

## Application Note

## 超声波感应解决方案 (USS) 指南



Hao Mengzhen

## 摘要

本应用手册指出了客户基于 MSP430FR604x、MSP430FR600x、MSP430FR504x MCU，使用 USS 驱动程序库实现超声波水表和燃气表应用时的常见问题。

## 内容

1 简介.....	3
2 流量计测量原理.....	4
2.1 ToF 测量算法实现.....	4
2.2 ADC 方法和 TDC 方法之间的区别.....	9
3 适用于 USS 应用的 MSP430 MCU.....	10
3.1 USS 模块.....	10
3.2 USS 和 USS_A 模块之间的差异.....	10
3.3 MSP430 MCU 上的软件实现.....	11
4 硬件设计流程.....	12
4.1 原理图.....	12
4.2 PCB 布局指南.....	15
5 软件设计指南.....	17
5.1 USS 演示项目和相关资源.....	17
5.2 演示项目说明.....	18
6 总结.....	19
7 参考资料.....	19

## 插图清单

图 2-1. 典型流量管.....	4
图 2-2. 波瓣算法.....	5
图 2-3. Hilbert Wide 算法.....	5
图 2-4. 互相关计算.....	6
图 2-5. 在蓝色信号上左滑一个周期的互相关计算.....	7
图 2-6. 在蓝色信号上左滑五个周期的互相关计算.....	7
图 2-7. 互相关插值.....	8
图 2-8. 互相关优化.....	9
图 3-1. USS 方框图.....	10
图 3-2. 计算过程.....	11
图 4-1. MSP430FR5043 MCU 的水表演示的链接器文件差异.....	13
图 4-2. 不带电平转换器的原理图.....	14
图 4-3. 振荡器布局示例.....	15
图 4-4. USS 信号布局示例.....	16
图 5-1. USS 软件资源页面.....	17
图 5-2. 演示项目中的文件.....	18
图 5-3. 演示项目中的属性设置.....	19
图 5-4. 预定义符号.....	19

## 表格清单

表 2-1. 适用于水表和燃气表的测量算法.....	4
----------------------------	---

---

表 3-1. 带 USS 模块的 MSP430 MCU.....	10
----------------------------------	----

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

### 1 简介

以下是本应用手册中介绍的主题：

- 测量理论简介
- 在 MSP430 MCU 上的实现
- 水表和燃气表的硬件设计
- USS 库和演示项目

## 2 流量计测量原理

超声波流量计设计基于 ToF 测量原理。此测量是指信号从发送传感器传输到接收传感器所需的时间。图 2-1 显示了典型的流量管。

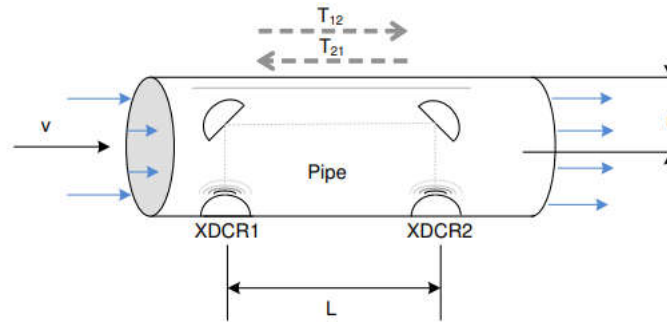


图 2-1. 典型流量管

信号从第一个传感器传输到第二个传感器的传播时间是  $T_{12}$ 。 $T_{21}$  表示以相反方向进行传输的传播时间。根据以下公式计算这些时间，这些时间与气体中的超声波速度和气流速度存在函数关系。此长度远远大于管道半径  $r$ ，因此与气流垂直的波的传播长度在以下分析中忽略不计。

$$T_{12} = \frac{L}{c + v} \quad (1)$$

$$T_{21} = \frac{L}{c - v} \quad (2)$$

$$\Delta t = T_{21} - T_{12} \quad (3)$$

其中：

- $c$  是超声波在介质中的速度。
- $v$  是气流速度。
- $L$  是沿气流的管道传播长度。

使用方程式 1 到方程式 3 得出气流速度 ( $v$ )，无需知道超声波在介质中的速度 ( $c$ ) 即可得出此值。本参考设计在计算气流时，假定超声波速度未知。在本例中，方程式 4 通过方程式 1 和方程式 2 得到，方法是消除  $c$ 。

$$v = \frac{L}{2} \times \left( \frac{1}{T_{12}} - \frac{1}{T_{21}} \right) = \frac{L}{2} \times \left( \frac{T_{21} - T_{12}}{T_{21} \times T_{12}} \right) = \frac{L}{2} \times \left( \frac{\Delta t}{T_{21} \times T_{12}} \right) \quad (4)$$

### 2.1 ToF 测量算法实现

在水表应用中，基于 ADC 估算 absTOF 的方法为波瓣，在燃气表应用中则为 Hilbert Wide，而水表和燃气表的差分 ToF 则基于互相关技术。

表 2-1. 适用于水表和燃气表的测量算法

算法	水表	燃气表
absTOF	波瓣	Hilbert Wide
dTOF	互相关	互相关

#### 2.1.1 absTOF 计算方法 - 波瓣

通过估计水中的准确 absToF，不需要使用温度传感器来计算水中的声速。在本参考设计使用的 USS SW 库中，absToF 通过计算接收信号的包络来确定。

首先计算每个波瓣的峰值。然后，选择最大波瓣峰值。然后确定此最大值的包络交叉阈值给定比率。算法选择接近阈值的波瓣峰值作为 absTOF 测量终点。随后通过此包络交叉阈值的恒定偏移来计算 absToF，如下图所示。

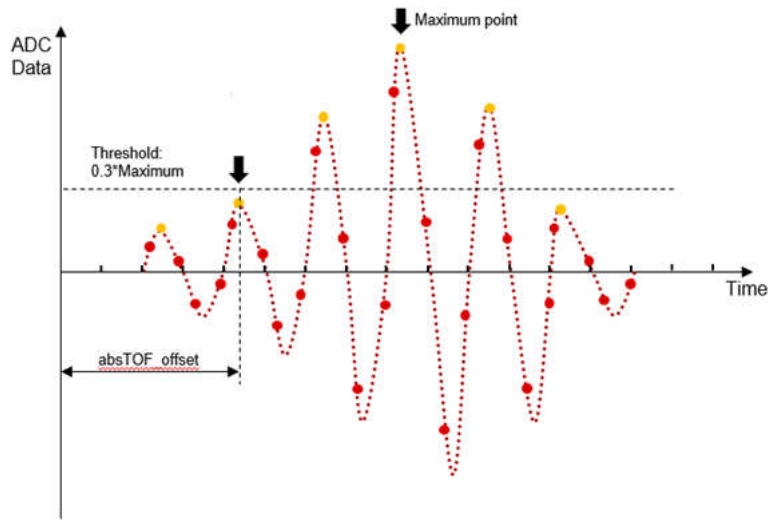


图 2-2. 波瓣算法

因此 UPS 和 DNS absToF 通过方程式 5 确定。

$$absTOF = T_{prop} + T_{absTOF\_offset} \quad (5)$$

其中：

- $T_{prop}$  是通过 USS 设计中心 GUI (脉冲启动和 ADC 捕获之间的间隙) 或应用配置预编程的传播时间, 与给定仪表中超声波信号的估算传播时间相对应。

通常, 此值范围为 35 至 70 $\mu$ s。absTOF 偏移对应于从 ADC 触发到包络超过信号最大值特定比率的时间。TI 建议根据 ADC 捕获数据选择第二个可见波瓣, 因为第一个波瓣通常很弱, 有时很难与噪声区分开。

### 2.1.2 absTOF 计算方法 - Hilbert Wide

通过估计气体中的准确 absToF, 不需要使用温度传感器来计算气体中的声速。在本参考设计使用的 USS SW 库中, 使用 Hilbert 变换, 通过计算接收信号的包络来确定 absToF。先计算每个捕获的包络最大值。然后确定此最大值的包络交叉给定比率。然后通过两个超过阈值和阈值线的包络点计算 absToF 偏移, 如图 2-3 所示。

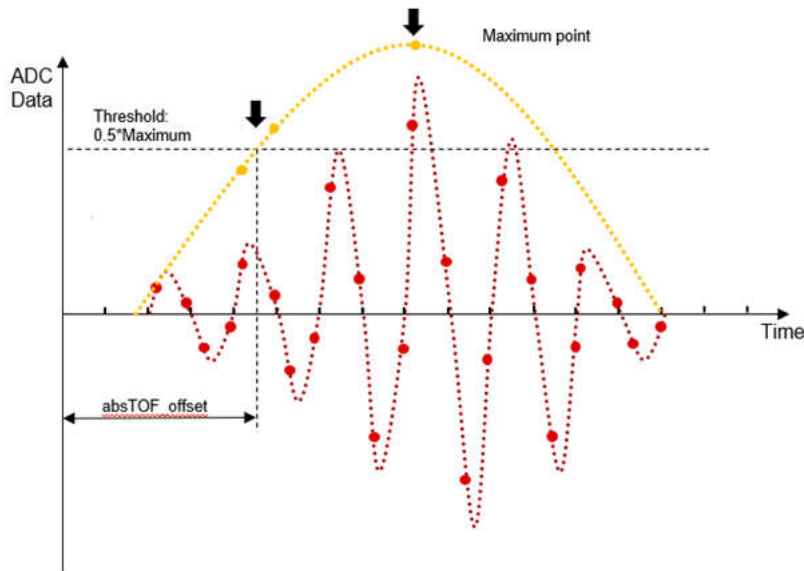


图 2-3. Hilbert Wide 算法

因此 UPS 和 DNS absToF 通过 [方程式 6](#) 确定。

$$absTOF = T_{prop} + T_{absTOF\_offset} \quad (6)$$

其中：

- $T_{prop}$  是通过 USS 设计中心 GUI (脉冲启动和 ADC 捕获之间的间隙) 或应用配置预编程的传播时间, 与给定仪表中超声波信号的估算传播时间相对应。

通常, 此值范围可超过  $150\mu s$ 。absTOF 偏移对应于从 ADC 触发到包络超过包络最大值特定比率 (通常选择为 50%) 的时间。

### 2.1.3 dTOF 计算方法 - 互相关

互相关是一种广泛用于信号处理的技术, 用于测量两种信号之间的相似性和时滞关系。其核心理念是将一种信号 (称为参考信号) 相对于另一种信号 (称为输入信号) 滑动, 并计算点积, 以在不同的延迟下找到最匹配的信号。

对于离散信号  $x[n]$  和  $y[n]$ , 互相关函数  $R_{xy}[k]$  可表示为:

$$R_{xy}[k] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]y[n+k] \quad (7)$$

其中,  $k$  是信号  $y$  相对于信号  $x$  的时间延迟。输出结果  $R_{xy}[k]$  提供了有关延迟  $k$  处两种信号之间的相似度的信息。输出互相关序列  $R_{xy}[k]$  显示了不同延迟时的相关性, 通常以使互相关性最大化的延迟值  $k$  作为两种信号之间的时间延迟。因此, 目标是找到延迟  $k$  值, 以获得最大的  $R_{xy}[k]$  值。在 dTOF 计算中, 使用 UPS 和 DNS 接收信号作为互相关算法的两种输入信号。在这种情况下, 延迟  $k$  表示两种接收信号之间的时间差, 可将其视为 dTOF 值。[图 2-4](#) 示出了如何进行两种离散信号的互相关计算的示例 ( $k = 0$ )。

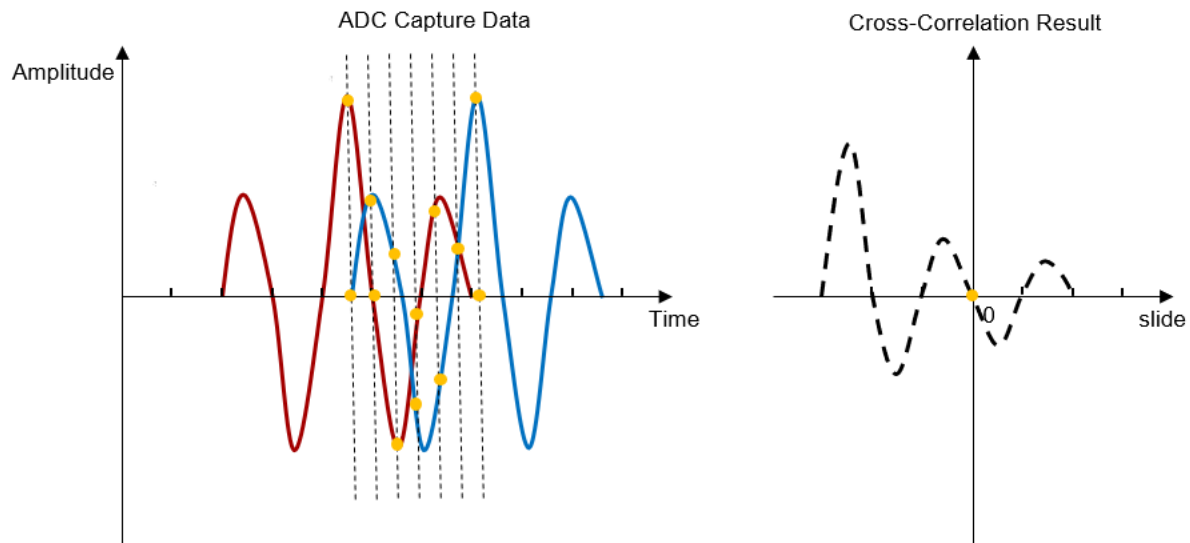


图 2-4. 互相关计算

[图 2-5](#) 显示了一个示例, 演示了如何计算两个离散信号的互相关, 其中在蓝色信号上左滑一个周期 ( $k = -1$ )。

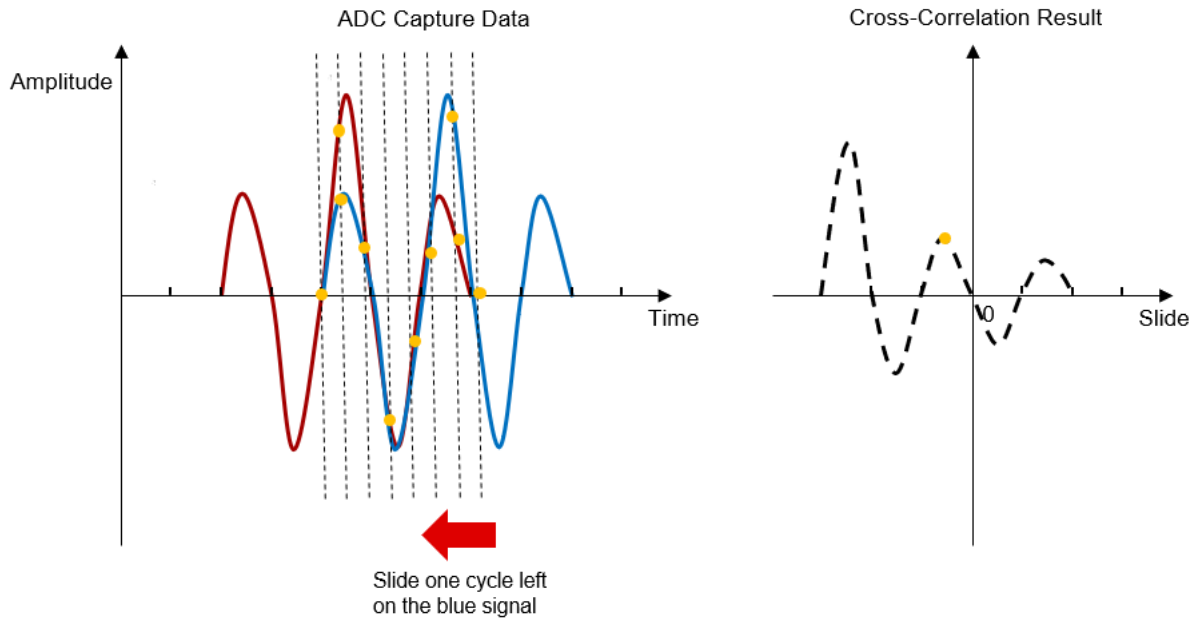


图 2-5. 在蓝色信号上左滑一个周期的互相关计算

图 2-6 显示了一个示例，演示了如何计算两个离散信号的互相关，其中在蓝色信号上左滑五个周期 ( $k = -5$ )。在  $k = -5$  时，由于两种信号重叠，因此可实现最大互相关结果。

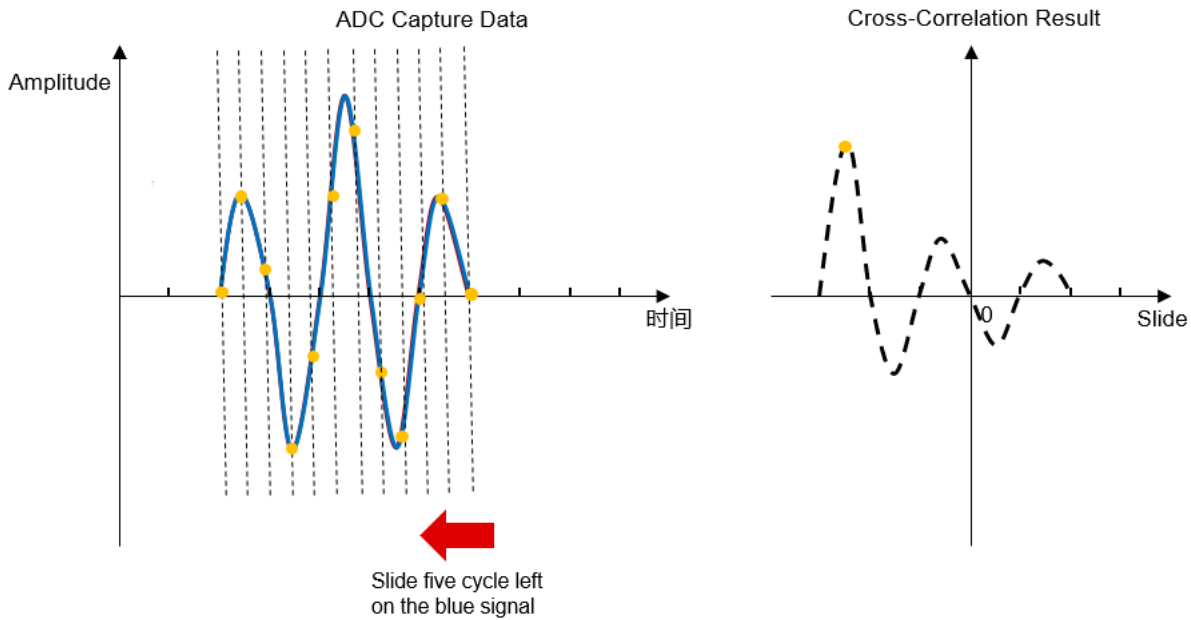


图 2-6. 在蓝色信号上左滑五个周期的互相关计算

### 2.1.3.1 获得高精度 dTOF 结果

由于接收到的信号都是离散信号，因此延迟  $k$  也选为整数。这无法满足对 dTOF 结果的精度要求。以图 2-7 为例。

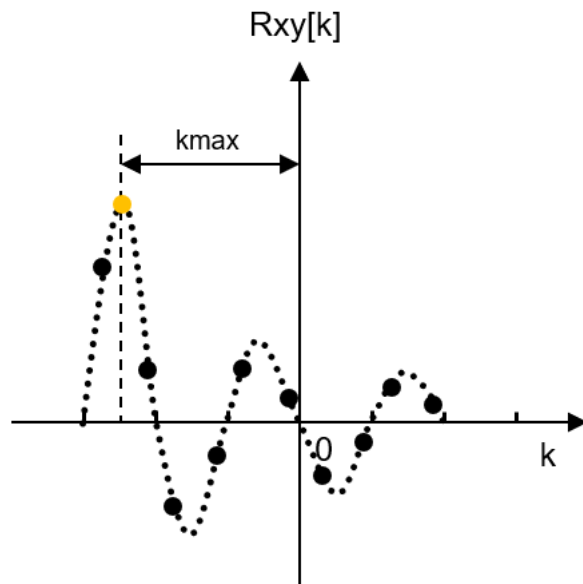


图 2-7. 互相关插值

黑点是  $R_{xy}[k]$  值。通过  $k_{max}$  值找到  $R_{xy}[k]$  值的最大点。在 USS 库中，使用三个最近点的余弦插值来计算高精度  $k_{max}$  值。此处可以使用更多的高性能插值算法。但是，请依据 MCU 的能力和功耗，在 USS 库中选择要使用的余弦插值。通过这种方法，USS 库可以达到高达 5ps 的 dTOF 分辨率。

### 2.1.3.2 互相关法优化

在 USS 库中，尽量减少计算过程，以获得更好的电流消耗性能。dTOF 计算分为两个部分：

1. 粗调计算：使用 `absTOF UPS` 的计算结果和 `DNS` 结果。计算它们之间延迟的整数部分。首先根据此结果滑动 `DNS` 信号，然后运行互相关过程。
2. 精细计算：使用滑动 `DNS` 信号运行互相关过程。

dTOF 总计结果用 [方程式 8](#) 计算得出。

$$dTOF = (\text{integer part from absTOF results}) + (\text{decimal part from cross correlation method}) \quad (8)$$

以 [图 2-8](#) 为例。



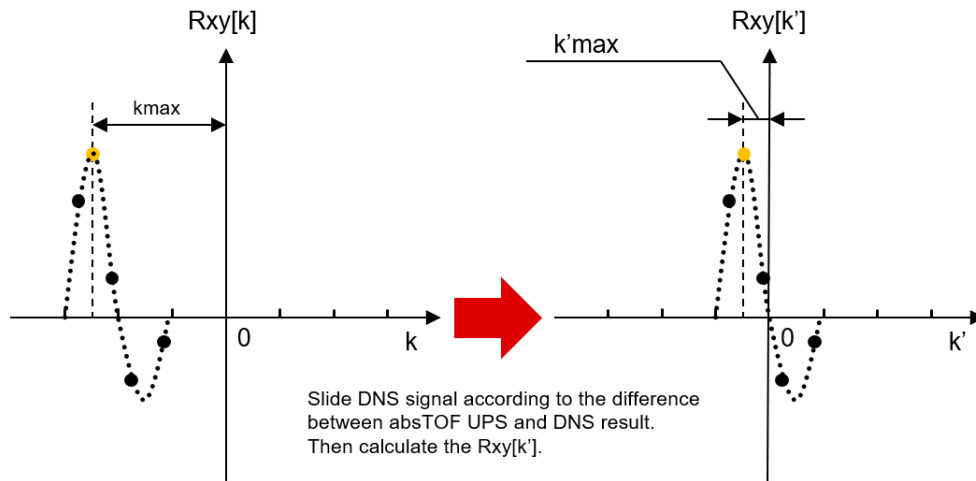


图 2-8. 互相关优化

dTOF 结果的整数部分由 absTOF UPS 和 DNS 结果的时间差给出。USS 库不需要将 DNS 信号滑动多次并计算互相关结果就能找到最大  $R_{xy}[k]$  结果。用户需要确切地知道，根据 absTOF UPS 和 DNS 结果将信号滑动多少个周期才能获得  $R_{xy}[k]$  结果的最大点。这样可以节省大量数据处理时间和电流消耗。

## 2.2 ADC 方法和 TDC 方法之间的区别

这两种方法之间的根本区别在于信号处理。

- ADC 方法 (使用 ADC 捕获的信号的互相关法)：在信号的每个周期中进行四次采样。互相关法提供了用于抑制噪声的数字滤波。
- TDC 方法 (使用时数转换器 (TDC) 进行过零)：在过零点附近的每个周期中采样两次。噪声会影响每个过零时间，而 TDC 方法中不可能进行数字滤波以实现噪声抑制。

ADC 方法的优点在于大约比 dTOF 的标准偏差数据低 3-4 倍。ADC 能够很好地应对信号振幅变化。该算法对接收的信号幅度不敏感，例如在以下情况中：高流速、传感器之间的变化、温度变化、不同的气体成分 (空气、甲烷)。此外，由于使用 ADC 方法可以自然地获得信号包络，因此用户可以实现更多定制化功能。

### 3 适用于 USS 应用的 MSP430 MCU

#### 3.1 USS 模块

USS 模块专为各种测量应用中基于超声波传感技术的模数 (ADC) 转换器而设计。图 3-1 展示了 USS 模块的方框图。

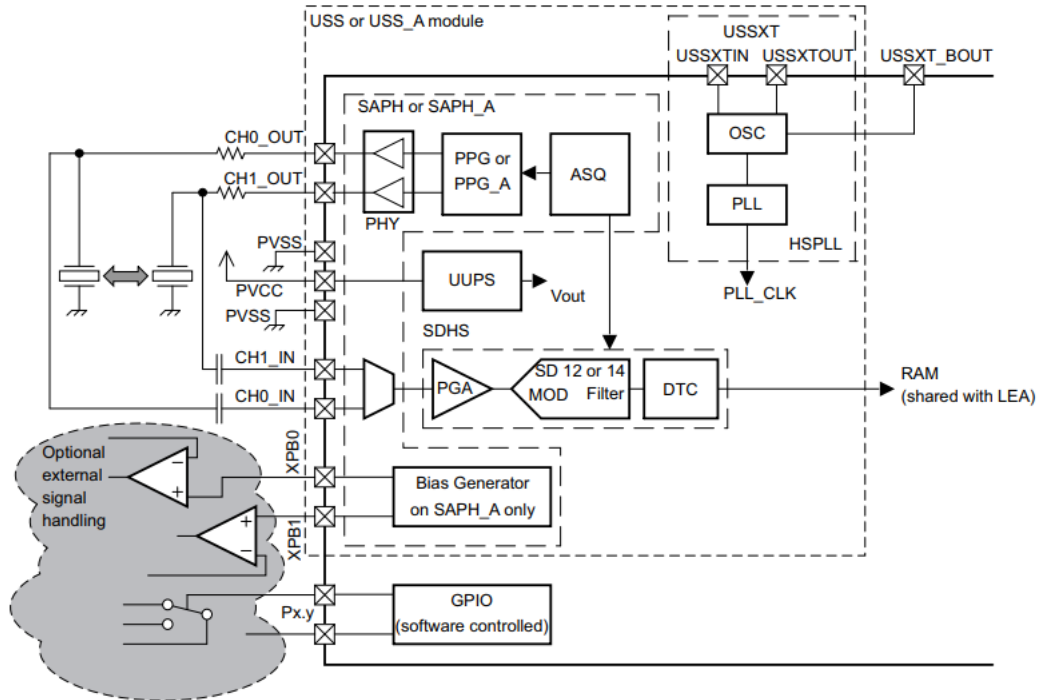


图 3-1. USS 方框图

USS 是由以下四个子模块组成的复杂系统。USS\_A 是原始 USS 模块的扩展变体，采用 SAPH\_A 而不是 SAPH 模块。由于 USS\_A 是 USS 的超集，只有在描述在 USS 和 USS\_A 之间不同的特性时，才特别标注 USS\_A。

表 3-1 中列出了与 USS 模块集成的主要器件及其之间的主要差异。如需更多详情，另请参见器件数据表和用户指南。

表 3-1. 带 USS 模块的 MSP430 MCU

MCU 器件	FRAM	LCD	USS 模块	应用	性能
MSP430FR6005	128kB	是	USS	水表	正常
MSP430FR6007	256kB	是	USS	水表	正常
MSP430FR6045	128kB	是	USS	水表	高
MSP430FR6047	256kB	是	USS	水表	高
MSP430FR5043	64kB	否	USS_A	水表和燃气表	高
MSP430FR6043	64kB	是	USS_A	水表和燃气表	高

#### 3.2 USS 和 USS\_A 模块之间的差异

燃气表中接收信号的 SNR 比水表应用中的相应值低得多。噪声是一个不能忽略的问题，尤其是在燃气表中。使用不同的方法来解决燃气表应用的硬件和软件方面的噪声问题。之前说明了软件方面的方法，下面将说明硬件方面所采用的不同方法。

从表中可以看出，USS\_A 模块可用于燃气表应用。USS 和 USS\_A 模块的主要区别在于捕获序列发生器、可编程脉冲发生器和物理接口 (SAPH 模块)。

SAPH：由一个扩展脉冲发生器、一个低阻抗输出驱动器、一个输入多路复用器、一个捕获序列发生器和外部偏置端子组成。

SAPH\_A 模块可以生成多音调。输出脉冲由多个相位组成。多音调特性对于燃气表应用中的 absTOF 计算非常重要。生成的激励信号的二进制模式用于在处理 Hilbert 变换之前滤除 UPS、DNS ADC 捕获信号上的噪声。此多音调特性可降低噪声信号的影响，并使 ADC 方法在用于燃气表应用时能够成功实现。

### 3.3 MSP430 MCU 上的软件实现

MSP430FR60xx 和 MSP430FR50xx MCU 使用器件中集成的 USS 模块执行完整的捕获过程以进行信号调节。下图显示了此捕获过程。

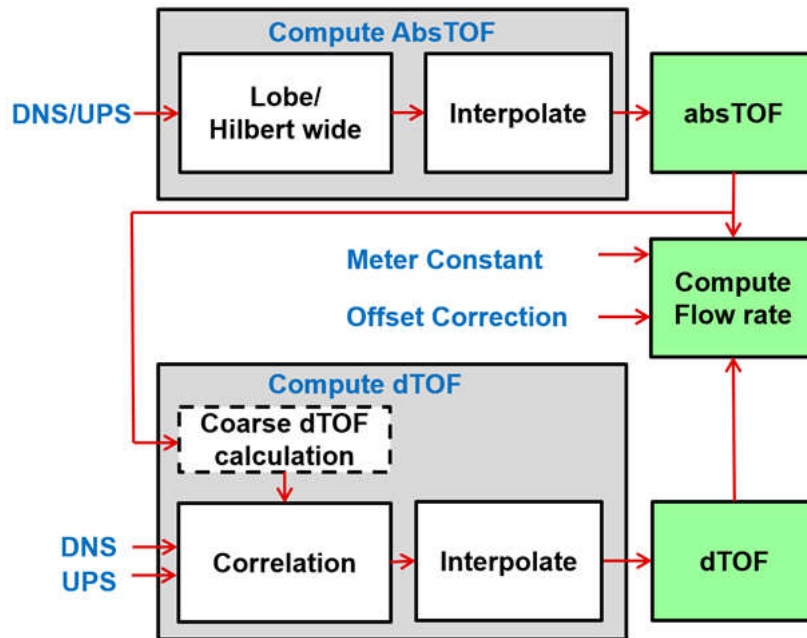


图 3-2. 计算过程

在序列开始时，MCU 向第一个传感器发送一系列脉冲。此信号经传播时间  $T_{12}$  后，由第二收发器接收。传输和接收之间的时间差决定上行 (UPS) ToF。

然后，MCU 在下行阶段期间在相反方向重复相同过程，传播时间为  $T_{21}$ ，表示下行 (DNS) ToF。

可使用互相关法，计算  $T_{12}$  和  $T_{21}$  之间的差值，得出 dTOF。根据节 2.1.3.2，USS 库使用 absTOF 结果作为参考，以给出 absTOF 结果之间的整数周期差异。并使用互相关法提供 dTOF 结果的小数部分。通过该方法，我们得到 dTOF 结果。

根据节 2，流速结果依据 absTOF、dTOF、仪表常数和偏移校正值得出。

## 4 硬件设计流程

### 4.1 原理图

#### 4.1.1 水表原理图 - MSP430FR6047 和 MSP430FR6007

此设计高度集成，对水表应用使用 MSP USS MCU。有关更多详细信息，请参阅 TIDM-1019。

只有几个要点需要强调。

1. 对于 USSXT，TI 建议使用 [方程式 9](#) 选择负载电容器值。

$$C_{crystal} + C_{load} + C_{layout} = 34pF \quad (9)$$

由于 USSLib 中使用了 ADC 方法，因此测量精度几乎不受晶体振荡器精度的影响。因此，在 EVM 板上使用谐振器即可实现效果良好的演示。谐振器消耗的电流也低于晶体。如果用户不关心电流消耗，并且应用的工作温度范围较宽，那么用户可以考虑使用晶体代替谐振器。用户需要在软件中修改

USS\_HSPLL\_INPUT\_CLK\_TYPE 和 USS\_HSPLL\_USSXTAL\_SETTLING\_USEC。

2. 对于 CHx\_IN/OUT 电路，TI 建议使用 1% 电阻器和 1% NP0 电容器，以获得更好的 USS 性能。如果有助于获得更好的仪表性能，用户可以更改电阻器和电容器的值。请注意，TI 使用不同的传感器测试了多种组合，最终采用 200 Ω 和 1000pF 为最佳性能配置。
3. 对于电源，TI 建议为 MCU 使用专用的 LDO 或 DCDC 电源。良好的负载瞬态响应性能对于超声波应用非常重要。
4. 对于 USS GUI 连接，TI 建议首先保留电路板上的 I2C 连接端口 ( COMM\_SDA、COMM\_SCL 和 COMM\_IRQ )。在评估阶段，使用 USS GUI 调试问题非常容易。

#### 4.1.2 水表原理图 - MSP430FR6043 和 MSP430FR5043

此设计高度集成，对水表应用使用 MSP USS MCU。有关更多详细信息，请参阅 TIDM-02005。

只有几个要点需要强调。

1. 在评估 EVM430-FR6043 板上的水表应用之前，需要在板上进行一些更改以适应水表应用。请参阅 [水流测量优化超声波传感计量参考设计的设计指南](#) 中的 [针对水表操作的硬件修改](#) 部分。
2. 对于 USSXT，TI 建议通过 [方程式 10](#) 选择负载电容器值。

$$C_{crystal} + C_{load} + C_{layout} = 34pF \quad (10)$$

由于 USSLib 中使用了 ADC 方法，因此测量精度几乎不受晶体振荡器精度的影响。因此，在 EVM 板上使用谐振器即可实现效果良好的演示。谐振器消耗的电流也低于晶体。如果用户不关心电流消耗，并且应用中具有宽温度范围，那么用户可以考虑使用晶体代替谐振器。用户需要在软件中修改

USS\_HSPLL\_INPUT\_CLK\_TYPE 和 USS\_HSPLL\_USSXTAL\_SETTLING\_USEC。

3. 对于 CHx\_IN、OUT 电路，TI 建议使用 1% 电阻器和 1% NP0 电容器，以获得更好的 USS 性能。如果有助于获得更好的仪表性能，用户可以更改电阻器和电容器的值。请注意，TI 使用不同的传感器测试了多种组合，最终采用 200 Ω 和 1000pF 为最佳性能配置。
4. 对于电源，TI 建议为 MCU 使用专用的 LDO、DCDC 电源。良好的负载瞬态响应性能对于超声波应用非常重要。
5. 对于 USS GUI 连接，TI 建议首先保留电路板上的 I2C 连接端口 ( COMM\_SDA、COMM\_SCL 和 COMM\_IRQ )。在评估阶段，使用 USS GUI 调试问题非常容易。
6. 若要使用 MSP430FR5043 进行评估，必须修改默认的 MSP430FR5043 链接器文件，以满足 USS 库所需的存储器配置。请使用 MSP430FR6043EVM\_USS\_Water\_Demo 中的 lnk\_msp430fr6043.cmd。将名称更改为 FR5043 并开始评估。图 4-1 中示出了链接器文件的比较情况。

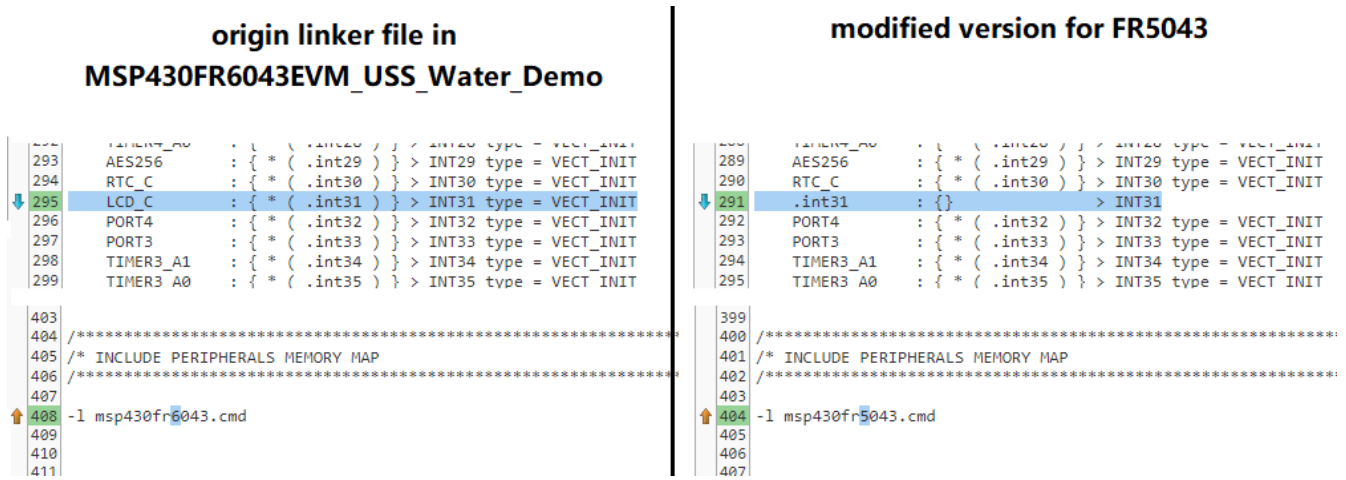


图 4-1. MSP430FR5043 MCU 的水表演示的链接器文件差异

MSP430FR5043 不支持 LCD 模块，因此必须修改软件以禁用 LCD 和所有相关函数。该过程在 hal\_lcd.h 中进行处理

### 4.1.3 燃气表原理图 - MSP430FR6043 和 MSP430FR5043

对于燃气表应用，请将外部 AFE 电路与 MSP USS MCU 结合使用，以进行硬件设计。有关更多详细信息，请参阅 TIDM-02003。

有几个要点需要强调。

1. 对于评估 EVM430-FR6043 板上的燃气表应用，仅对 UPS 和 DNS 信号路径使用通道 CH0。模拟开关 U7 和 U8 用于切换 UPS 和 DNS 信号上的方向。与同时使用 CH0 和 CH1 通道相比，这可以提供更好的 ZFD 性能。
2. 请注意，R10、R13 和 R14 对于硬件设计至关重要。请不要忘记上述项。
3. U9 SN74LVC2T45 是一种电压电平转换元件。该电平可将激励信号电压移至 5V，并提高严格测试环境中的测量性能。默认情况下，5V LDO 在 EVM 板上处于旁路状态。用户可以在 JP1 5VENA 上添加跳线，并将 JP2 上的跳线从 3.3VTX 移动到 5VTX。在“项目属性 -> 构建 -> MSP430 编译器 -> 预定义符号”中查找预定义符号。然后，将预定义符号 \_\_AFE\_EXT\_3v3\_\_ 更改为 \_\_AFE\_EXT\_5v0\_\_，以启用 5V 激发函数。

用户还可以移除板载 U9。图 4-2 显示了没有 U9 的基准电路。请注意，R47 和 R49 保留在电路中。

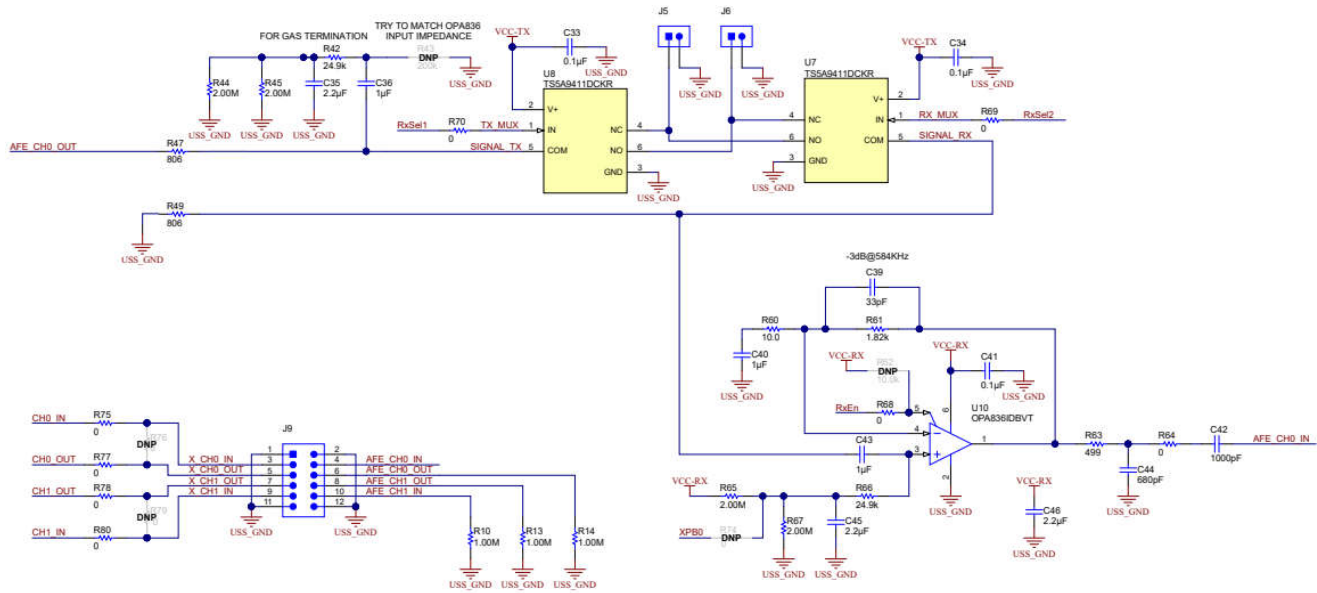


图 4-2. 不带电平转换器的原理图

- 对于 U10 OPA836，TI 建议使用与 EVM 板中所示相同的电路。基于 [OPAx836 极低功耗、电源轨到电源轨输出、负电源轨输入、电压反馈运算放大器数据表](#)的[低功耗应用和电阻值对带宽的影响](#)部分，584kHz 时的带宽 -3dB 来自 TINA 仿真。此电路是针对 200kHz、400kHz 和 500kHz 传感器的一般推荐电路。用户可以根据设计更改电路。

R65、R67、R66 和 C45 为 OPA IN+ 输入提供偏置电压。用户还可以发现 R44、R45、R42 和 C35 在 CH0\_OUT 布线上显示为对称匹配电路。

在信号进入 MCU 之前，R63 和 C44 在 OPA\_OUT 引脚上提供低通滤波器。

OPA838 是 OPA836 的引脚对引脚替代产品。与 OPA836 相比，OPA838 具有更好的输入电压噪声性能。OPA838 可提供增强的标准偏差性能，最高比 OPA836 低 2.5 倍，是它的直接替代产品。有关更多信息，请参阅 TIDM-02003。

- 对于电源 U4、U5 和 U6，TI 建议为 MCU 使用专用的 LDO、DCDC 电源。良好的负载瞬态响应性能对于超声波应用非常重要。当用户不需要 5V 特性时，板中不需要 U5 5V DCDC 电源。用户还可以使用一个 LDO 来提供 VCC\_TX 和 VCC\_RX 以保存 BOM 值。这需要将硬件上的 TxPwr 和 RxPwr 连接在一起，以进行更改，或在软件中更改配置，从而节省一个 GPIO。
- 对于 USSXT，TI 建议使用[方程式 11](#) 选择负载电容器值。

$$C_{crystal} + C_{load} + C_{layout} = 34pF \quad (11)$$

由于 USSLib 中使用了 ADC 方法，因此测量精度几乎不受晶体振荡器精度的影响。因此，在 EVM 板上使用谐振器即可实现效果良好的演示。谐振器消耗的电流也低于晶体。如果用户不关心电流消耗，并且应用的工作温度范围较宽，那么用户可以考虑使用晶体代替谐振器。用户需要在软件中修改 USS\_HSPLL\_INPUT\_CLK\_TYPE 和 USS\_HSPLL\_USSXTAL\_SETTLING\_USEC。

- 对于 CHx\_IN、OUT AFE 电路，TI 建议使用 1% 电阻器和 1% NP0 电容器，以便获得更好的测量性能。有关更多详细信息，请参阅 EVM 物料清单列表。
- 对于 USS GUI 连接，TI 建议首先保留电路板上的 I2C 连接端口 (COMM\_SDA、COMM\_SCL 和 COMM\_IRQ)。在评估阶段，使用 USS GUI 调试问题非常容易。
- 若要使用 MSP430FR5043 进行评估，必须修改默认 MSP430FR5043 链接器文件，以满足 USS 库所需的存储器配置。使用 MSP430FR6043EVM\_USS\_Gas\_Demo 中的 Ink\_msp430fr6043.cmd。将名称更改为 FR5043 并开始评估。MSP430FR5043 不包含 LCD 支持，因此必须修改该软件以禁用 LCD 和任何相关函数。该过程在 hal\_lcd.h 中进行处理

## 4.2 PCB 布局指南

需要遵循通用 PCB 指南以确保测量准确和操作适当。

1. 去耦电容器必须尽量靠近电源引脚放置。
2. 振荡器必须靠近芯片放置，并使用与主接地层分离的接地层。这些元件通过细导线连接到主接地层，如图 4-3 所示。良好的晶体接地布局有助于获得更高的 ESD 等级。

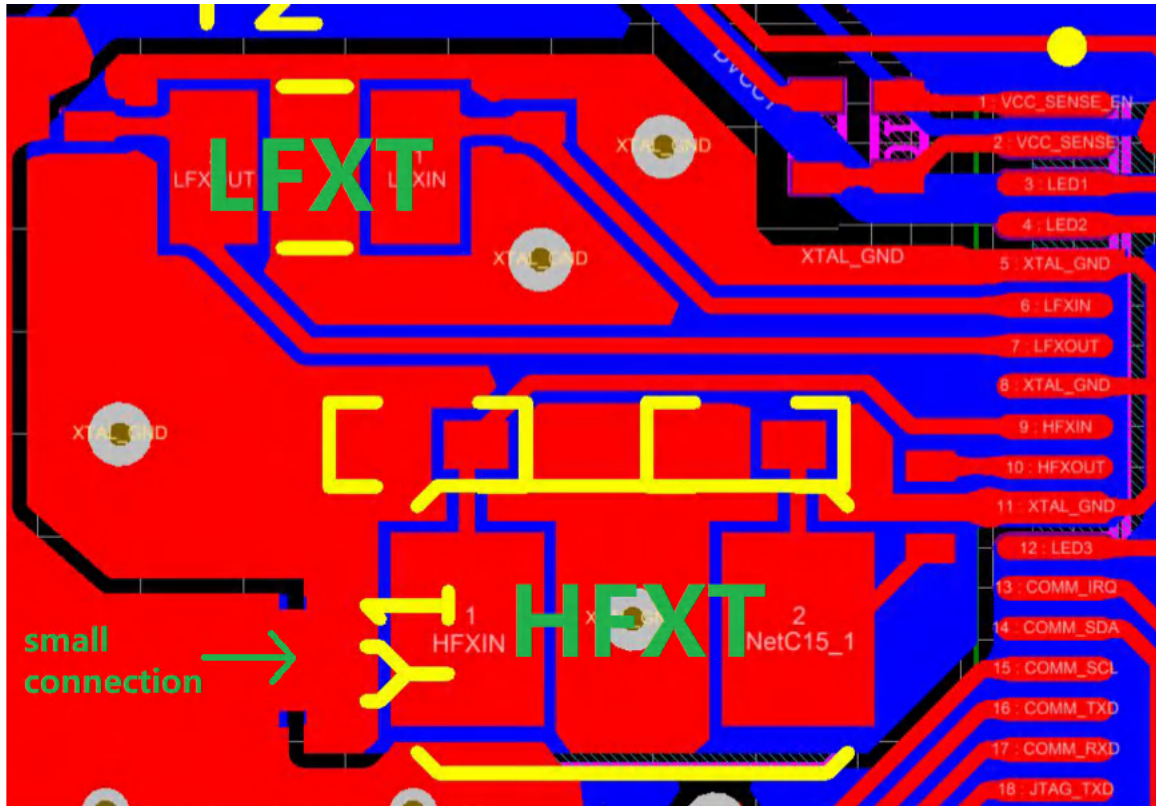


图 4-3. 振荡器布局示例

3. USS CH0\_IN、CH0\_OUT、CH1\_IN 和 CH1\_OUT 的布线长度必须匹配，以确保信号的时序正确，因为这些信号在皮秒范围内，如图 4-4 所示。

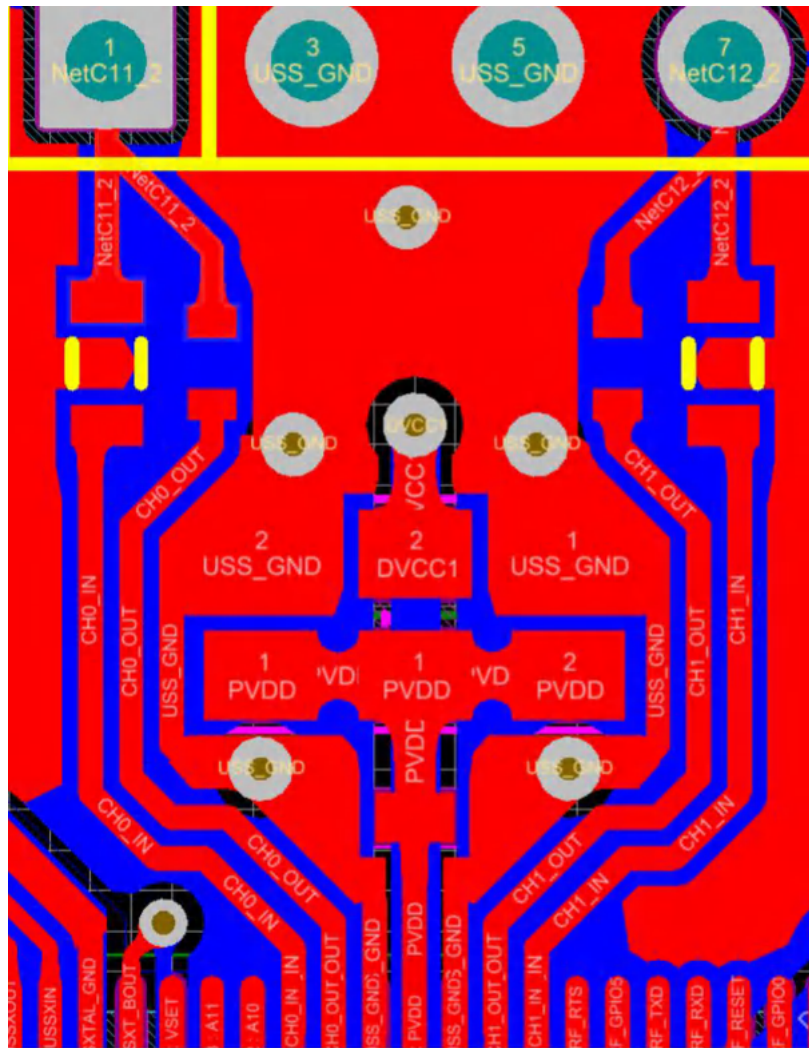


图 4-4. USS 信号布局示例

4. 为实现最高精度，所有 USS 信号元件必须使用 1% 的元件容差。
5. 确保没有布线穿过其他层上的 USS 信号。
6. 必须按照使用 [MSP430 和段式 LCD 应用笔记](#)中的指导原则进行 LCD 连接。



## 5 软件设计指南

TI 提供了 USS 库和 USS 设计中心，可帮助用户与用于超声波流量计开发的应用软件进行集成。

### 5.1 USS 演示项目和相关资源

水表和燃气表应用的软件资源是类似的。用户可以在 [USS-SWLIB-WATER](#) 上找到用于水表应用的所有软件资源。此 [USS-SWLIB-GAS](#) 中提供了燃气表应用的软件资源。

图 5-1 显示了资源链接中包含的内容。

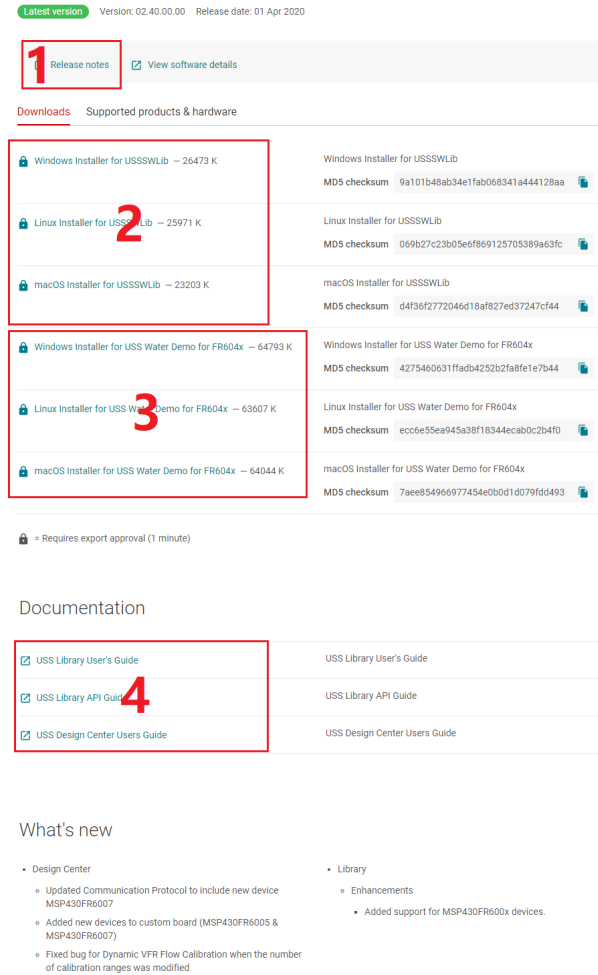


图 5-1. USS 软件资源页面

1. 第一部分是版本说明。用户可以找到演示代码当前版本的更新。其中还包括修订历史记录、安装和使用情况以及演示项目的其他基本信息。
2. 第二部分是 USSSWLIB 安装程序。其中包括 USS 设计中心 (USS DC) 和一个模板示例项目。

模板示例项目包括 USS 测量的完整过程。然而，这不包括 USS DC 通信接口。通过使用该模板示例项目，用户可以测量流量，但无法连接到 USS DC。如果用户已通过评估阶段并且有一个 GUI 界面，那么用户可以使用此模板示例作为一个项目的起始点。

3. 第三部分是演示示例项目。建议用户使用此项开始评估。这包括 USS 测量的完整过程和 USS DC 通信接口。USS DC 在早期评估阶段非常有用，可以帮助用户记录数据并轻松进行分析。
4. 第四部分是文档。

a. USS 库用户指南包含用户需要了解的有关 USS 库的所有信息。本文档中包含了一些常见问题解答。

例如，所使用的资源在 USS 库的“代码示例 -> 硬件先决条件 -> 器件资源使用情况”中进行了描述。

若要检查 **absTOF** 插值计算表系数的更新，请参阅 **生成插值校正查找表** 部分。对于波瓣算法，此表用于计算每个波瓣的峰值。使用更高的插值可以提升 **absTOF** 精度。

关于优化库，用户可以检查不同 **USS** 库的存储器使用信息。这还包括如何利用 **存储器优化库** 部分实现优化库。

- b. 在《**USS 库 API 指南**》中，详细介绍了 **USS** 库中的每个 **API**。
- c. 《**USS 设计中心用户指南**》包含用户需要了解的有关 **USS DC** 的所有信息，包括配置、波形图、**ADC** 捕获功能、频率扫描、校准、调试波形和错误处理。本文档中包含了一些常见问题解答。

用户可以查看 **错误处理** 部分，了解有关如何检查所报告错误信息的更多信息。

用户可以查看 **通信协议规范** 部分，了解如何基于当前通信协议构建 **GUI**。

## 5.2 演示项目说明

### 5.2.1 演示项目中的文件

图 5-2 显示了 **USS** 演示项目中包含的内容。

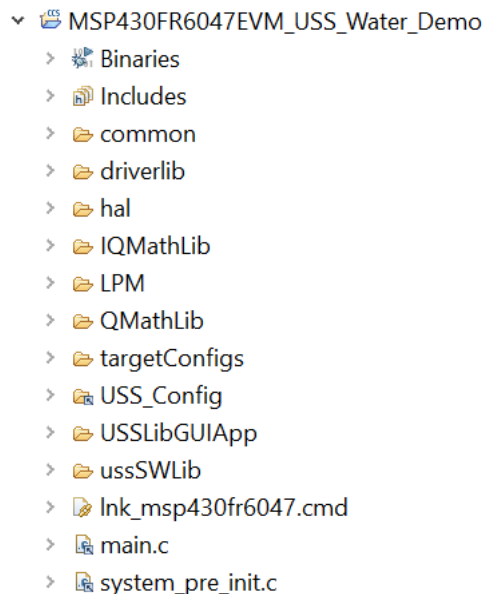


图 5-2. 演示项目中的文件

1. 公用文件夹：其中包括 **USS DC** 驱动程序、协议、实用程序和命令处理程序。可使用一个 **I2C** 端口和一个中断引脚实现 **MCU** 与 **USS DC** 之间的通信。还可在这部分代码中准备 **UART** 接口。这可供用户构建 **GUI**。目前，**USS DC** 不支持使用 **UART** 通信。
2. **Driverlib** 文件夹：这包括 **MSP430** 外设的驱动程序库。
3. **Hal** 文件夹：**hal\_adc** 包含 **ADC** 函数的硬件抽象层，例如使用集成 12 位 **SAR ADC** 进行内部温度传感器捕获和外部输入电压捕获。**hal\_lcd** 包括 **FH-1138P** 分段式 **LCD** 的硬件抽象层。**hal\_system** 包括 **MSP** 系统的硬件抽象层，其中包括时钟、看门狗和 **GPIO**。**hal\_uart** 包括 **UART** 通信的硬件抽象层。
4. **IQMathLib** 和 **QMathLib** 文件夹：**MSP IQmath** 和 **Qmath** 库是一个高度优化的高精度数学函数集合，使 **C** 语言编程人员可以将浮点算法无缝移植到 **MSP430** 和 **MSP432** 器件上的定点代码中。这些例程通常用于计算密集型实时应用程序，在这些应用程序中，最佳的执行速度、高精度和超低能耗非常关键。与使用浮点数学算法编写的同等代码相比，用户使用 **IQmath** 和 **Qmath** 库可以大幅提高执行速度并降低能耗。
5. **USS\_Config** 文件夹：对 **USS SW** 库的所有修改都包含在 **USS\_userConfig.h** 中。**USS\_userConfig.c** 包含库使用的所有临时缓冲区。查找表用于 **USS** 库中使用的插值法。校准标头文件包含流速校准数据。用户可以使用 **USS DC** 为某些应用生成所有这些具有自定义配置的标头文件。然后，替换项目中的原始标头文件，然后使用新生成的标头文件重建项目并对其进行编程。**MCU** 无需以这种方式为测试重新配置这些参数。

6. USSLibGUIApp 文件夹：此文件夹处理 USS 库与 USS DC 之间的交互。该项目的主循环也在 USSLibGUIApp.c 中处理用户可以在主循环中添加应用代码。
7. UssSWLib 文件夹：此文件夹包含 USS 库和标头文件。ussSwLib.h 标头文件包含所有 USS 库枚举、结构、宏、函数和全局变量定义。该标头文件中的注释对于用户更好地了解每个变量也非常重要。
8. 链接器文件：lnk\_msp430fr6047.cmd 将程序、数据和其他项（如中断矢量）在 MSP430 存储器空间中的位置告知编译器。演示项目中的链接器文件已经过修改，以满足 USS 库的要求。

### 5.2.2 演示项目中的属性设置

- 优化级别：默认情况下，演示项目使用优化级别 3。TI 不建议更改项目的优化级别。如果用户需要更大的应用代码大小，请查看 USS 库用户指南中优化库的信息。

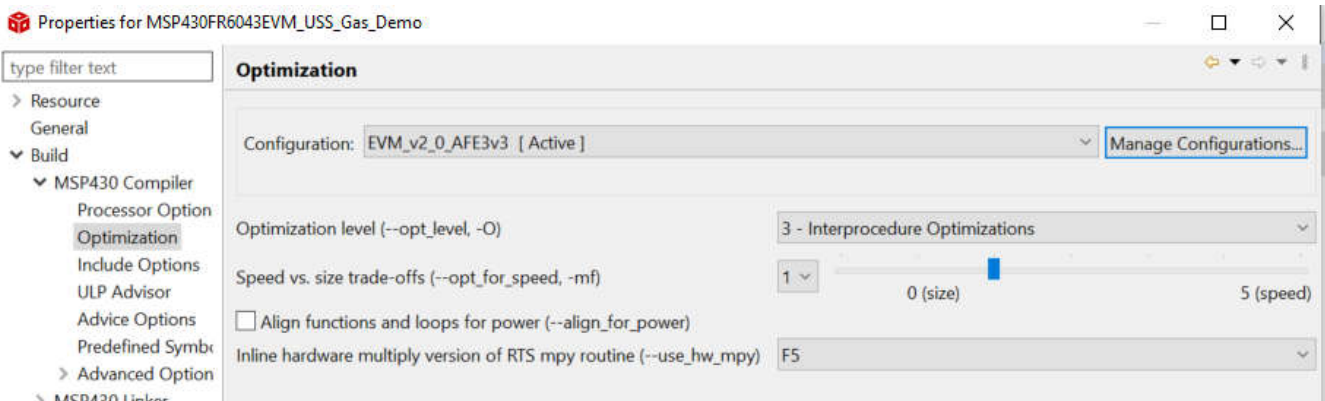


图 5-3. 演示项目中的属性设置

- 预定义符号：预定义符号由编译器系统预定义。在“项目属性 -> 构建 -> MSP430 编译器 -> 预定义符号”中可以找到这些符号。如果用户需要启用 5V 激发函数，请将预定义符号 `__AFE_EXT_3v3__` 更改为 `__AFE_EXT_5v0__` 来启用。有关更多详细信息，请参阅节 4.1.3。

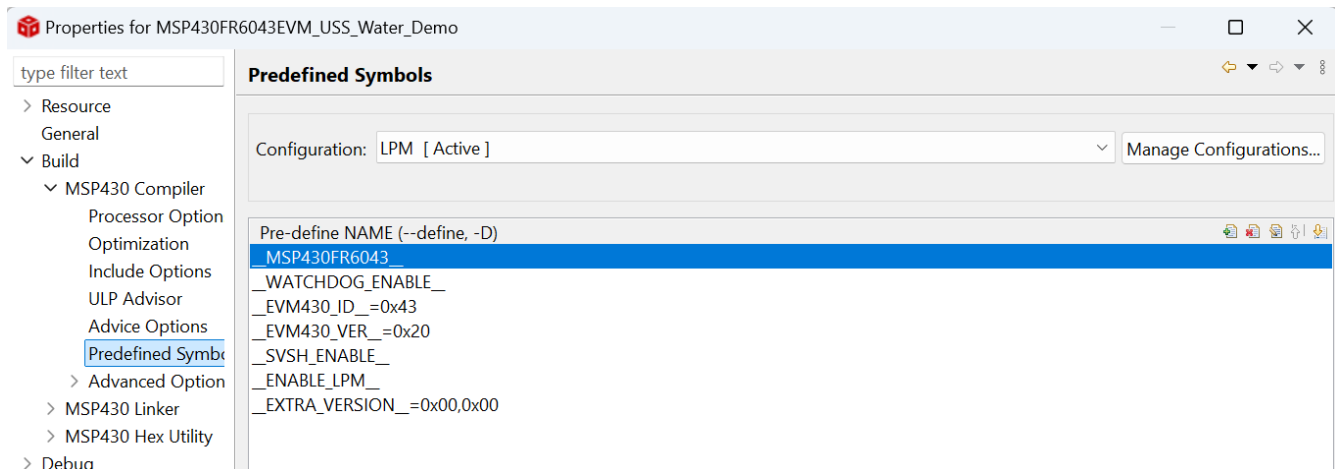


图 5-4. 预定义符号

## 6 总结

本应用手册明确说明了 ToF 计算方法。当 USS 库产生任何错误结果时，用户可以修改参数，从而通过更好地了解计算过程，避免产生错误结果。

本文档帮助初学者从硬件和软件两个方面开始进行 USS 设计。本应用手册指导用户构建仪表。

## 7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [MSP430FR58xx](#)、[MSP430FR59xx](#) 和 [MSP430FR6xx](#) 系列用户指南

- 德州仪器 (TI), [MSP 超声波传感用户指南](#)
- 德州仪器 (TI), [超声波传感解决方案设计中心用户指南](#)

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（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，不保证没有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、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司