



Gabriel Lake

摘要

由于 TDC10xx 和 TUSS4470 超声波 AFE 器件支持传感器的频率范围，故这些器件均支持水耦合与空气耦合飞行时间 (ToF) 应用。本应用报告提供了 TDC1000 和 TUSS4470 在中短程空气耦合液位感测评估和短程水耦合液位感测评估中的详细使用和比较。通过一系列测试得出的数据比较每款器件的性能和优缺点，同时讨论了各种常见使用错误以及设计挑战，例如传感器振铃衰减和范围限制。为 TDC1000 提供的相关信息和数据也适用于 TDC1011。

内容

1 超声波传感范围性能因素综述	2
1.1 物理参数	2
1.2 传感器特性	3
1.3 AFE 器件配置	3
2 方法概述	4
2.1 引言	4
2.2 硬件配置	4
2.3 固件配置	7
3 短程空气耦合测试结果	10
3.1 TUSS4470	10
3.2 TDC1000	10
4 中程空气耦合测试结果	12
4.1 TUSS4470	12
4.2 TDC1000	14
5 短程水耦合测试结果	16
5.1 TUSS4470	16
5.2 TDC1000	17
6 阻性阻尼器件比较	18
6.1 TUSS4470	18
6.2 TDC1000	21
7 总结	23
8 参考文献	24
A 附录 A	25
A.1 TUSS4470：滤波电容器选型	25
A.2 TUSS4470：原理图	27
B 附录 B	28
B.1 TDC1000 其他	28
B.2 TDC1000-C2000EVM 原理图	29

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 超声波传感范围性能因素综述

与本文档中所述测试数据相关且影响超声波 ToF 范围的因素可以按系统属性分为以下三类：物理参数、传感器特性和 AFE 器件设置。这些系统属性可能是固定的，也可能由设计人员更改。

1.1 物理参数

超声波传输介质、目标成分以及目标雷达截面从根本上影响使用给定传感器的可达范围。例如，由于声波通过空气消散，空气耦合超声波传输实际上限制在 500kHz 以下。通常，传输范围与传感器频率成反比。目标的材料成分和声阻抗失配都会影响波从表面反射时的衰减。

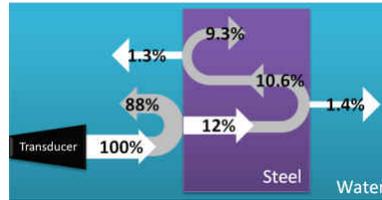


图 1-1. 水和钢界面的反射系数

同样，目标雷达截面造成的散射或波错误引导会对超声回波 SPL 造成重大影响。

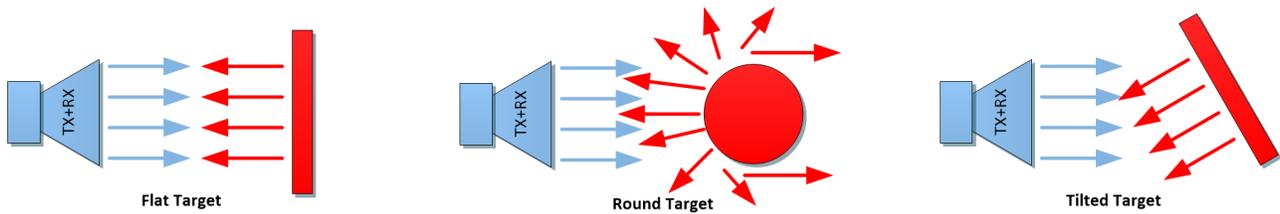


图 1-2. 目标几何形状的影响

1.2 传感器特性

传感器的直径、机械封装和品质因数也对传输范围产生可测量的影响。在一种常见的定义中，机电振荡器的品质因数与其谐振半功率带宽的倒数成正比。 Q 因子同样地可以用每振荡周期储存的能量与耗散的能量之比来描述。例如，完美的传感器应该具有无限窄的带宽和无限大的 Q 因子，而这个理论传感器的 BVD 模型是一个无损 LC 振荡器。因此，具有较高 Q 因子的传感器比具有较低 Q 因子的传感器具有更长的振荡衰减更长。

商用传感器的阻尼与 BVD 模型 (RLC 电路) 的电阻相关。BVD 模型的阻尼电阻对应于传感器的整体阻尼特性，它是传感器封装 (例如压电元件周围的外壳与基底材料) 以及布线电阻的函数。

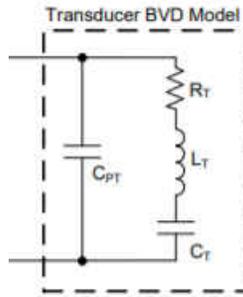


图 1-3. 传感器 BVD 模型

传感器的振铃周期为发射信号衰减所需的时长，也称为绘图信号的盲区。振铃周期内无法接收反射的超声波脉冲。一种缩短振铃时间的方法是通过机械或电子方式 (利用机械阻尼或并联阻尼电阻器) 增加传感器 RLC 模型的电阻。

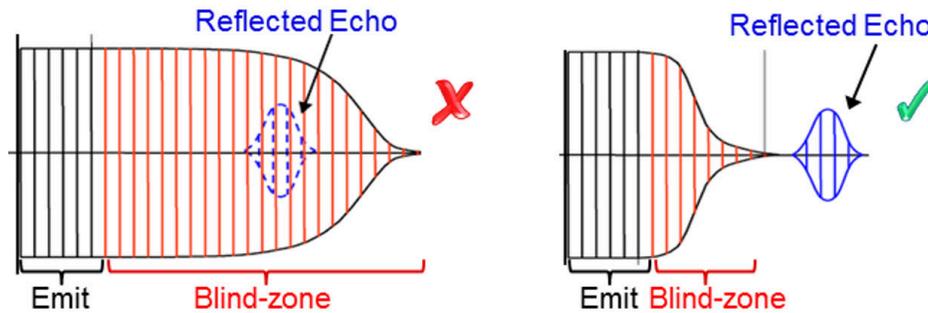


图 1-4. 单稳态振铃衰减

1.3 AFE 器件配置

如果不熟悉超声波 AFE，TI 精密实验室视频系列进行了很好的介绍。驱动器类型 (直流开关或变压器拓扑)、发射激励脉冲数、电流限制、接收器增益以及发射电压电平传感器驱动设置都会影响可实现的最小和最大 ToF 范围。如需进一步了解这些设置的含义以及系统优化的背景信息，请参阅节 8。

2 方法概述

2.1 引言

本文档旨在对 TDC1000 和 TUSS4470 进行比较，这两款器件支持的频率范围有重合，但配置、操作和 ToF 数据收集方法不同。本报告其余部分将包括如下内容：

1. [TUSS4470EVM](#) 和 [TDC1000-C2000EVM](#) 的硬件和固件配置，用于：
 - a. 使用 220kHz 传感器进行中短程空气耦合 ToF 测量
 - b. 使用 1MHz 传感器进行短程水耦合 ToF 测量
2. [TUSS4470EVM](#) 和 [TDC1000-C2000EVM](#) 短程空气耦合水位感测测试结果
3. [TUSS4470EVM](#) 和 [TDC1000-C2000EVM](#) 中程空气耦合水位感测测试结果
 - a. 包括 TUSS4470EVM 5V 和 35V 驱动电压操作
4. [TUSS4470EVM](#) 和 [TDC1000-C2000EVM](#) 短程水耦合水位感测测试结果
5. [TUSS4470](#) 和 [TDC1000](#) 阻性阻尼比较

2.2 硬件配置

2.2.1 传感器

采用 220kHz [Massasonic Model E-188/220](#) 传感器进行空气耦合测试。

采用 1MHz [Steminc SMD15T21R111WL](#) 压电圆盘传感器进行水耦合测试。

2.2.2 实验设置：空气耦合液位感测

在短程测试中，将 EVM 和传感器安装在测试夹具上，该测试夹具放置在 8 加仑装水水箱的箱口上，而在中程测试中，相同的测试夹具则放置于装水公用缸上。传感器与有机玻璃板齐平安装，并通过摩擦力和粘性点胶（强力胶）固定到位。

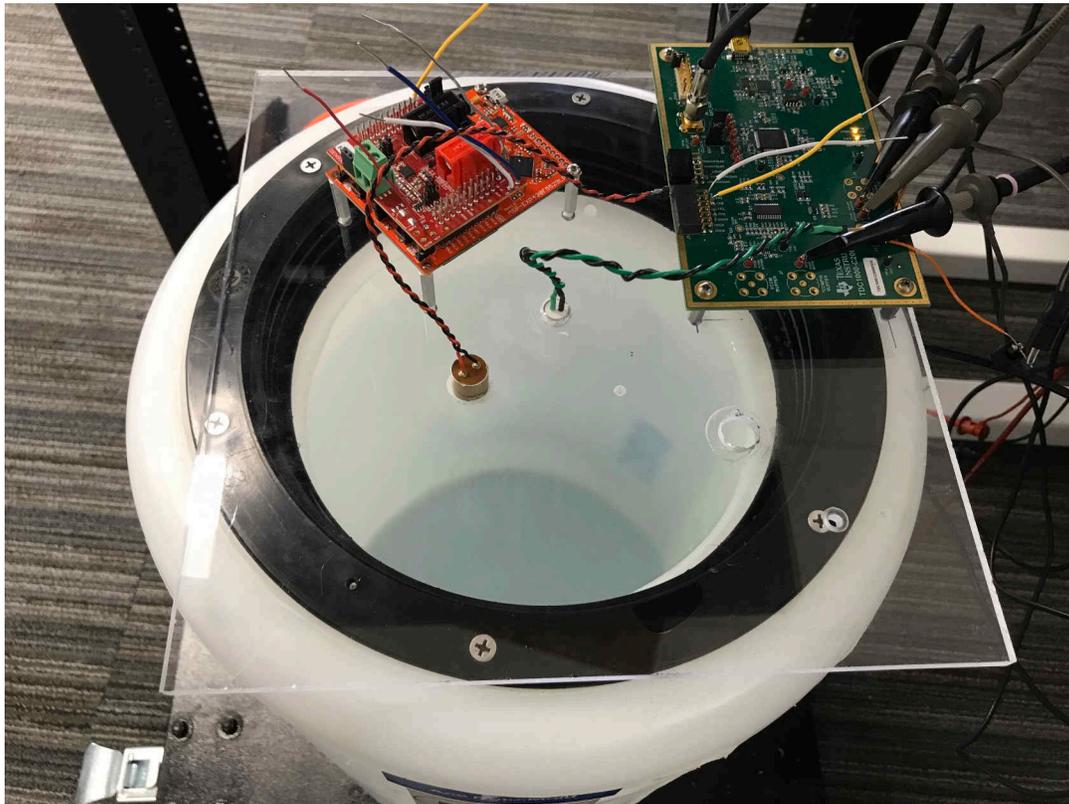


图 2-1. 短程空气耦合液位感测测试环境



图 2-2. 中程空气耦合液位感测测试环境

2.2.3 实验设置：水耦合液位感测

按照 [SNAA266 如何为液位传感和流体 ID 选择和安装超声传感器](#) [SNAA266](#) 中描述的步骤，将压电圆盘传感器安装在如图 2-3 所示的小型有机玻璃水箱的底部。

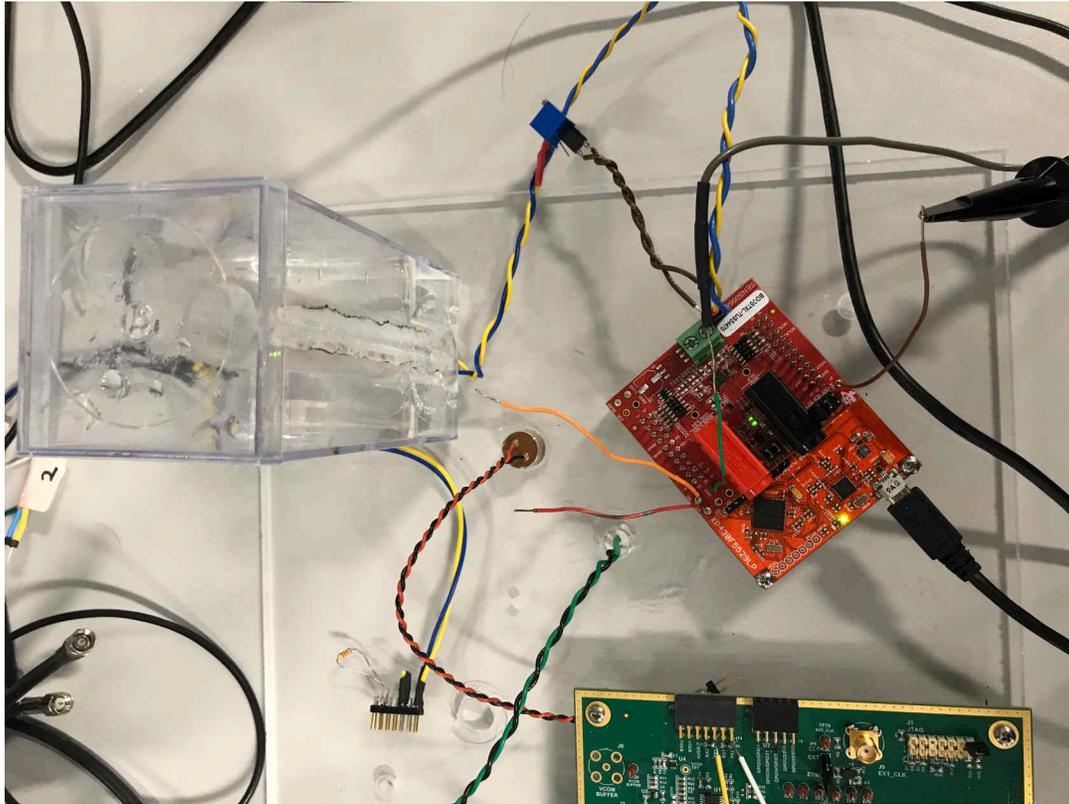


图 2-3. 短程水耦合液位感测测试环境

2.2.4 TUS4470 EVM 硬件配置

对默认配置进行了以下修改：

- 设置 C1N1 和 C1F1 电容器组来分别支持 220kHz 和 1MHz 传感器。有关更多信息，请参阅[附录 A](#) 或 [带对数放大器的 TUS4470 直接驱动超声波传感器 IC 数据表](#) 中典型应用部分的典型应用的建议组件值表格。通过 J1 和 J4 上的跳线选择电容器。
- 位于 J6 和 J8 上的电源模式跳线根据测试所需的驱动电压进行设置。有关更多信息，请参阅 [TUS44x0 超声波传感器 EVM 用户指南](#) 中的电源模式跳线位置表格。
- J3 填充了一个双引脚母接头，用于在半桥驱动器配置中连接传感器。

2.2.5 TDC1000-C2000EVM 硬件配置

通道 1 (TX1/RX2) 配置用于 220kHz 传感器：

- 带通滤波器：150kHz - 1.2MHz 通带。有关实施说明，请参阅 [用于液位传感、流量传感、浓度传感以及接近传感应用的 TDC1000 超声波传感模拟前端 \(AFE\) 数据表](#) 中的接收器滤波器部分。
- LNA 反馈：将 C4 上的默认的 300pF 电容器替换为 900Ω 电阻器。这对于低于 500kHz 的传感器是必要的。
- 跳线 JP1 引脚 2-3 短接来连接外部时钟源。

通道 2 (TX2/RX1) 配置用于 1MHz 传感器：

- 此处使用了默认的开箱即用带通和 LNA 反馈值。
- EVM 8MHz MEM 振荡器用作 TDC1000 输入时钟源，JP1 引脚 1-2 短接。

2.3 固件配置

2.3.1 TUSS4470 电源配置

通过 TUSS Generation III EVM GUI 的“Device Monitor”或“Memory Map”选项卡，可以轻松地配置 TUSS4470 寄存器。下文列出并讨论了器件配置的一些关键寄存器设置。

TUSS4470 EVM 可以根据表 2-1 进行配置，用于 5V - 36V VDRV。每列中枚举的器件配置将为 VDRV 启用相应的电压范围。在未明确列出寄存器名称的情况下，该值对应于 TUSS Generation III EVM GUI 中看到的值。

表 2-1. TUSS4470EVM 电压配置指南

硬件/固件设置	5V	5V 至 20V	5V 至 36V
J6 引脚 5-6 跳线	短路	断开	断开
VDRV 外部电源	NC (1)	NC	5V 至 36V
VPWR 外部电源	NC	VDRV_VOLTAGE_LEVEL+5V+0.3V	VDRV+0.3V
VDRV_HI_Z	非 HiZ	非 HiZ	HiZ
VDRV_VOLTAGE_LEVEL + 5V	5V	5V 至 20V	X (2)

1. 未连接
2. 不用考虑

2.3.2 TUSS4470 220kHz 配置

表 2-2 显示了使用 220kHz 传感器和 TUSS Gen III EVM GUI 对 TUSS4470 进行中程评估的起始值示例。

表 2-2. TUSS4470 220kHz 建议评估固件设置

TX 设置	短程值	中程值	RX 设置	值	输出设置	短程值	中程值
BURST_PULSE	4	10	BPF_HPF_FREQ	218.26 kHz	ECHO_INT_COMP_EN	禁用	禁用
HALF_BRG_MODE	启用	禁用	LOGAMP_DIS_LAST_GM	启用	记录 (GUI 记录时间)	12ms	24ms
频率	220 kHz		LOGAMP_DIS_FIRST_GM	启用			

评估备注：

以此为起点时，几乎总是需要进行调优，以便在指定的 ToF 范围内实现所需的 VOUT 输出。当振铃是一个问题时，通过实验确定了四个突发脉冲，以通过相对较短的盲区满足宽 ToF 范围需求。当振铃时间不重要时，10 个突发脉冲会是不错的起点。另请注意，虽然建议在为空气耦合测量启用对数放大器级来开始进行调优，但是通过 LOGAMP_DIS_FIRST_GM 和 LOGAMP_DIS_LAST_GM 禁用第一级和最后一级可以减少阈值检测中的误差，因为本底噪声更低且更加稳定。但是，动态范围也会缩小。在此测试中，对于极短 ToF 或高 VDRV 测量，平滑的本底噪声优于动态范围。

由于建议在启用回波中断前需验证预期的 VOUT，故上述将禁用 ECHO_INT_COMP_EN。如果需要回波中断，一旦针对所需的 VOUT 调整器件设置，就可以通过 ECHO_INT_THR_SEL 位将阈值设置为必要的水平。

2.3.3 TDC1000 220kHz 配置

表 2-3. TUSS4470 建议的 1MHz 评估固件设置

TX 设置	短程值	中程值	RX 设置	值	输出设置	短程值	中程值
BURST_PULSE	1-3	10	BPF_HPF_FREQ	400p	ECHO_INT_COMP_EN	禁用	禁用

表 2-3. TUSS4470 建议的 1MHz 评估固件设置 (continued)

TX 设置	短程值	中程值	RX 设置	值	输出设置	短程值	中程值
HALF_BRG_MODE	启用	禁用	LOGAMP_DIS_LAST_GM	禁用	记录 (GUI 记录时间)	12ms	12ms
频率	1MHz		LOGAMP_DIS_FIRST_GM	禁用			
			BPF_BYPASS	Enabled			

评估备注：

带通滤波器可配置用于高达 500kHz。对于 1MHz 传感器操作，BPF_BYPASS 应设置为 1，BPF 转换为 HPF 且截止频率 BPF_HPF_FREQ 设置为 400kHz。在短程水耦合应用中，接收回波的动态范围应该足够大，而无需启用对数放大器。由于示波器具有更高的采样速率，因此使用示波器探测 VOUT 将得出比 GUI VOUT 图更准确的结果。通过主机 MCU 对 VOUT 采样的 ADC 在 1MSPS 的速率时进行采样。

2.3.4 TDC1000 220kHz 配置

由于 TDC1000 的架构针对更高频率的液耦合应用进行了优化，因此与 TUSS4470 时相比，利用 TDC1000 进行空气耦合评估时需要进行更多的微调以及具备更足的信心。表 2-4 提供了作为起点的建议值，允许 ToF 范围为 $128 \times T_0$ 到 $128 \times T_0 + 1024 \times T_0$ 。值以 GUI 格式提供。有关相应的寄存器值，请参阅 TDC1000-C2000EVM GUI 和 TDC1000 数据表的编程部分。有关短程 ToF 测量时间轴和 T_0 、 T_1 定义，请参阅附录 B。

表 2-4. TDC1000 空气耦合建议评估固件设置

GUI 设置	GUI 值	注释
TOF_MEAS_MODE	0	用于单稳态 ToF 测量的测试模式 0
Recieve Mode	单一回波或多重回波	
CLOCKIN_DIV	1 分频	通过 CLOCKIN_DIV 设置 T_0
FORCE_SHORT_TOF	禁用	短程 ToF 模式使得共模电压稳定时间 ($128 \times T_0$) 发生在 TX 突发之前，这样，COMPIN 信号噪声更少，监听周期可以最大化。
TOF_TIMEOUT_CTRL	$1024 \times T_0$	允许最大回波监听周期约 4.6ms。
NUM_TX	10- 15 个脉冲	这是产生强回波的良好起点。
NUM_RX	无 RX 事件计数	允许在 TOF_TIMEOUT_CTRL 持续期间生成 STOP 信号，避免因错误地生成 STOP 而导致测量结束。
PGA_GAIN	21dB	建议在空气耦合评估中使用最大增益。
ECHO_QUAL_THLD	-35 mV	可能需要使用最灵敏的回波阈值设置来触发 STOP。
LNA_FB	电阻	该频率范围内的传感器所必需的。
AUTOZERO_PERIOD	$64 \times T_0$	在短程 ToF 模式下，此周期发生在 TX 突发之前，可以根据需要进行调整。
SHRT_TOF_BLNK_PRD	$128 \times T_0$	这样可以有足够的时间让 TX 线路耦合的噪声稳定下来，并具有干净的 COMPIN 来查看回波。

评估备注：

重要信号：START、STOP、COMPIN、TX。

对于短程测量，可能需要缩短消隐周期，以便回波可以触发 STOP。根据传感器频率，传感器振铃衰减可能会将噪声耦合到 COMPIN 信号路径，从而导致在监听周期开始时错误地触发 STOP。如果出现这种情况，可以设置消隐周期来掩盖此噪声，或者设计人员自行采取其他方式来忽略错误的 STOP。基于此，可以在初始评估时设置 NUM_RX 事件计数不受限制。

2.3.5 TDC1000 1MHz

表 2-5 中列出的默认设置是水耦合 ToF 应用的良好起点。首次评估 TDC1000 时，建议使用这些设置进行简单的水箱测试。对于以下测量时序注释，T0 = 125ns (1/8MHz)。

表 2-5. TDC1000 水耦合建议评估固件设置

GUI 设置	GUI 值	注释
TOF_MEAS_MODE	0	用于单稳态 ToF 测量的测试模式 0
Recieve Mode	单一回波或多重回波	
CLOCKIN_DIV	1 分频	通过 CLOCKIN_DIV 设置 T0
FORCE_SHORT_TOF	禁用	标准 ToF 测量模式
TOF_TIMEOUT_CTRL	1024 × T0 (128 μs)	允许最大回波监听周期。
NUM_TX	4- 15 个脉冲	这是产生强回波的良好起点。
NUM_RX	1 STOP	允许更高的阈值，期望更强的回波脉冲，只需一个 STOP。
PGA_GAIN	6dB	0 - 6dB 应该足够
ECHO_QUAL_THLD	-220mV	默认值
LNA_FB	电容式	该频率范围内的传感器所必需的。
AUTOZERO_PERIOD	128× To (16 μs)	在标准 ToF 测量模式下，此周期恰好发生在监听周期之前。
TIMING_REG	30	有关更多信息，请参阅 [7]。
FORCE_SHORT_TOF	禁用	标准测量模式

评估备注：

有关详细步骤，可参阅 TDC1000-C2000EVM [TDC1000-C2000EVM 用户指南](#) 和 [如何为液位传感和流体 ID 选择和安装传感器](#)。

可以根据标准 ToF 测量的时间轴 (附录 B) 来确定适合此评估的储罐尺寸。假设具有 10 个 TX 脉冲并使用表 2-5 中的设置，测量范围可以根据以下时序表来确定 (T0 = 125ns, T1 = 1 μs)。

表 2-6. TDC1000 空气耦合测量时间轴示例

发送	等待	共模	自动置零	回波监听
NUM_TX × T1	(TIMING_REG-30) × 8 × T0	128 × T0	128 × T0	1024 × T0
10 μs	0 μs	16 μs	16 μs	128 μs

最小 ToF : (10 + 0 + 16 + 16) = 42 μs

最大 ToF : 42 μs + 128 μs = 170 μs

假设水中 c = 1480m/s，评估水箱中的水位应该介于 3.2cm 和 12.5cm 之间。应根据需要调整等待时钟周期以改变回波监听周期。

3 短程空气耦合测试结果

3.1 TUSS4470

对于每次测量，VOUT 波形都是通过 TUSS Generation III GUI 数据绘图工具捕获的。四幅图显示了接收回波波形的 TUSS4470 调节输出相对应的峰值，用于减小范围（增加水位）。图中所示的距离是在后处理中计算得出的。

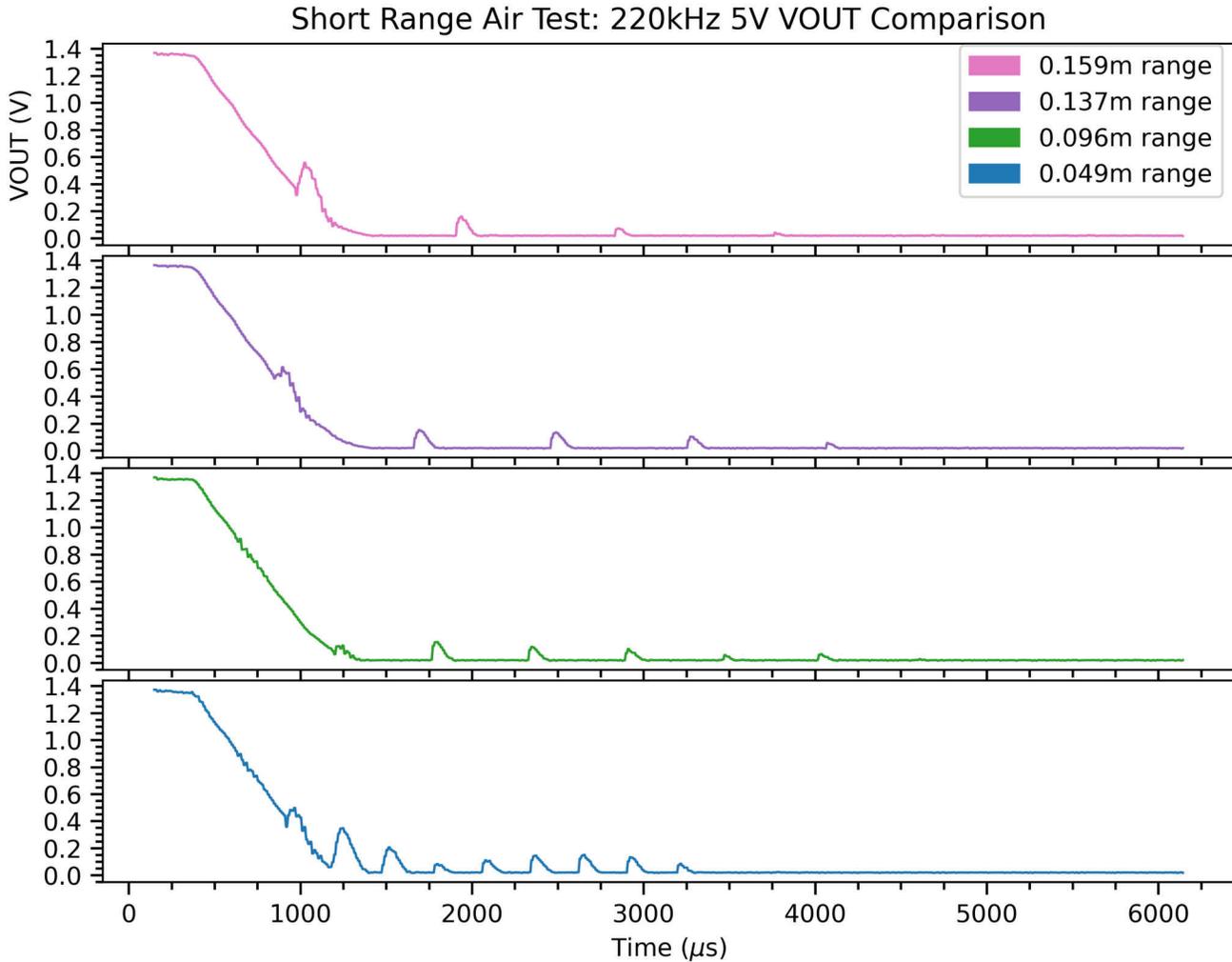


图 3-1. 短程空气耦合结果：TUSS4470

随着距离缩小，由于传感器和目标之间的超声波脉冲衰减减小，因此可以看到多次回波，这使得波在完全消散前能够来回反射多次。顶部波形 (0.159m) 显示了 1ms 标记处出现第一个回波，随后是第二个和第三个反射。在一定范围内，第一个回波落入盲区，无法通过 ADC 采样检测到。在具有高反射目标的短程应用中，后续反射可用于测量 ToF。在对此数据进行后处理时，ToF 计算为每对相邻回波之间的平均时间。软件阈值用于检测 VOUT 上每个脉冲的起始。在需要极短程测量的应用中，这种方法可用于测量回波太近而无法区分的范围。请注意，上文记录的 4.9cm 并不是此器件设置的最小范围。通过跟踪阈值交叉之间的样本数量，可以将 ToF 测量原理与实时处理算法一起使用。OUT4 引脚上可用的回波中断是一种用于测量 ToF 的更经济选项，然而回波脉冲必须达到 0.4V 的最小中断阈值。

3.2 TDC1000

这里进行了五次测量，每次测量的范围都在缩小（增加水位），由不同的颜色表示，如图 3-2 中所示。COMPIN 信号由示波器探测，下方数据叠加了每次测量数据。COMPINI 图下方显示了 START 及对应的 STOP 脉冲。STOP 脉冲在时间上与各自的 COMPIN 回波相对应。叠加 COMPIN 信号进行视觉比较，回波脉冲后进行数据修剪，以避免视觉数据重叠。START 脉冲在时间 t=0 处以黄色显示。

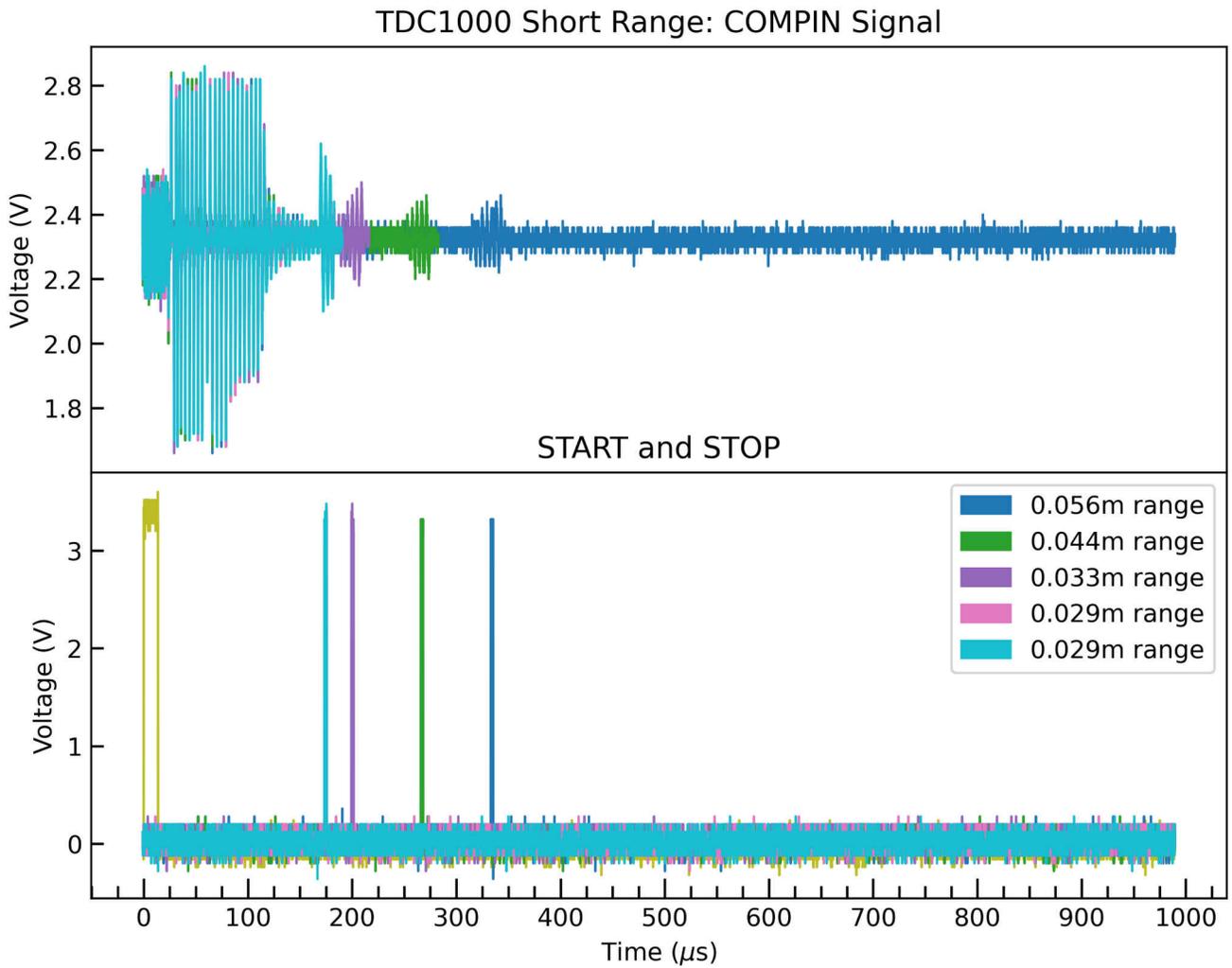


图 3-2. 短程空气耦合结果：TDC1000

在 TDC1000 短程测量模式下，最小范围直接由突发脉冲时间、消隐时间和 TX 振铃衰减时间决定。消隐时间设置为延迟监听周期，直到传感器振铃刚好低于 ECHO_QUAL_THLD。上述结果表明，消隐时间设置为将监听周期延迟到大约 175 μs，这样可以避免由振铃噪声触发的假 STOP 脉冲。请注意，粉红色和蓝绿色 COMPIN 信号都是在监听周期开始时测得的，与其他数据相比，具有平坦的前沿包络。当回波脉冲被消隐周期部分截断时，便会出现这种情况。像这样的部分回波必须予以忽略，因为它并不代表真正的 ToF。为了确保进行真正的测量，可能需要在消隐周期结束和最小 ToF 测量之间留出一些裕量。忽略此处的最后一次测量，通过此设置准确测量的最小 ToF 位于从水位到传感器相距 3.3cm 的地方。

4 中程空气耦合测试结果

此中程测试比较了 T USS4470 和 TDC1000 在空气耦合评估中的多功能性。对于下文所示的 T USS4470 5V VDRV 测试，保留了短程器件设置，以显示此 220kHz 设置可实现的整个范围。对于 T USS4470 35V VDRV 测试，则更改了器件电源设置，以适应提供的外部电压。TDC1000 中程测试是在标准 ToF 测试模式下进行的。

4.1 T USS4470

4.1.1 概念

与短程测试相似，该测量范围是近似的，然后进行四次测量来显示逐渐接近范围末端的进展。采用上文讨论的阈值法来计算 VOUT 上的单次回波脉冲的 ToF。第一个图中标记了阈值交叉。

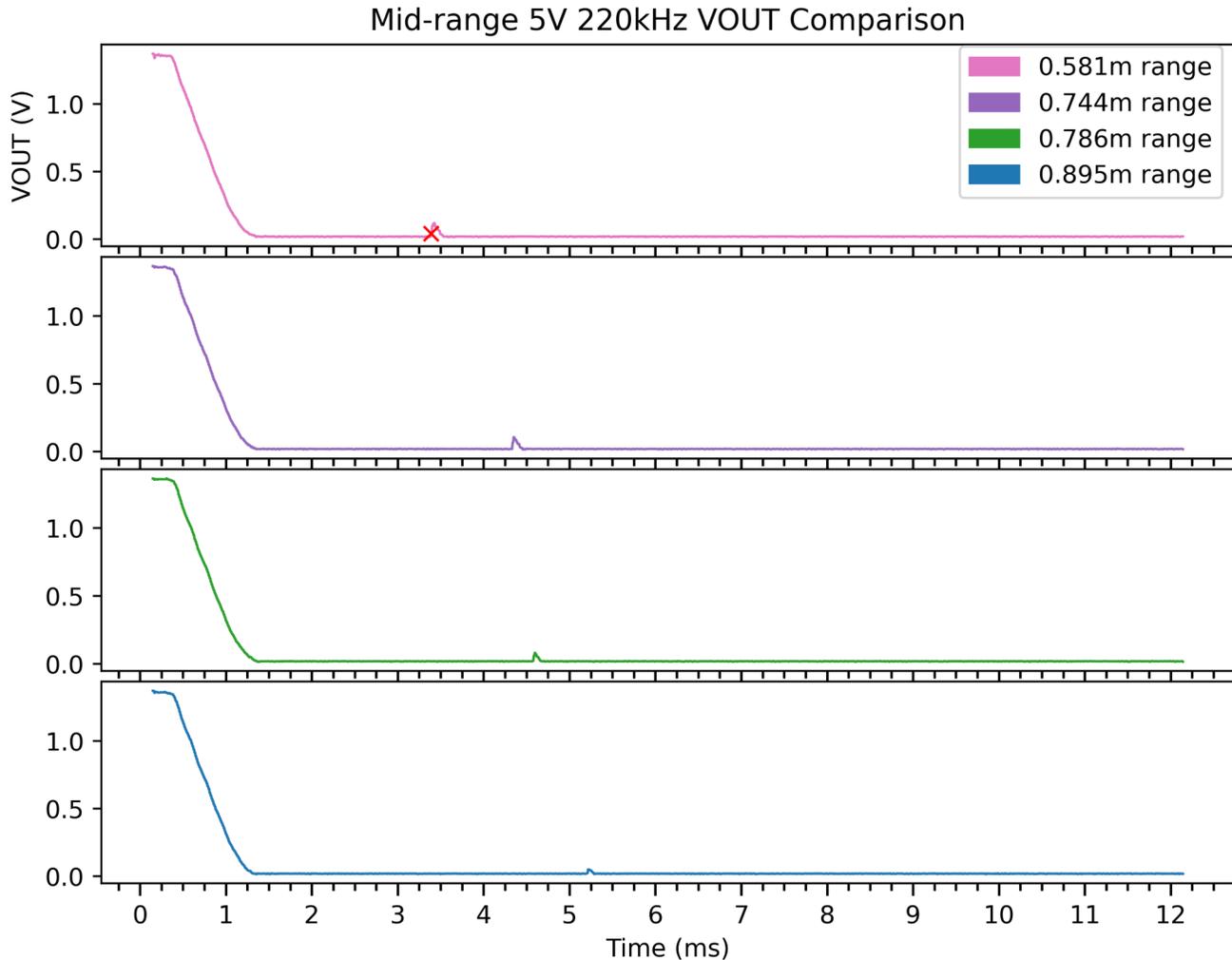


图 4-1. 中程空气耦合结果：T USS4470

此测试显示的范围可高达约 0.895m。应用的全部有用范围最终取决于测量的可容许 SNR 和可靠性。

4.1.2 TUSS4470 35V 结果

使用配置为 35V 的 TUSS4470 对 VDRV 进行 5V 中程测试。图 4-2 中记录并显示了产生的 VOUT 图。

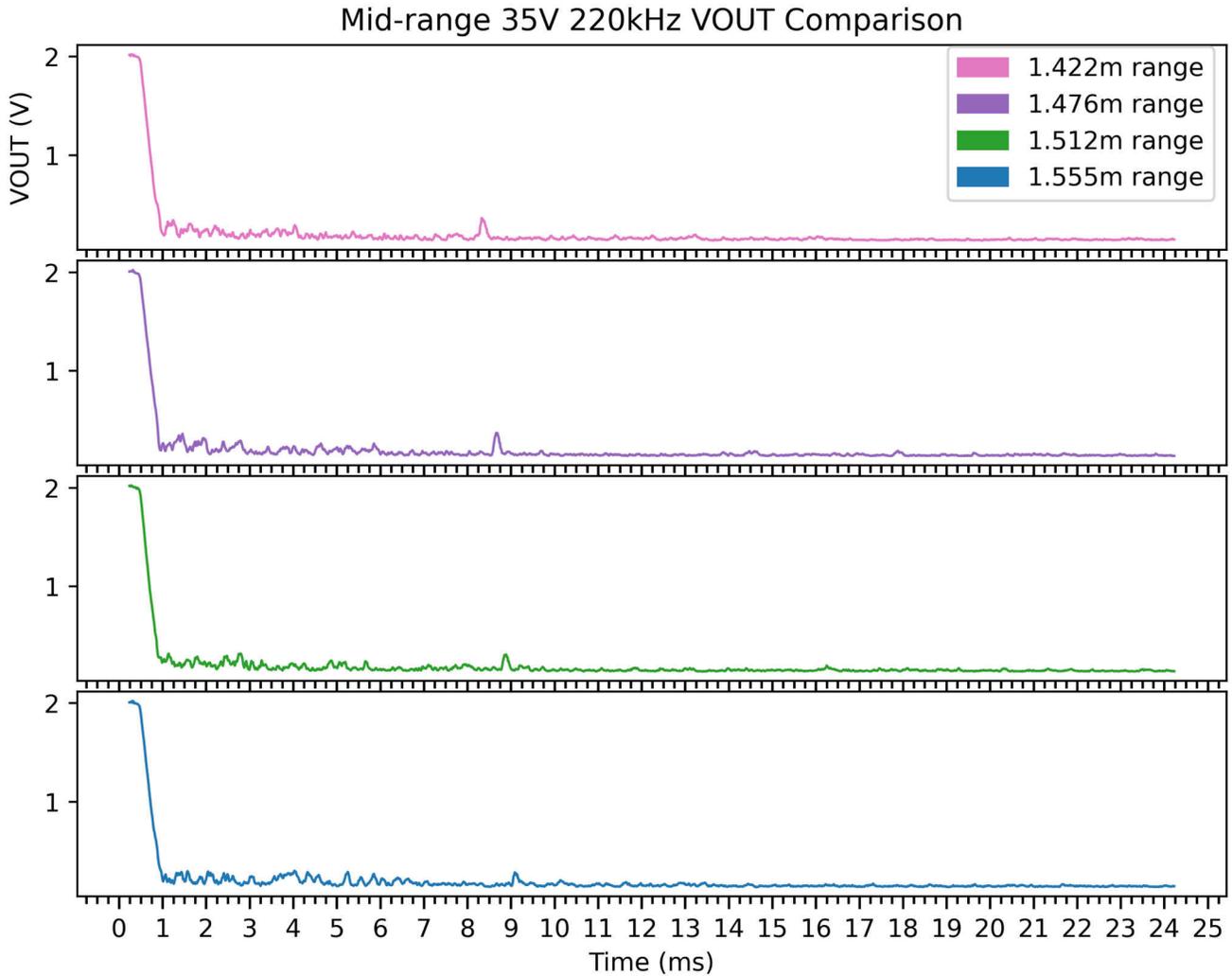
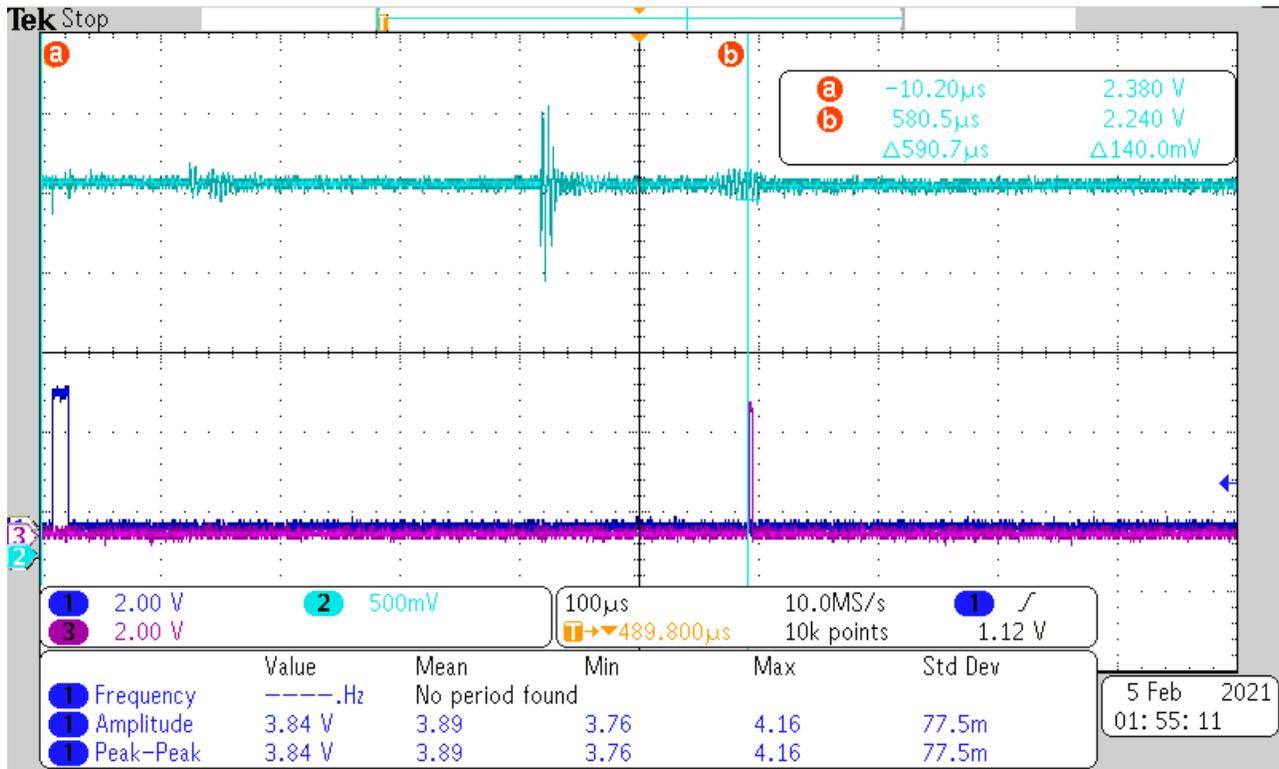


图 4-2. 中程空气耦合结果：TUSS4470

35V 的传输电压大大增加了该范围。SNR 不像 5V 测试所示那样有利。启用对数放大器级并没有在视觉上提高 SNR，因此为了更好地与 5V 测试进行比较，禁用对数放大器。如前所述，ToF 计算取决于阈值交叉，在 SNR 较低时，这一过程更加困难。

4.2 TDC1000

进行了一系列的测量来通过实验确定上限边界。CH1 : START , CH2 : COMPIN , CH3 : STOP

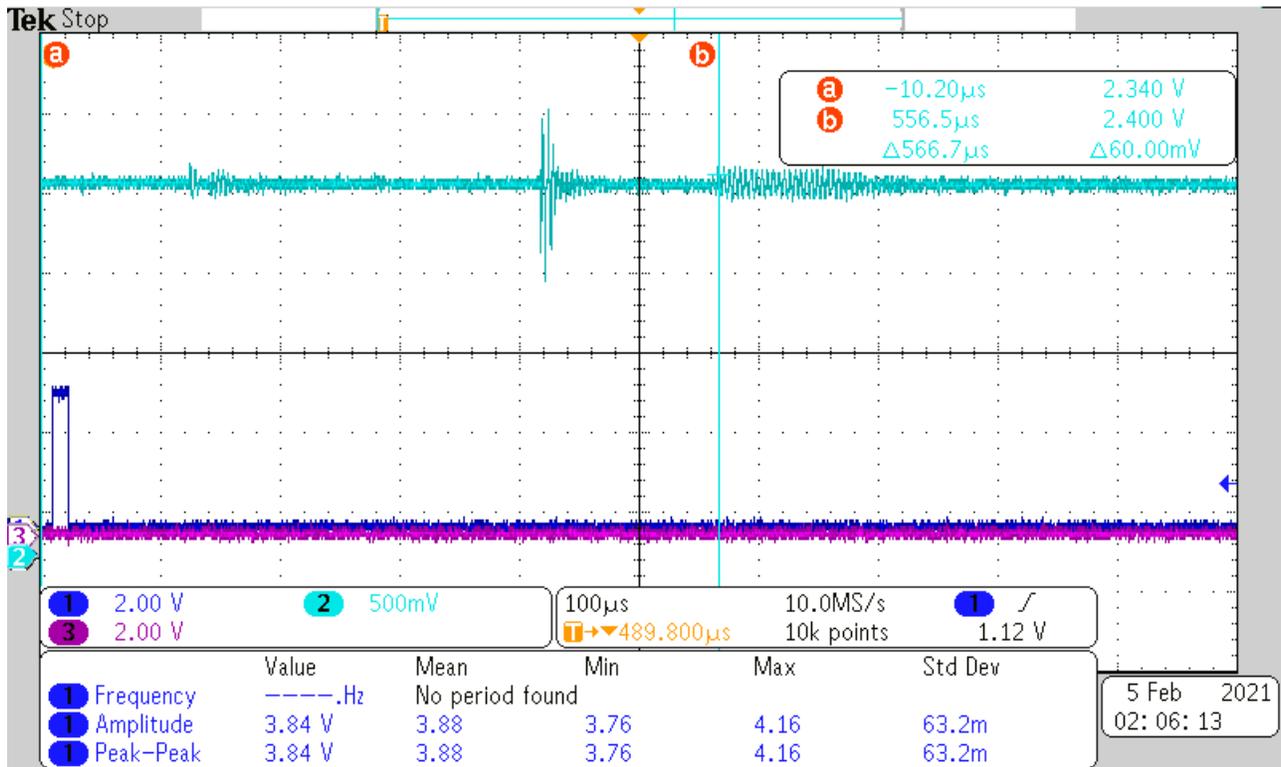


DPO3034 - 12:04:50 PM 2/4/2021

图 4-3. 中程空气耦合结果 : TDC1000

标准 ToF 测量模式用于预测更长的 ToF，然而，这不是必需的。由于最大范围受到回波衰减限制，因此在短程 ToF 模式下也会看到类似的结果。在标准模式下，在自动归零期间 COMPIN 引脚上会出现噪声，不应将这个噪声误认为是接收到的回波。可靠范围在大约 10cm 处结束。超过 10cm 后，信号会变得非常微弱，而无法可靠地触发阈值为 35mV 的停止脉冲。

在图 4-4 中，该信号过于微弱，无法触发停止。



DPO3034 - 12:15:55 PM 2/4/2021

图 4-4. 中程空气耦合结果：TDC1000

5 短程水耦合测试结果

5.1 TUSS4470

通过调整小型亚克力水箱的水位对不断降低的水位进行了四次测量。使用了节 2.2 中所述的 1MHz Steminc 传感器。在此传感器频率下，建议使用示波器通过 MSP430F5529LP ADC 和 GUI 显示来查看 VOUT。

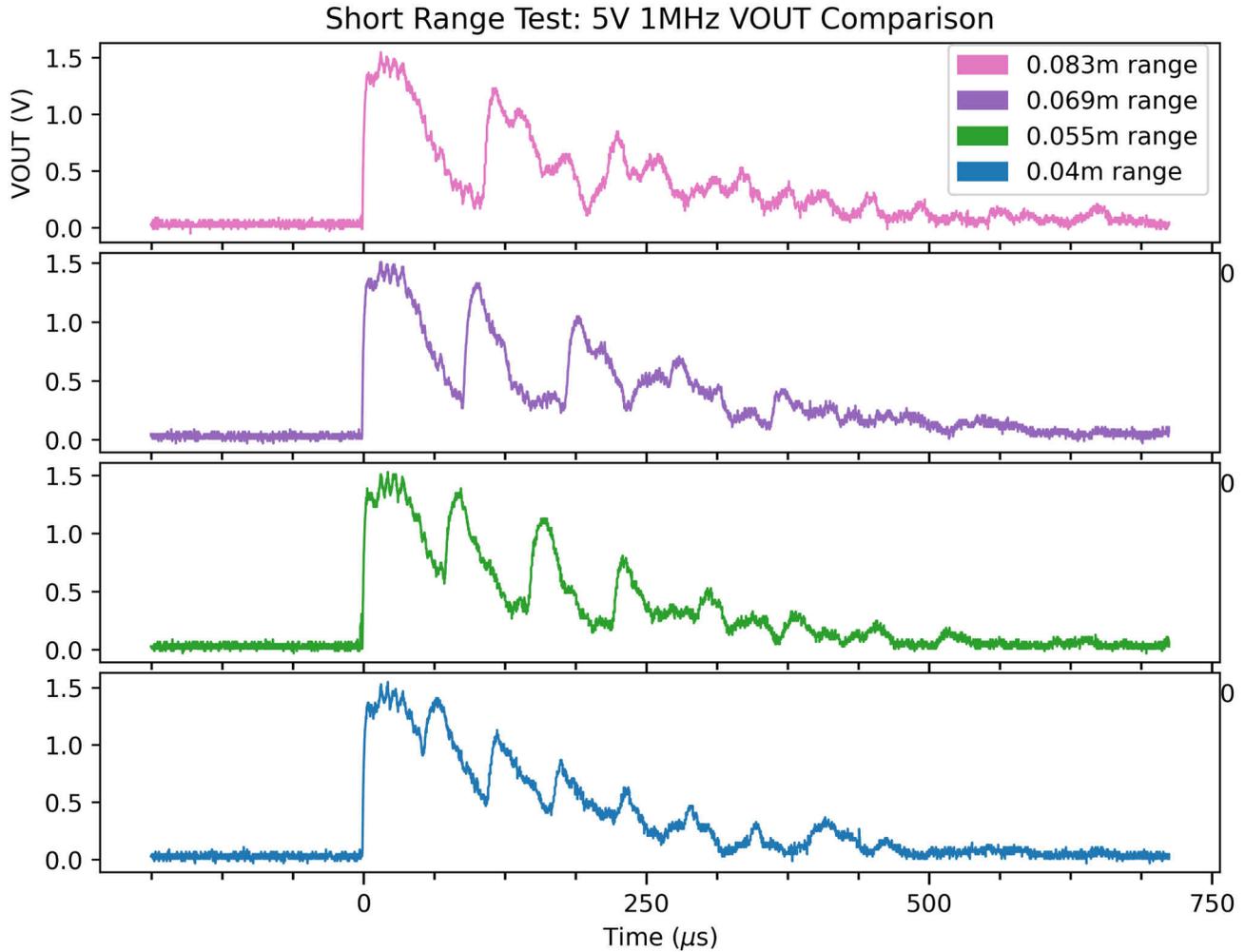
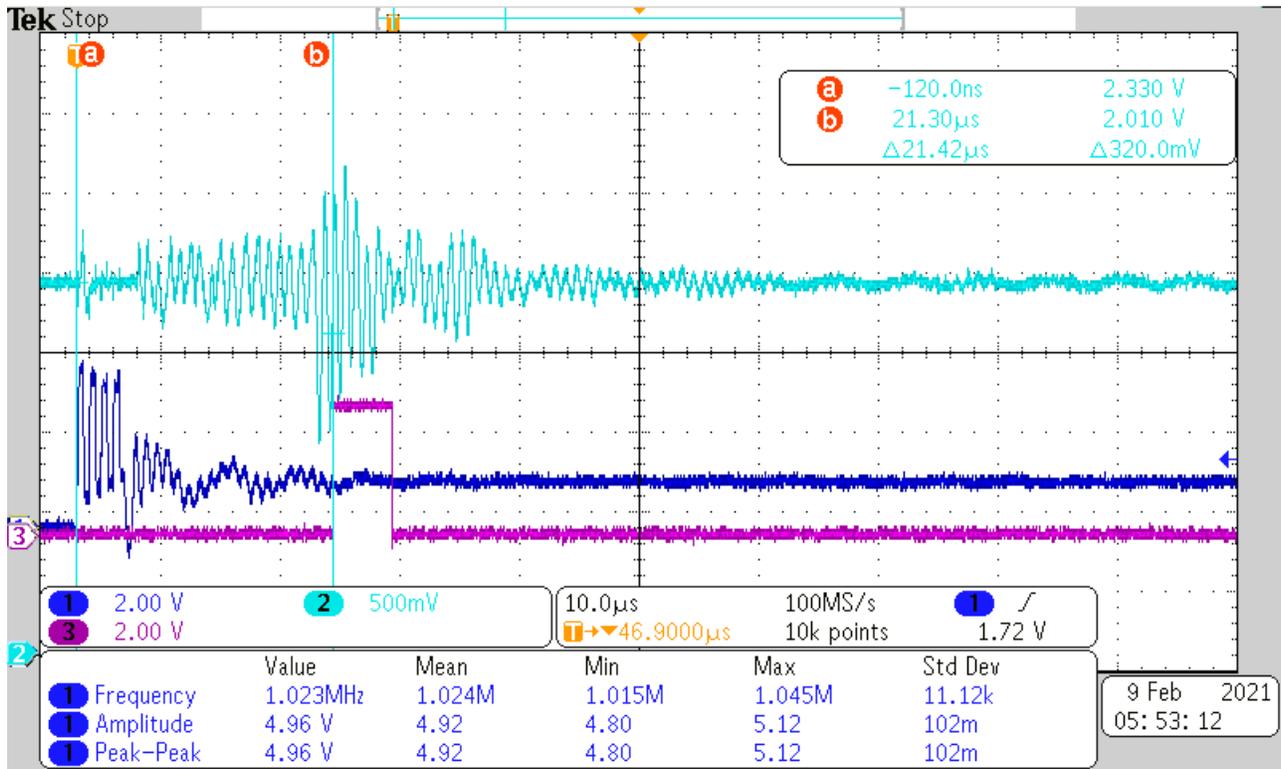


图 5-1. 短程水耦合结果：TUSS4470

在后处理中，通过对 TX 脉冲和 VOUT 上显示的首次接收回波进行阈值比较计算 ToF。后续回波脉冲显示了不断衰减的超声回波反射，短程空气耦合数据中也可以看到。这种方法的最小可删除水位为 4cm。

5.2 TDC1000

TDC1000 亚克力水箱最小 ToF 测量。CH1 : TX , CH2 : COMPIN , CH3 : STOP



DPO3034 - 4:02:53 PM 2/8/2021

图 5-2. 短程水耦合结果 : TDC1000

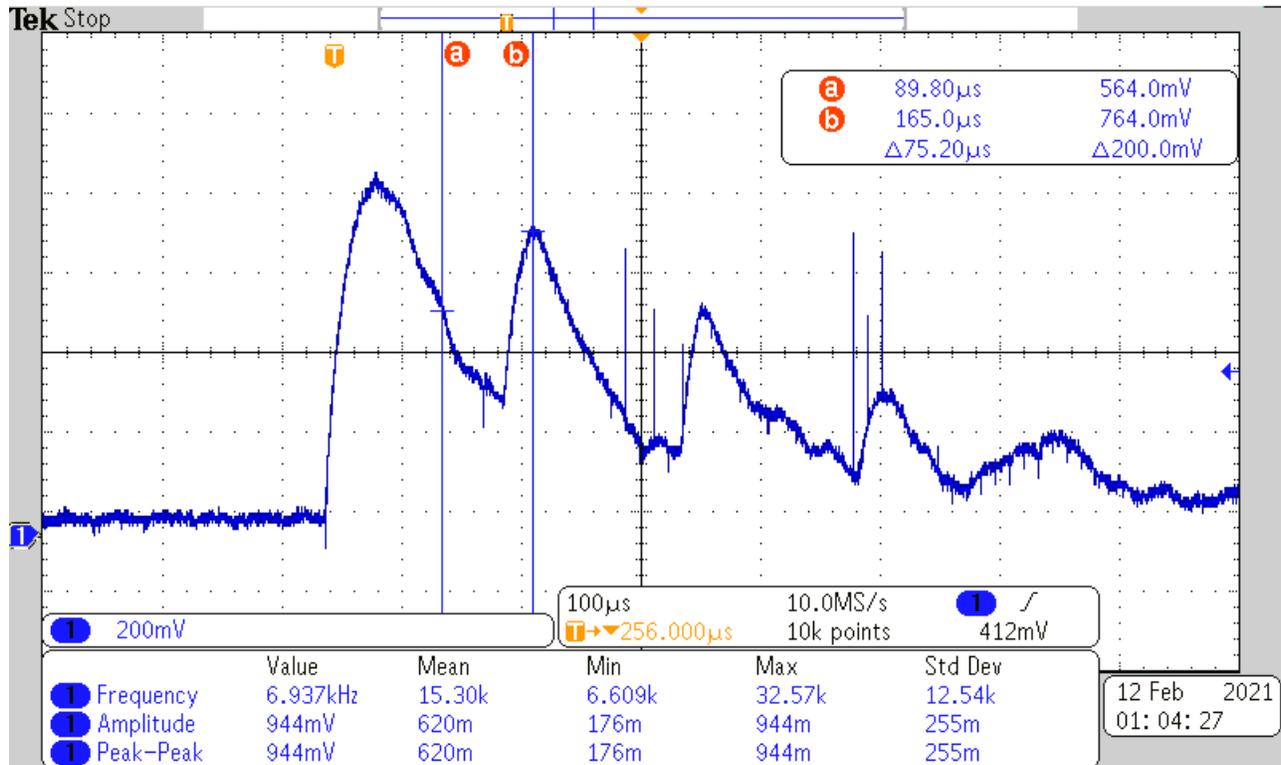
此处所示的最小可检测 ToF 接近于预期的 $20 \mu\text{s}$ ，因为此 TDC1000 配置的最小可测量 ToF 为 $(4 \times T1 + 128 \times T0)$ 。注意，可精确检测的最小 ToF 略大于可能的最小 ToF，因此始终建议按器件和应用确定最小值。此处测量的 ToF 在水中约 3.1cm。

6 阻性阻尼器件比较

本节比较了将阻尼电阻器与 1MHz 传感器并联安装以缩小最小可能范围的选择和优缺点。此处使用了水耦合亚克力水箱液位测量测试夹具。

6.1 TUSS4470

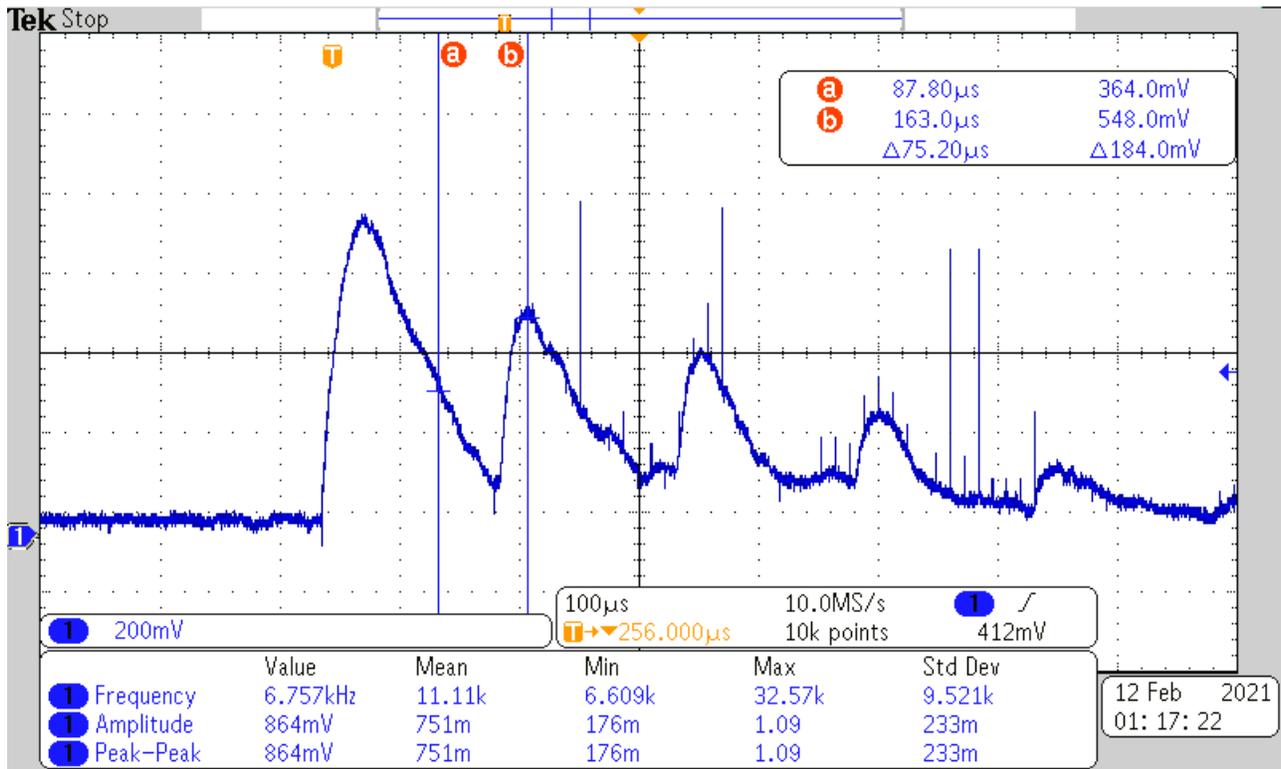
图 6-1 显示了 TUSS4470 VOUT 信号：分别为无阻尼、500Ω 阻尼以及 75Ω 阻尼。光标显示了 TX 脉冲和第一个回波脉冲之间的距离。为了量化阻尼效应，光标“a”的位置与 TX 脉冲上的 VOUT 交叉，交叉点在将第一个回波脉冲前沿的最小值和最大值平分的电压电平处。从 TX 衰减开始到第一个上升沿，可以采用另一种有用的措施。



DPO3034 - 11:14:11 AM 2/11/2021

图 6-1. TUSS4470 1MHz 水位测量：无阻尼

图 6-2 显示了 10kΩ 电位器，其与横跨 TUSS4470EVM 上 J3 的传感器并联焊接，并提供了可调的阻尼电阻。



DPO3034 - 11:27:04 AM 2/11/2021

图 6-2. TUSS4470 1MHz 水位测量：500Ω 阻尼

图 6-3 比较了常数 ToF 测量，阻尼测量显示了在第一个回波脉冲到达之前，随着电阻降低，衰减更快。此处使用的计时指标也从 $75.2 \mu\text{s}$ 增加到 $93.2 \mu\text{s}$ ，这表明最小范围可以通过阻性阻尼有所改善。阻性阻尼的缺点是由于传感器驱动器上的负载增加而导致范围缩小或电流消耗增加。

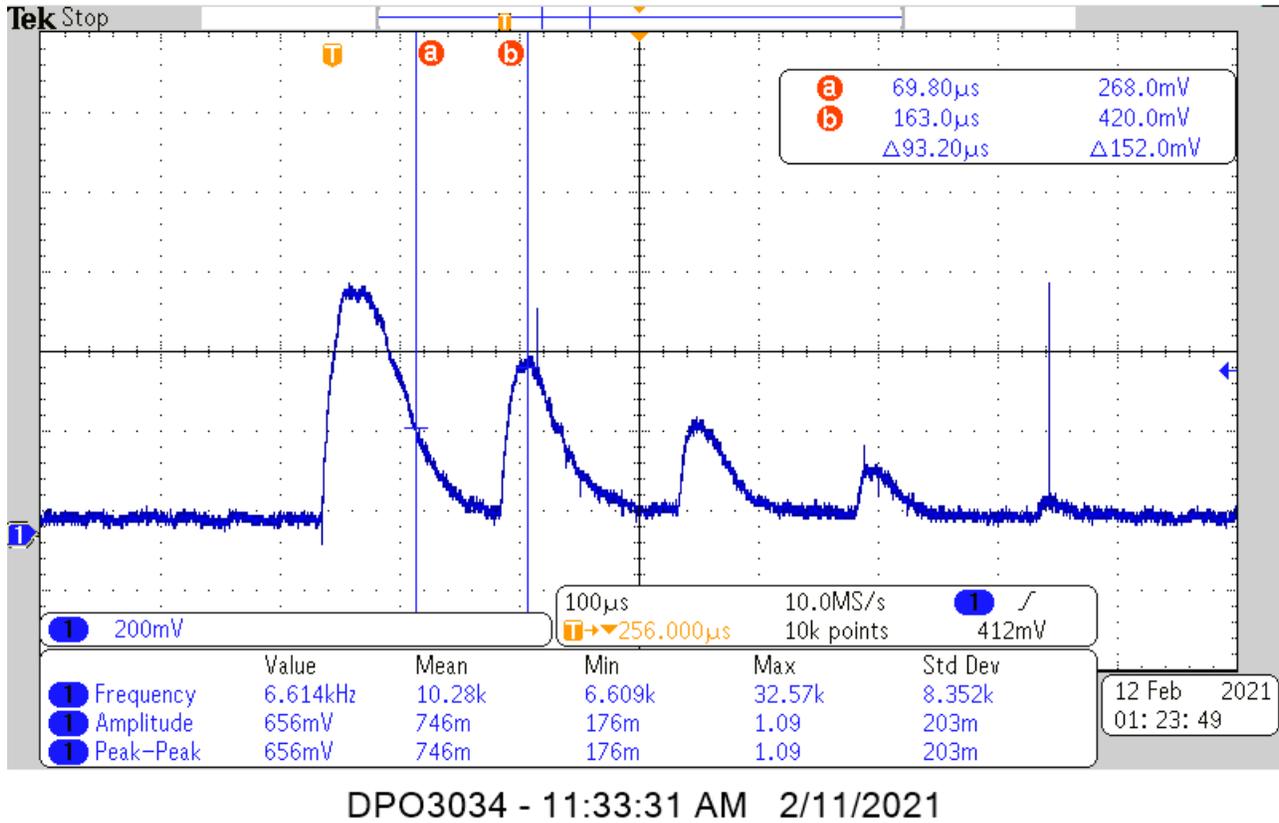
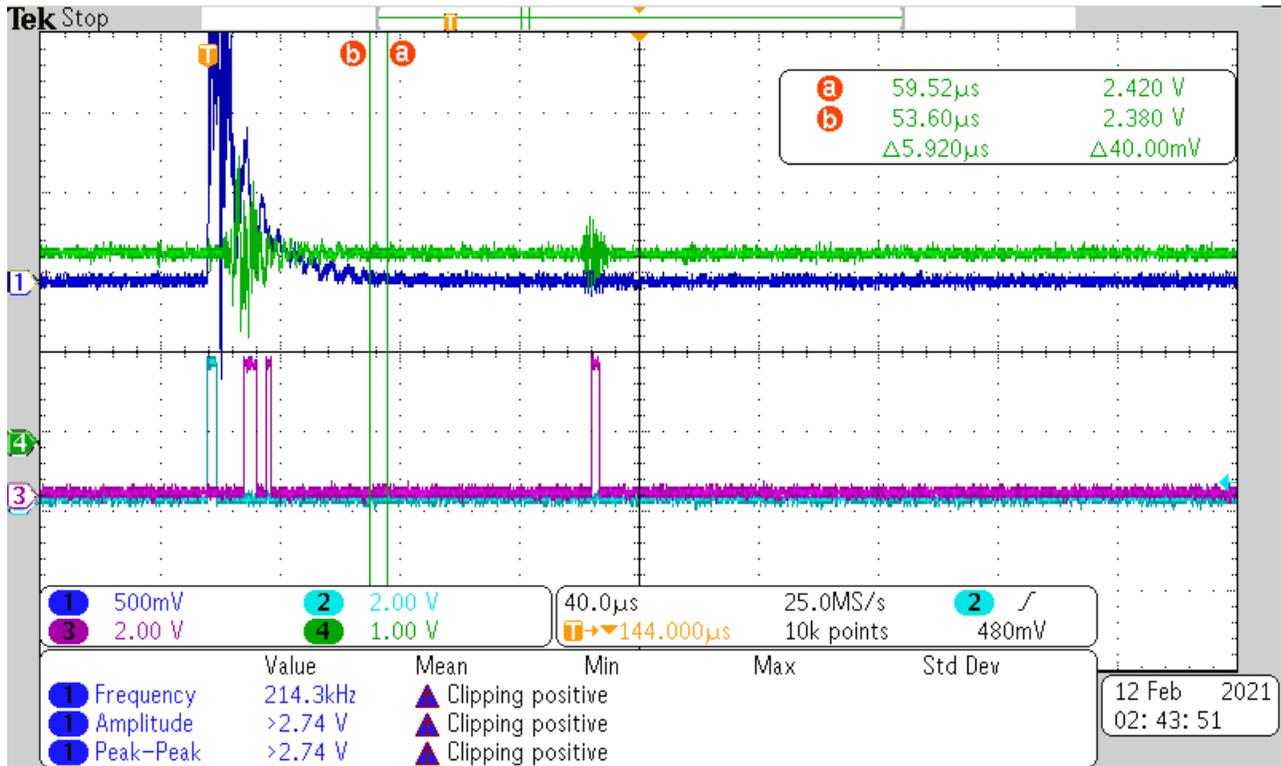


图 6-3. TUSS4470 1MHz 水位测量 : 75Ω 阻尼

6.2 TDC1000

为了显示阻尼电阻器的作用，TX (CH1)、COMPIN (CH4)、START (CH2) 和 STOP (CH3)使用 $10\text{k}\Omega$ 、 1250Ω 和 150Ω 阻尼显示在三个 ToF 液位测量图中。在没有阻尼的情况下， $16\mu\text{s}$ 的消隐周期足以掩盖对 COMPIN 的振铃干扰，因此使用 $8\mu\text{s}$ 的消隐周期可以改进待观察的最小测量范围。

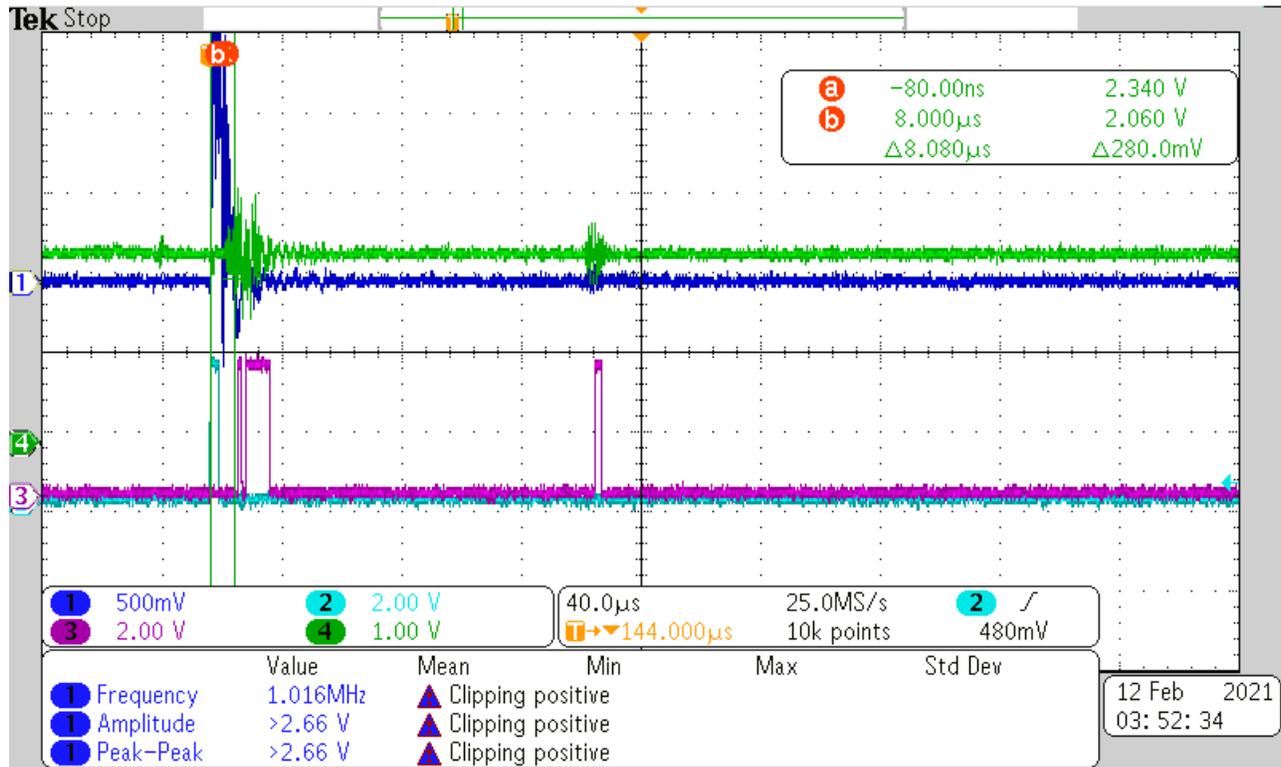
COMPIN 上的噪声与预期的 TX 衰减相匹配，这会导致恰好在 $8\mu\text{s}$ 消隐周期结束后生成错误的 STOP。



DPO3034 - 12:53:32 PM 2/11/2021

图 6-4. TDC1000 1MHz 水位测量： $10\text{k}\Omega$ 阻尼

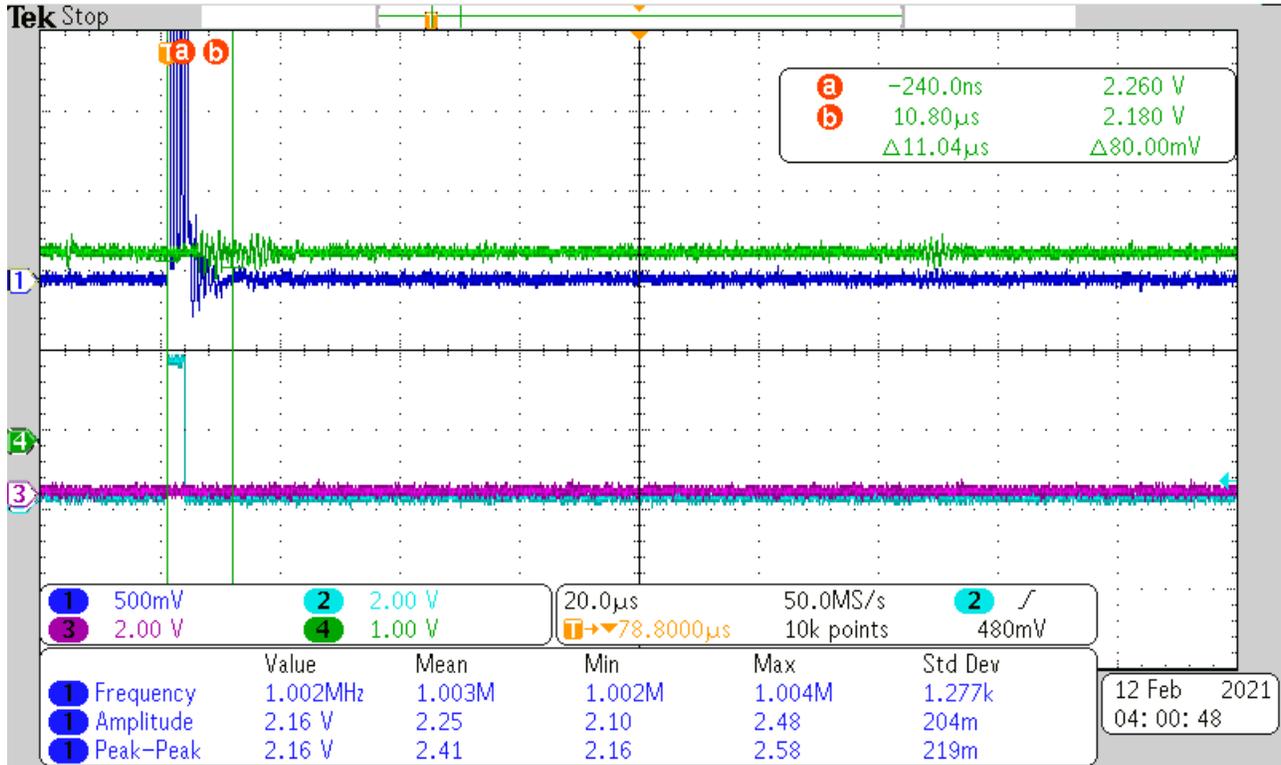
该噪声仍旧较大，足以提前触发 STOP，不过 TX 衰减较短。



DPO3034 - 2:02:14 PM 2/11/2021

图 6-5. TDC1000 1MHz 水位测量 : 1.25kΩ 阻尼

这里，TX 衰减被很好地截断，但回波也衰减到阈值以下。在短程液体测量中，增益通常会增加到足够大，以生成 STOP，但如果回波振幅与 TX 噪声振幅之比大于 1，这可能只会提高短程性能。由于噪声和回波都会被同样地衰减，因此 TDC1000 的阈值检测法并不适合这种阻性阻尼技术。



DPO3034 - 2:10:32 PM 2/11/2021

图 6-6. TDC1000 1MHz 水位测量：150Ω 阻尼

7 总结

TUSS4470 和 TDC1000 之间的水耦合和空气耦合液位传感比较突出了器件评估、性能和多功能性方面。总体而言，由于采用升级版 EVM 设计、支持宽发射电压范围的多功能传感器驱动器拓扑以及 VOUT 包络 RX 输出，TUSS4470 器件经证明在空气和水耦合应用中使用更简单、用途更为广泛。阻性阻尼也表明使用 TUSS 器件提高性能的巨大可能性。尽管 TUSS4470 上也可以使用阈值触发中断，但是相对于 TDC1000 上的阈值触发停止时间方法，使用 ADC 采样来确定 ToF 能够方便开发人员更好地进行控制，从而可以改善短程性能。与 TDC1000 相对，TUSS4470 所显示的更宽的空气耦合测量范围证明了其在空气耦合应用中的优越性。而在水耦合测试中，TDC1000 和 TUSS4470 表现相当。由于其高频传感器的可比性，TDC1000 在某些水耦合和固态耦合 ToF 测量应用中可能是首选。

8 参考文献

1. 德州仪器 (TI) : [超声波传感基础知识](#)
2. 德州仪器 (TI) : [使用超声波传感来监测储罐液位](#)
3. 德州仪器 (TI) : [PGA460 超声波模块硬件和软件优化](#)
4. 德州仪器 (TI) : [如何为液位传感和流体 ID 选择和安装传感器](#)
5. 德州仪器 (TI) : [带对数放大器的 TUSS4470 直接驱动超声波传感器 IC 数据表](#)
6. 德州仪器 (TI) : [用于 TUSS44x0 超声波传感器的 EVM 用户指南](#)
7. 德州仪器 (TI) : [用于液位传感、流量传感、浓度传感以及接近传感应用的 TDC1000 超声波传感模拟前端 \(AFE\) 数据表](#)
8. 德州仪器 (TI) : [TDC1000-C2000EVM 用户指南](#)
9. [TUSS4470 TI 精密实验室视频系列](#)
10. [超声波 AFE 比较](#)

A 附录 A

A.1 TUSS4470 : 滤波电容器选型

Freq (kHz)	CINN (nF)	CFLT (nF)	210	20.2101515	3.031523	410	10.35154101	1.552731
30	141.4710605	21.22066	220	19.29150825	2.893726	420	10.10507575	1.515761
40	106.1032954	15.91549	230	18.45274703	2.767912	430	9.87007399	1.480511
50	84.88263632	12.7324	240	17.68388257	2.652582	440	9.645754127	1.446863
60	70.73553026	10.61033	250	16.97652726	2.546479	450	9.431404035	1.414711
70	60.63045451	9.094568	260	16.32358391	2.448538	460	9.226373513	1.383956
80	53.0516477	7.957747	270	15.71900673	2.357851	470	9.030067693	1.35451
90	47.15702018	7.073553	280	15.15761363	2.273642	480	8.841941283	1.326291
100	42.44131816	6.366198	290	14.6349373	2.195241	490	8.661493502	1.299224
110	38.58301651	5.787452	300	14.14710605	2.122066	500	8.488263632	1.27324
120	35.36776513	5.305165	310	13.69074779	2.053612	510	8.32182709	1.248274
130	32.64716781	4.897075	320	13.26291192	1.989437	520	8.161791953	1.224269
140	30.31522726	4.547284	330	12.8610055	1.929151	530	8.007795879	1.201169
150	28.29421211	4.244132	340	12.48274063	1.872411	540	7.859503363	1.178926
160	26.52582385	3.978874	350	12.1260909	1.818914	550	7.716603301	1.15749
170	24.96548127	3.744822	360	11.78925504	1.768388	560	7.578806814	1.136821
180	23.57851009	3.536777	370	11.47062653	1.720594	570	7.445845291	1.116877
190	22.33753587	3.35063	380	11.16876794	1.675315	580	7.317468648	1.09762
200	21.22065908	3.183099	390	10.88238927	1.632358	590	7.193443756	1.079017
			400	10.61032954	1.591549	600	7.073553026	1.061033

图 A-1. TUSS4470EVM 电容器选型表

610	6.957593141	1.043639	810	5.239668908	0.78595
620	6.845373896	1.026806	820	5.175770507	0.776366
630	6.736717168	1.010508	830	5.113411826	0.767012
640	6.631455962	0.994718	840	5.052537876	0.757881
650	6.529433563	0.979415	850	4.993096254	0.748964
660	6.430502751	0.964575	860	4.935036995	0.740256
670	6.334525098	0.950179	870	4.878312432	0.731747
680	6.241370317	0.936206	880	4.822877063	0.723432
690	6.150915675	0.922637	890	4.768687433	0.715303
700	6.063045451	0.909457	900	4.715702018	0.707355
710	5.977650445	0.896648	910	4.663881116	0.699582
720	5.894627522	0.884194	920	4.613186756	0.691978
730	5.8138792	0.872082	930	4.563582598	0.684537
740	5.735313265	0.860297	940	4.515033847	0.677255
750	5.658842421	0.848826	950	4.467507175	0.670126
760	5.584383968	0.837658	960	4.420970641	0.663146
770	5.511859501	0.826779	970	4.375393625	0.656309
780	5.441194636	0.816179	980	4.330746751	0.649612
790	5.372318754	0.805848	990	4.287001834	0.64305
800	5.30516477	0.795775	1000	4.244131816	0.63662

图 A-2. TUSS4470EVM 电容器选型表 (续)

B 附录 B
B.1 TDC1000 其他

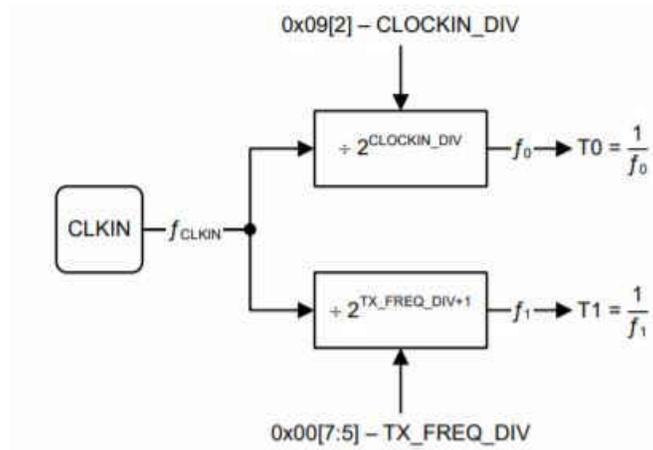


图 B-1. T0 和 T1 定义

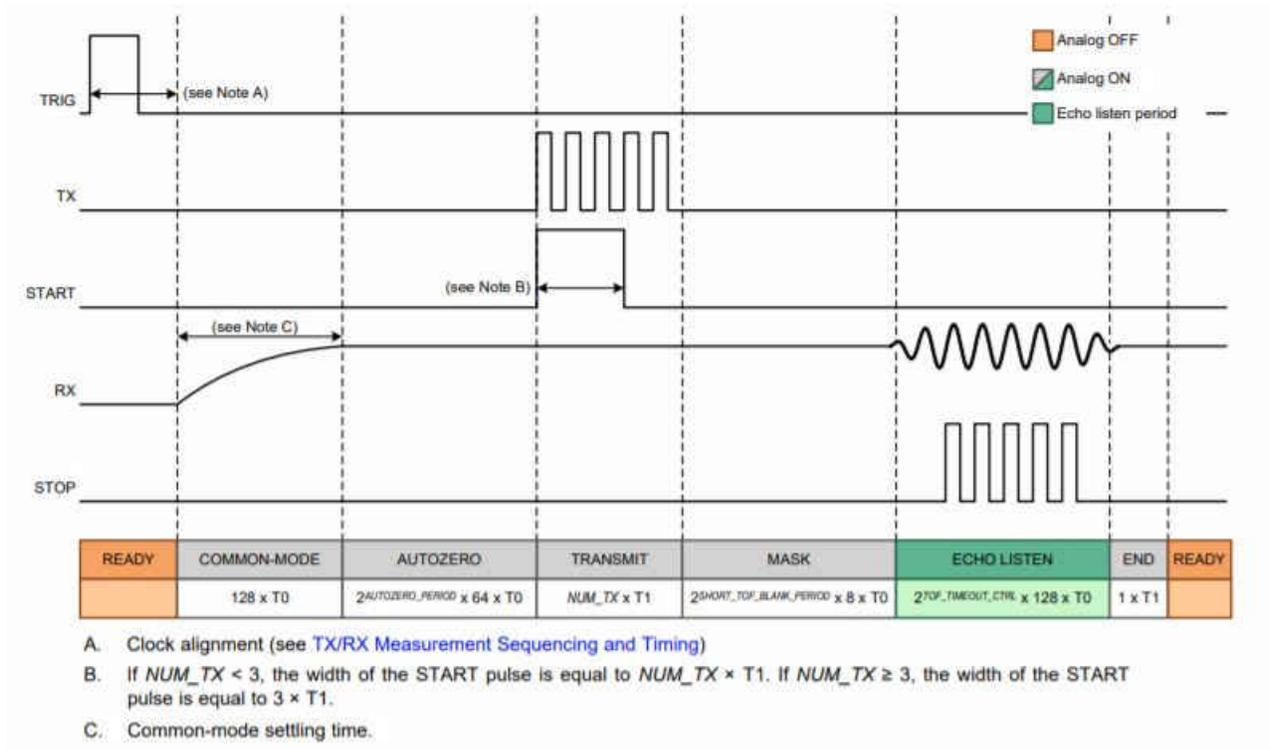
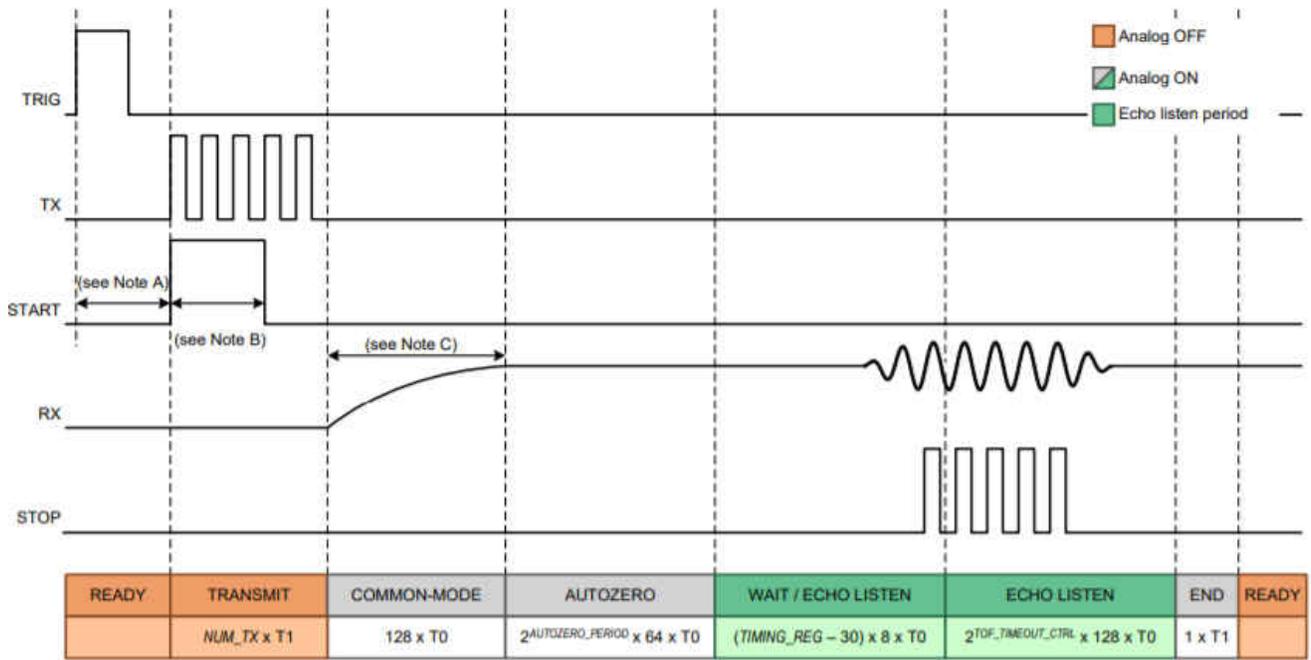


图 B-2. 短程 ToF 测量器件配置图



- A. Clock alignment (see TX/RX Measurement Sequencing and Timing)
- B. If $NUM_TX < 3$, the width of the START pulse is equal to $NUM_TX \times T1$. If $NUM_TX \geq 3$, the width of the START pulse is equal to $3 \times T1$.
- C. Common-mode settling time.

图 B-3. 标准 ToF 测量硬件配置图

B.2 TDC1000-C2000EVM 原理图

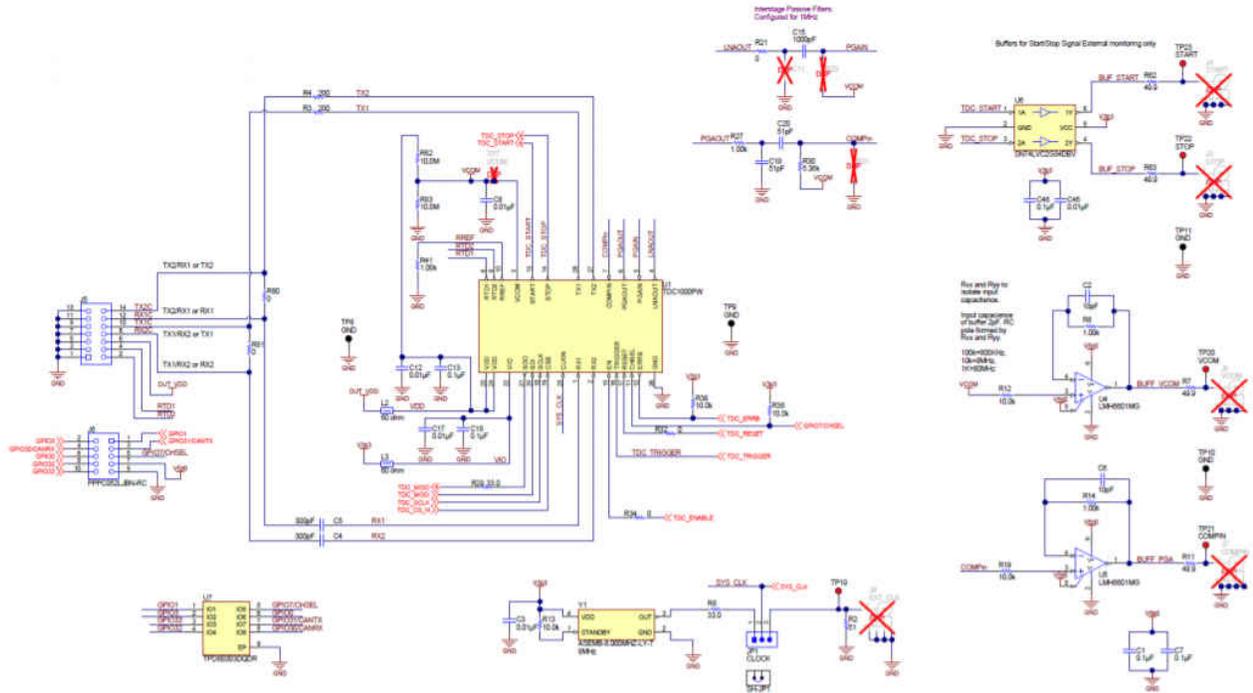


图 B-4. TDC1000-C2000EVM 局部原理图

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司