激励回波的阈值。为了保证 absTOF 测量的准确性，激励回波及阈值的选取可以考虑几点：

- 该激励回波的幅值相对于回波最大幅值的比例相对固定



- 该激励回波处于回波幅值上升速度最快的区间内，以便和前后两个回波做区分

$$threshold = \eta UPS_{max}$$

(4) 找到离阈值最近的波峰点

假定算法锁定的回波是第  $k$  个激励脉冲的回波。在设定好阈值之后，遍历  $Lobe_{max}[i]$  找到距离阈值最近的回波幅值的索引  $ik$ ，即可认为此时找到的回波就是第  $k$  个激励脉冲的回波，绝对飞行时间：

$$absTOF = t_{adc\_delay} + \frac{i_k + \delta_{ik}}{f_{sample}} - constant$$

如图 7 所示，absTOF 的计算步骤如下：

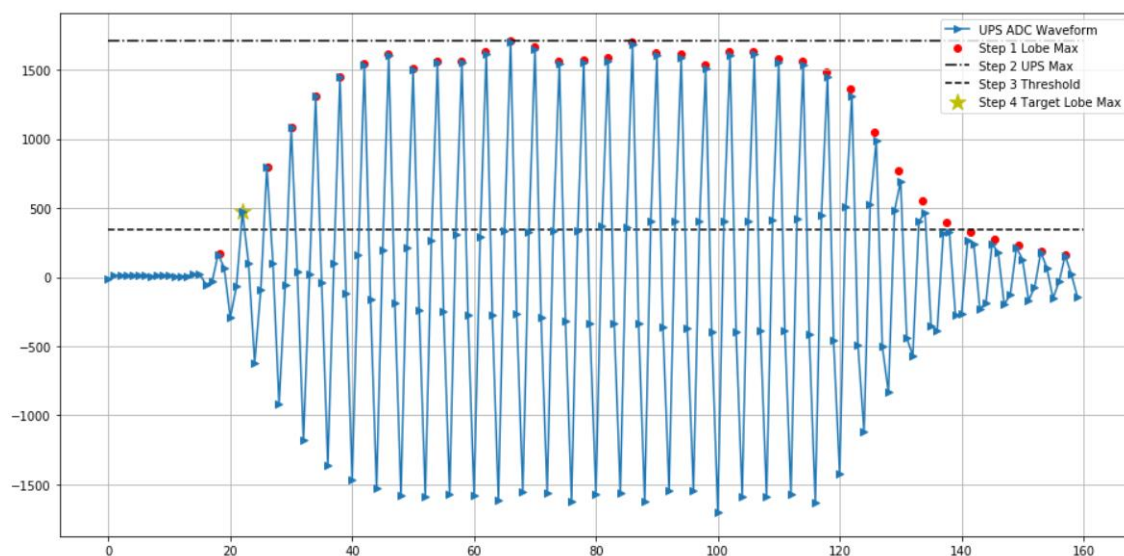


图 7 absTOF 计算步骤

absTOF 计算的 Python 实现如下：

```

1. # 二次插值
2. # y = [x, y, z]
3. # y[0] <= y[1] >= y[2]
4.
5. def ParabolicInterpo(y):
6.     delta = (y[0] - y[2]) / 2 / (y[0] + y[2] - 2 * y[1])
7.     lobe_max = 0.5 * y[0] * delta * (delta - 1) - y[1] * (delta -
8.     1) * (delta + 1) + 0.5 * y[2] * delta * (delta + 1)
9.     return delta, lobe_max

```

```

1. # 通过插值从 ADC 采样信号中找到波峰点
2. lobe_max = [] # 插值之后的波峰点
3. delta = []
4. wave_max_index_new = []
5.
6. for i in range(len(wave_max_index)):
7.     # 二次插值
8.     delta_tmp, lobe_max_tmp = ParabolicInterpo(UPS[wave_max_index[i] - 1 : wave_max_index[i] + 2])
9.
10.    # 去除换能器起振之前的干扰
11.    if lobe_max_tmp > 50:
12.        lobe_max.append(lobe_max_tmp)
13.        delta.append(delta_tmp)
14.        wave_max_index_new.append(wave_max_index[i])
15.
16. lobe_max = np.array(lobe_max)
17. wave_max_index = wave_max_index_new # 波峰点位置
18. delta = np.array(delta) # 波峰点偏移量

```

```

1. # 找到所有 i 满足 ADC 采样信号 ADC[i-1] <= ADC[i] >= ADC[i+1]
2. def FindWaveMaxIndex(ADC_waveform):
3.     # 变量初始化
4.     ind = [] # 返回索引结果
5.     i = 1
6.     # 遍历采样波形
7.     while i <= len(ADC_waveform) - 1 :
8.         if ADC_waveform[i] >= ADC_waveform[i-1] and ADC_waveform[i] >= ADC_waveform[i+1]:
9.             ind.append(i)
10.            i = i + 2
11.        else:
12.            i = i + 1
13.    return ind
14.
15. # 满足条件的 i 的序列
16. wave_max_index = FindWaveMaxIndex(UPS)

```

## 4 小结

MSP430FR604x 中集成了超声前端 USS 模块，利用内部集成的高速 ADC 记录上行回波采样序列 UPS[n]和下行回波采样序列 DNS[n]，继而通过算法精确得到 dTOF 和 absTOF 的值。相较于 TDC 测量方法，可以更精准的测量瞬时流量，并且排除声速变化对计量的影响。

如图 8 所示，上文中介绍的高精度 dTOF 和 absTOF 计算算法已经在 USS 软件算法库中高性能实现，并预留了丰富的 API 可用于参数配置、后期校准等。用户无需重新设计算法，大大节省了开发成本。本文详细介绍了 MSP430FR604x USS 算法库通过 ADC 采样波形计算 dTOF 和 absTOF 算法的原理及其 Python 语言实现，以使用户更好地理解 MSP430FR604x 测量流量的算法，从而了解应该如何调整相关参数以提高计量精度。

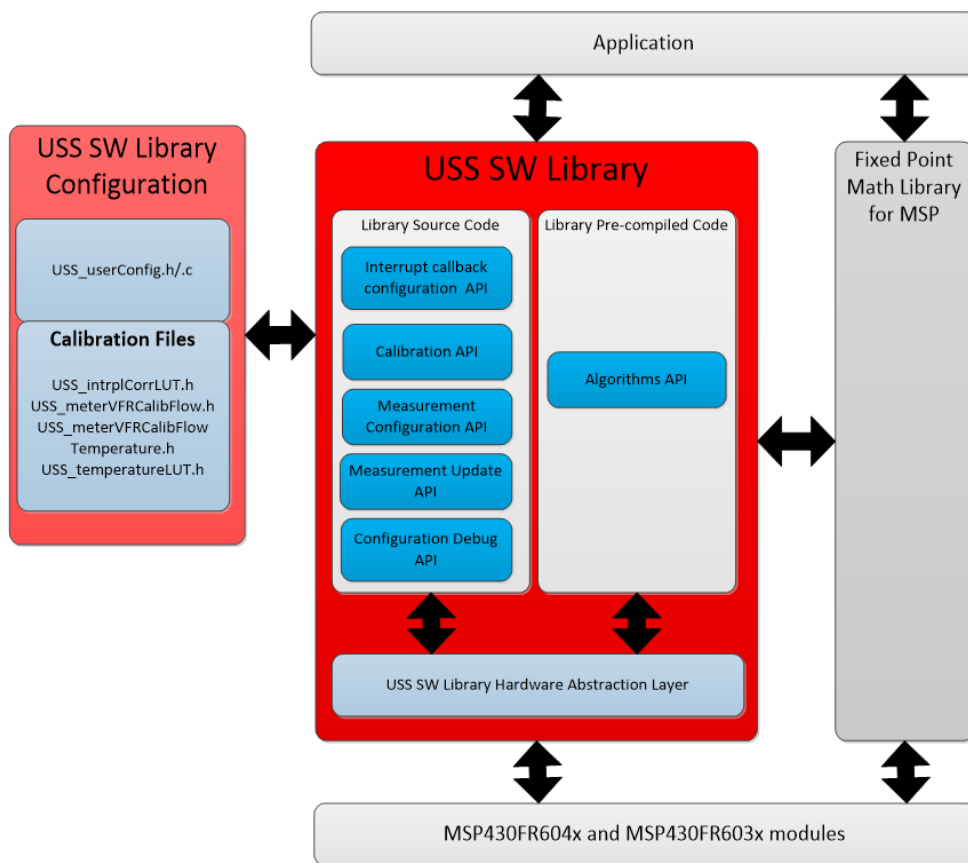


图 8 USS 算法库软件框图

## 参考文献

- [1]. MSP430FR604x(1), MSP430FR603x(1) Ultrasonic Sensing MSP430™ Microcontrollers for Water-Metering Applications. (SLASEB7C)
- [2]. Waveform capture based ultrasonic sensing water flow metering technology. (SLAA889)
- [3]. MSP430Ultrasonic Sensing Library API Reference. [http://software-dl.ti.com/msp430/msp430\\_public\\_sw/mcu/msp430/USSSWLib/USSSWLibWater/latest/exports/USSLib\\_02\\_40\\_00\\_00/docs/API\\_Guide/html/index.html](http://software-dl.ti.com/msp430/msp430_public_sw/mcu/msp430/USSSWLib/USSSWLibWater/latest/exports/USSLib_02_40_00_00/docs/API_Guide/html/index.html)

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn 上或随附TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司