

TI Designs LIDAR 脉冲飞行时间参考设计



说明

此参考设计记录了如何基于时数转换器 (TDC) 为 LIDAR 设计时间测量后端以及相关的前端。

资源

TIDA-00663	设计文件夹
TDC7200	产品文件夹
OPA857	产品文件夹
TLV3502	产品文件夹
UCC27321	产品文件夹
TPL0202	产品文件夹
TPS22968	产品文件夹
SN74LVC2G14	产品文件夹
SN74LVC1G08	产品文件夹

特性

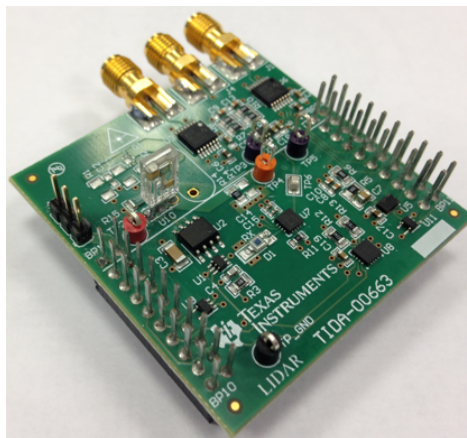
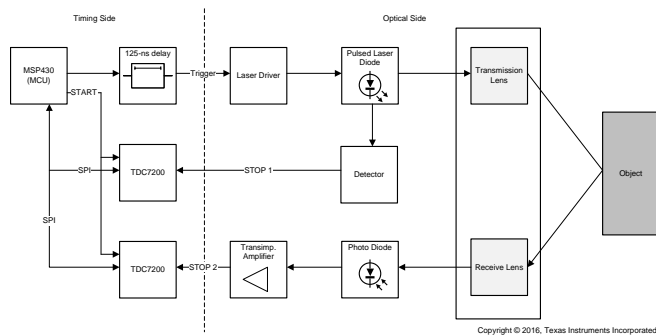
- LIDAR 脉冲飞行时间 (ToF) 测量
- 系统级距离分辨率 < 1cm
- TDC 分辨率 1.65cm, 白噪声 1.05cm RMS
- TX 能量: 40ns 时间内的峰值为 70W

应用

- 工厂自动化光学接近传感器
- 工厂自动化光学液位传感器
- 工厂自动化体积扫描仪
- 无人机



咨询我们的 E2E™ 专家



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统说明

许多应用无法通过建立与目标的实际接触来测量与目标之间的距离。典型示例包括测量后勤中心的传送带上是否存在物体，以及确保在运动中的机械手周围保持安全距离等等。适用于非接触距离测量的可能选项包括涡流、超声波和光。

光探测和测距 (LIDAR) 系统利用光在物体之间传输所需的时间尝试测量与此目标之间的距离。可使用高速模数转换器 (ADC) 或时数转换器 (TDC) 来构建 LIDAR 系统。

此参考设计展示了如何基于 TDC 为 LIDAR 设计时间测量后端以及相关的前端。

1.1 主要系统规格

表 1. 主要系统规格

参数	规范	详细信息
ToF 测量	脉冲 ToF	节 2.3.1
ToF 分辨率	55ps	一次性
ToF 准确度		节 2.3.3
ToF 可重复性	35ps	节 2.3.3
TX 功率峰值	70W	
TX 脉宽	40ns	
TX 脉冲上升时间	10ns	
最大距离	> 100m ⁽¹⁾	节 2.3.2
抽样率	> 50kHz	
SNR 的关系	88dB	按设计要求 (节 2.3.4)

⁽¹⁾ 终端系统性能可能会因所选的光学器件而异。

2 系统概述

2.1 方框图

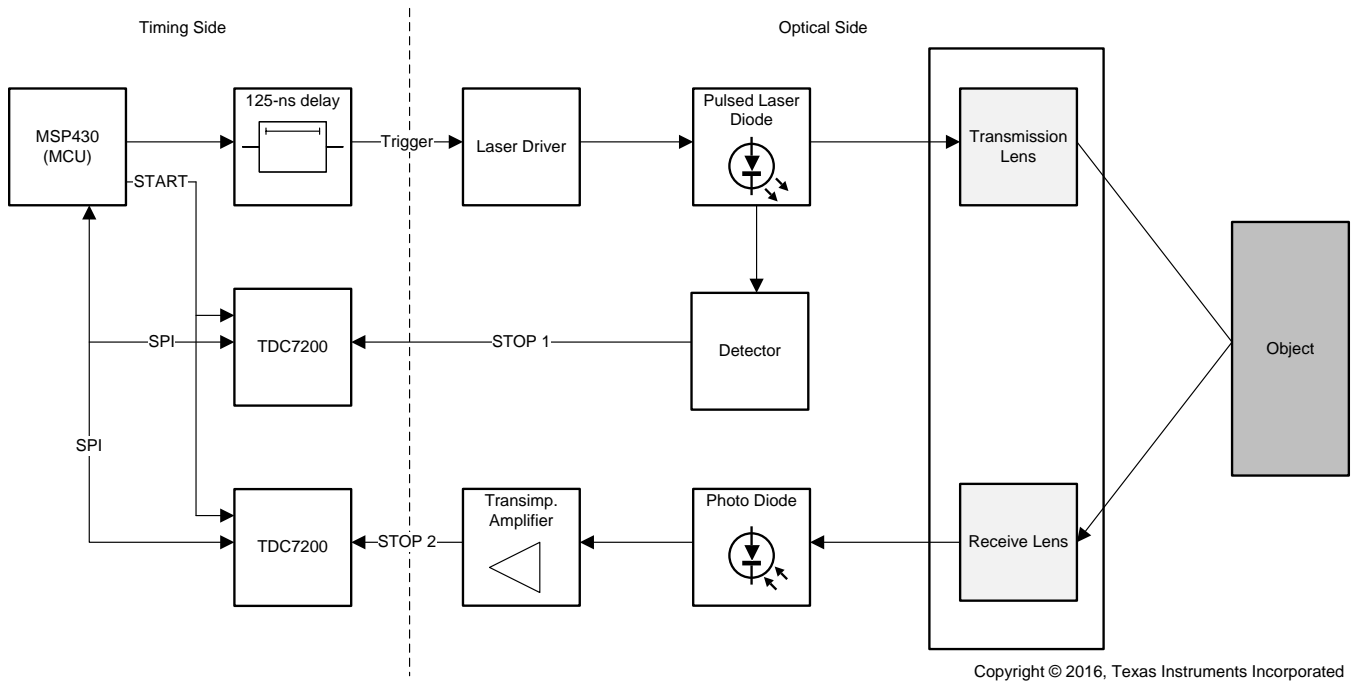


图 1. TIDA-00663 框图

2.2 主要产品

2.2.1 TDC7200

特性:

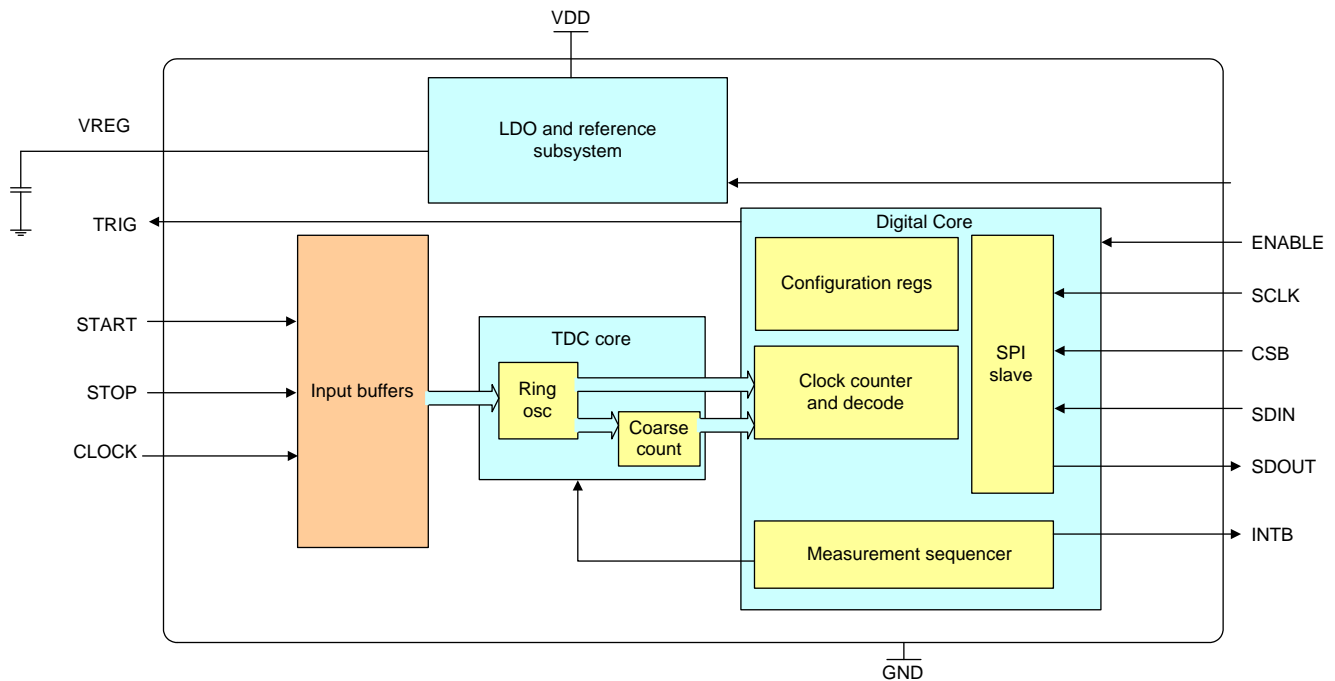
- 分辨率: 55ps
- 标准偏差: 35ps
- 测量距离:
 - 模式 1: 12ns 至 500ns
 - 模式 2: 250ns 至 8ms
- 低功耗: 0.5 μ A (2SPS)
- 支持多达 5 个 STOP 信号
- 自主多周期平均模式, 可实现低功耗
- 电源电压: 2 至 3.6V
- 工作温度: -40°C 至 +85°C
- 用于配置和寄存器访问的 SPI 主机接口

TDC7200 是用于超声波传感测量的 TDC, 例如水流量计、气流量计和热流量计。与 TDC1000 (超声波模拟前端) 配套使用时, TDC7200 可与 MSP430™、电源、无线器件以及源代码一起构成一套完整的德州仪器 (TI) 超声波感应解决方案。

TDC 可执行秒表功能，测量 START 脉冲与多达 5 个 STOP 脉冲之间的间隔时间（飞行时间，即 ToF）。凭借在一个 START 脉冲和多个 STOP 脉冲之间进行测量的功能，用户可以灵活选择回声性能最佳的 STOP 脉冲。

该器件内置自校准时基，可补偿随时间推移和温度变化而产生的漂移。通过自校准，时数转换能够获得皮秒 (ps) 级精度。这种精度使 TDC7200 非常适合用于流量计应用让它们能够在进行零流量和低流量测量时实现高精度。

TDC7200 置于自主多周期平均模式下时，可降低系统功耗，非常适合电池供电式流量计。在此模式下，主器件会进入休眠模式以实现节能，并会在测量序列完成后由 TDC 中断唤醒。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 2. TDC7200 方框图

2.2.2 OPA857

特性:

- 内部中级基准电压
- 伪差动输出电压
- 宽动态范围
- 闭环互阻抗带宽:
 - 125MHz (5kΩ 互阻抗增益, 1.5pF 外部寄生电容)
 - 105MHz (20kΩ 互阻抗增益, 1.5pF 外部寄生电容)
- 超低输入参考电流噪声 (砖墙式滤波器带宽 = 135MHz):
15nA_{RMS} (20kΩ 互阻抗)
- 超短过载恢复时间: < 25ns
- 内部输入保护二极管
- 电源:
 - 电压: 2.7 至 3.6 V
 - 电流: 23.4mA
- 扩展温度范围: -40°C 至 +85°C

OPA857 是一款针对光电二极管监控应用的宽带、快速过驱恢复、快速趋稳的超低噪声互阻抗应用的集成式栅极驱动器。借助于可选反馈电阻, OPA857 简化了高性能光系统的设计。极快速过载恢复时间和内部输入保护提供了最佳组合, 以便在最大限度地减少恢复时间的同时, 保护信号链的剩余部分。两个可选的互阻抗增益配置可实现当代互阻抗放大器应用所需要的高动态范围和灵活性。OPA857 采用 3mm × 3mm 超薄型四方扁平无引线 (VQFN) 封装。

此器件可在 -40°C 至 +85°C 的整个工业级温度范围内额定运行。

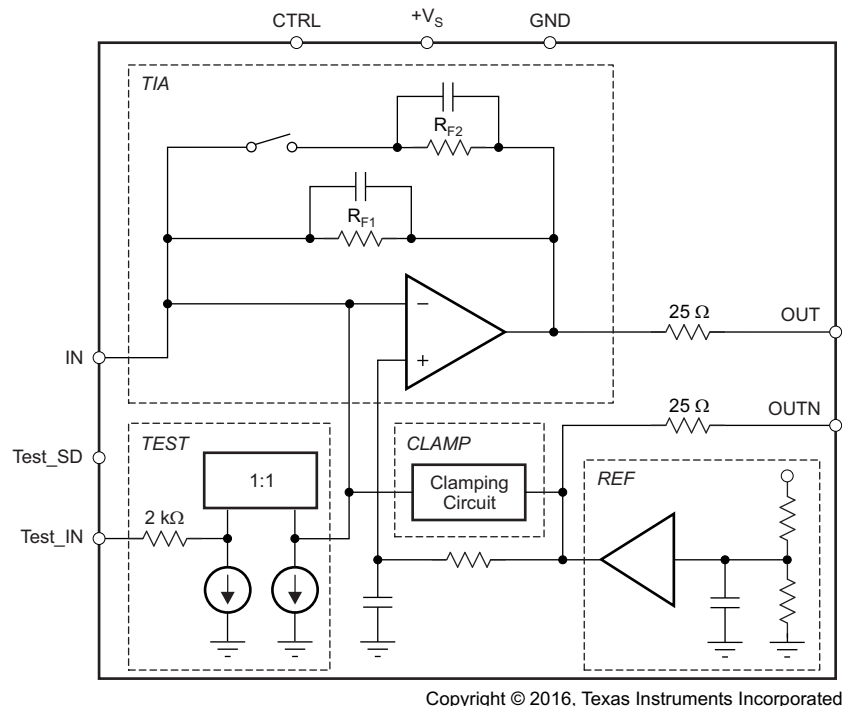


图 3. OPA857 方框图

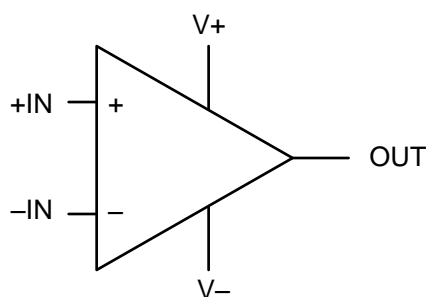
2.2.3 TLV3502

特性:

- 高速: 4.5ns
- 轨到轨 I/O
- 电源电压: 2.7 至 5.5V
- 推挽式 CMOS 输出级
- 关断 (仅限 TLV3501)
- 微型封装: 6 引脚 SOT-23 封装 (单通道), 8 引脚 SOT-23 封装 (双通道)
- 低电源电流: 3.2mA

TLV350x 系列推挽式输出比较器具有 4.5ns 的超短传播延迟, 并能在 2.7V 到 5.5V 的电压范围内工作。它还具有电源轨以外的输入共模范围, 因此非常适合低电压应用的集成式栅极驱动器。轨至轨输出可直接驱动 CMOS 或 TTL 逻辑。

微型封装可以使其满足便携式和空间受限的应用。单通道选项 (TLV3501) 采用 6 引脚 SOT-23 和 8 引脚 SO 封装。双通道选项 (TLV3502) 采用 8 引脚 SOT-23 和 8 引脚 SO 封装。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 4. TLV3502 方框图

2.3 系统设计原理

概括来说，该系统测量传感器及其前面第一个障碍物之间的距离。测量距离的方法是，计算发出光脉冲和接收回波之间的时间。时间测量是通过 TDC 完成的，我们可将 TDC 视为集成到器件中的秒表。TDC 具有 50ps 的计时分辨率。

2.3.1 LIDAR 系统选项

2.3.1.1 用于 ToF 估算的相移法

相移法的原理是，调制发射光的振幅，然后测量发射光和接收光之间的相位差。考虑到光速 (c) 和调制频率 (f)，当距离 (d) 为 $d = c \times f/2$ 的倍数时将发生混叠。

为了降低此效应的影响，可使用多个频率来扩大传感范围。相移测量可以通过直接采样、外差（因为信号相位在中频时不会更改）或者 I/Q 解调欠取样完成。

2.3.1.2 脉冲 ToF 估算

脉冲 ToF 估算可以直接测量发出和接收到激光之间的 ToF。

2.3.2 光学设计

概括来讲，光学设计需要满足以下要求：

- 应尽可能扩大发送路径和接收路径共有的视场。
- 光学器件需要最大限度地增加目标在将光反射回传感器前接收的能量。
- 光学器件需要最大限度地增加光电二极管接收到的能量。
- 光学器件可过滤环境光以降低系统中的背景噪声。

2.3.2.1 激光二极管、LED、光电二极管以及关于最大距离的注意事项

在设计 LIDAR 系统时遇到的一个最基本的问题是，需要估算传感元件接收到的、作为传输能量函数的能量。

与雷达方程式类似，公式 1 是 LIDAR 方程式：

$$Pr = \frac{Gt \times Gr \times Pt \times \pi \times r^2}{2 \times \pi \times d^2} \quad (1)$$

其中：

- Gt 表示传输元件的效率
- Gr 表示接收元件的效率
- R 是光学接收元件的半径 ($\pi \times r^2$ 等于面积)
- $2 \times \pi$ 是目标衍射光的立体角
- D 是目标元件和传感元件之间的距离

要使公式 1 生效，需假设传输光可以完全射中目标。安装在激光二极管或 LED 前端的透镜能够做到这一点。

但请记住，大多数工业（或汽车）设计所用的激光二极管均为半导体二极管，因为它们的机械结构会致使光在离开半导体基板时发生衍射（参见图 5）。

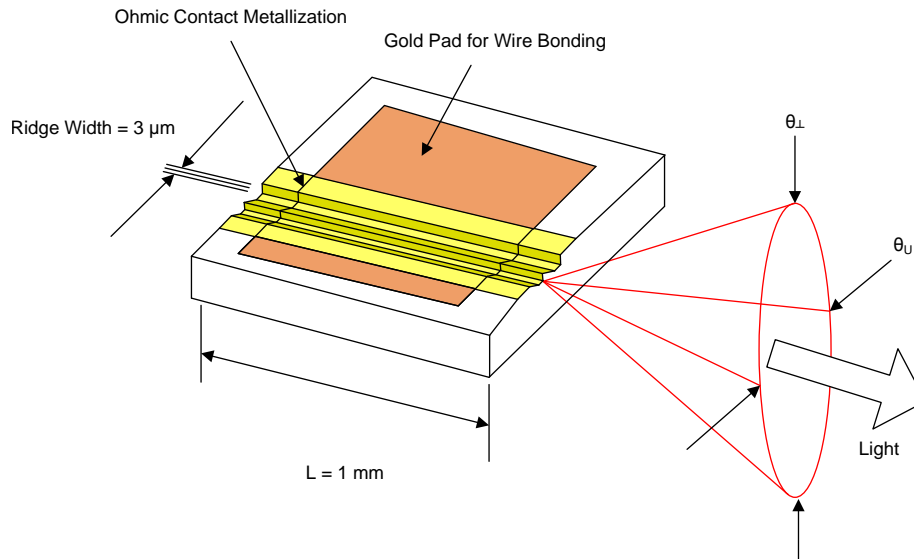


图 5. 半导体激光二极管的衍射角

大多数二极管会垂直堆叠起来，这样一来，水平缝隙创建的衍射光束会产生比水平角更宽的垂直角。

据最初粗略估计，垂直轴上的角度介于 30 到 40 度之间，而平行轴上的角度为 10 度。必须将透镜设计为能够纠正这种散光问题；否则，垂直轴上的焦点将无法与平行轴上的焦点相重叠（参见图 6）。

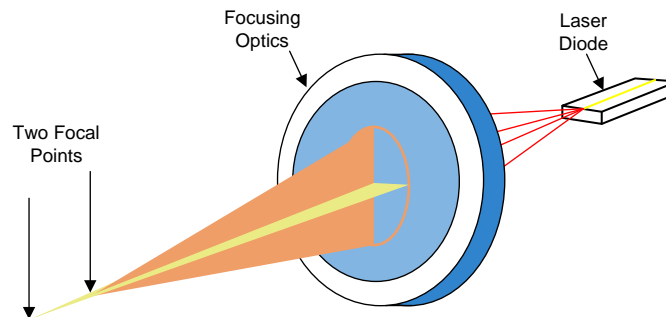


图 6. 半导体激光二极管前端的标准透镜可能会遇到的散光问题

对于使用 LED 而非激光二极管的系统，需校正公式 1 以将光广泛扩散的因素包括在内。激光器接收到的能量是 $1/d^4$ 而非 $1/d^2$ 的函数。

2.3.2.2 背景光、波长和最大传感距离

回声检测能力取决于能否照亮目标以及能否查看背景光下的照明情况。背景光可能源自工厂内部，可能是其他传感器发射和衍射的光，但也可能是工厂灯具发射的光。在户外环境中，背景光主要为太阳光，其能源密度概况由 ASTM G173 提供，如图 7 中所示：

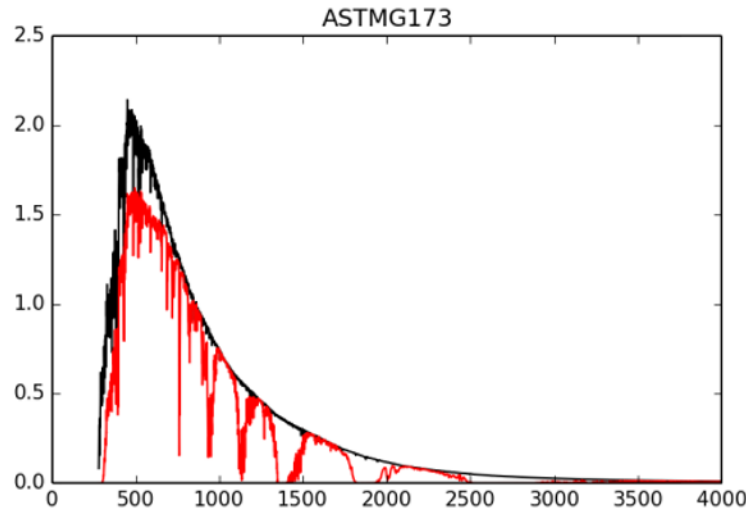


图 7. 太阳光能源密度概况

室内照明红外线在 LED 照明方面较低，并且相对低于可见光，因此，红外线通常会被选作测距波长。

对于室外光，将选择混合频率，其中，太阳光的频率相对较低，并可以使用经济高效的发射极。编写此设计指南时，905nm 是实现“既提供低背景光又广泛应用大规模生产的二极管和光电二极管”的最佳折衷值。

ASTMG173 提供的表中显示，905nm 对应的能量密度为 0.76337W/m²。假设透镜直径为 1.5cm，则感应元件在直面太阳光时接收到的能量为 134μW。

尽管达到这个数值并不现实（使激光器指向太阳的用例极少），但这为确定设计中的其他注意事项提供了良好的边界条件。

2.3.2.3 穿过空气时产生衰减

尽管 905nm 的光会被水汽吸收，但与投射到目标上产生的衍射相比，光穿过空气时因水汽造成的衰减可以忽略不计，因此本设计指南不作进一步赘述。

2.3.2.4 反射和衍射注意事项

很多不同的研究侧重根据目标研究与不同行业有关的不同材料的反射和衍射值。在所有可能来源中，本参考设计引用了 ISO16331，此标准将反射边界设定在 20% 和 80% 之间。RiegI 研究表明，当波长为 905nm 时，沥青是相对反射率最低 (10%) 的材料，而雪是相对反射率最高 (90%) 的材料[5]。

2.3.2.5 最小传感距离的视场注意事项

测量短距离时，光学器件在定义可传感的最小距离中发挥着重要作用。要确保根据系统级要求设计该光学器件，请参见图 8。

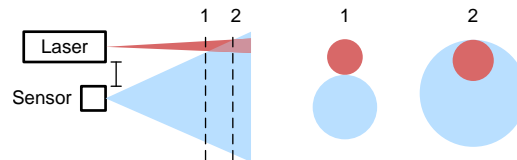


图 8. 最小传感距离

图 8 左侧是可以发射红色光束的激光二极管。该传感器的视场已用蓝色画出。

在中间的图中，红色和蓝色光盘之间明显没有重叠。这是因为传感器的视场与激光发射器的视场不同。这样一来，传感器无法接收到回声，因此不会计算 ToF。

在右侧的图中，由于传输视场和接收视场是重叠的，传感器会接收到回声，并且可以执行 ToF 计算（假设遵守所有其他限制）。

2.3.2.6 传感元件

传感元件可以将光能转换为电能。对于 LIDAR 设计，关键的相关参数包括：

- 传感波长 (nm)：需与传输波长一致
- 响应度 (A/W)：生成的电流，是接收到的光能的函数。可考虑使用的典型值为 0.5A/W（可在 0.4 到 0.7[6] 之间浮动）
- 暗电流：光电传感器会按接收到的光能函数生成电流，因此，即使在没有光的情况下，也会有暗电流生成。
- 上升时间：光电传感器在接收到光学光时的响应速度

2.3.2.7 眼睛安全

IEC 60825 是进行激光设计时需要考虑的主要眼睛安全事项。在熟悉此标准之前请勿开始进行任何设计。

2.3.3 用于测量脉冲 ToF 的电子产品

要使用公式 1 估算这些电子产品的效果，应进行以下假设：

- 光完全准直并能 100% 射中目标
- 光可以很好地散射出去，而且光从目标反射回 RX 透镜时会产生 2π 立体角（已知到目标的距离 d 时，通过 $2 \times \pi \times d^2$ 可以得出能源密度常量）
- RX 透镜半径（透镜面积： $\pi \times r^2$ ）
- 完成对 RX 透镜的计算后，计算公式 2：

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \times \pi \times r^2}{2 \times \pi \times d^2} \quad (2)$$

- $P_{tx} = 70W$
- 光电元件敏感度：0.5A/W

可通过上述方程式计算出表 2 中的结果：

表 2. 比较光电传感器在到目标的距离及生成的相关电流不同时收到的能量

d	P_RX	I _{IN}
10	80μW	40μA
30	9μW	4.5μA
100	0.8μW	0.4μA

从表 2 可以看出，如果列出的假设条件得到确认，则认为可以实现 100m 的传感距离。

除了光学器件以外，电子产品大致需要满足以下要求：

- 在最短时间内发出具有最大能量的光能脉冲。
- 从背景噪声中辨别出最小的回声能量。
- 最准确地测量出开始传输光脉冲和接收到光脉冲之间的时间。

2.3.3.1 最大传感距离（TDC 的函数）

ADC 会受到最大电压（通常指供电电压）的限制，与 ADC 相比，TDC 的结构使之面临的距离限制较小。然而，TDC 具有最大测量距离，即注册宽度。TDC7200 的产品说明书规定，其最大距离是馈送到它的时钟的函数。

通过下面提供的几个值计算最大距离：

- $F = 1.0MHz \leftrightarrow T_{max} = 65.5ms$
- $F = 2.0MHz \leftrightarrow T_{max} = 32.8ms$
- $F = 5.0MHz \leftrightarrow T_{max} = 13.1ms$
- $F = 10.0MHz \leftrightarrow T_{max} = 6.6ms$
- $F = 16.0MHz \leftrightarrow T_{max} = 4.1ms$

4.6ms 相当于 1379km，因此，LIDAR 设计的作用范围不会受到 TDC 测量距离的影响。

2.3.3.2 精度、准确度和可重复性

和所有测量系统一样，它的性能特点也体现在精度、准确度和可重复性上。

2.3.3.2.1 分辨率

LIDAR 系统的精度是指两个已报告距离之间的最小差异。对于基于 TDC 的系统，精度由 TDC 的 LSB 决定。

2.3.3.2.2 精度

信号链产生的时序延迟会影响准确度。这些时序问题的主要是由不同器件的传播延迟造成的。这些传播延迟因以下参数而异：从器件到器件、过热、电源电压过高，以及输入驱动过大。

2.3.3.2.2.1 漂移误差

测量脉冲 ToF 时会出现特定的准确度误差，这在文献中被称为“漂移误差”。漂移误差是结合使用以下因数时会出现的、固有的不精确性来源：

- 光脉冲在从最开始发出能量到达到能量峰值之间具有一个有限斜率。
- 各种材料会以介于 0% 和 100% 之间的速率反射光。
- 脉冲 ToF 测量使用阈值来检测信号是否已到达。

接收到的能量因目标对象而异，但不受距离的影响，因此，阈值会在不同的时间发生交叉，从而导致估算的 ToF 有误。

在图 9 给出了有关这的图例说明。比较器输入设置为阈值电压，即 V_{TH} 。较强信号的削波速度非常快，在 t_1 处突破阈值；另一个勉强触及削波信号的信号将在 t_2 时间处突破阈值 ($t_2 > t_1$)；极弱的信号将在 t_3 时间处突破阈值 ($t_3 > t_2 > t_1$)。

这些回声同时达到峰值，因此来自位于相同距离处的目标，即光的传输距离相同，这种情况下的漂移误差为系统性误差。

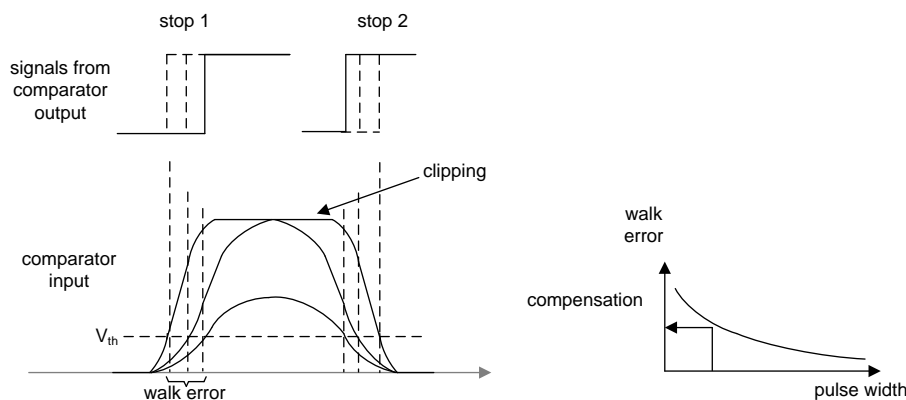


图 9. 接收到的振幅对于估算的 ToF 以及相关“漂移误差”大小的影响

2.3.3.2.3 可重复性

可重复性是指系统在测量相同数量的噪声时提供相同结果的能力（即，噪声在报告的最终值中所占的相对权重）。脉冲 ToF 系统中的噪声来源包括：

- 周期到周期抖动
- 长期抖动
- 相位抖动
- 时间间隔误差和最大时间间隔误差

人们通常认为，放大的第一阶段决定了噪声。大多数 TDC 架构依赖于对“缓慢”进行计数的外部时钟，因此这里将继续使用外部时钟。

根据 JEDEC 标准 65B JESD65V 和行业最佳实践定义的时钟噪声如下所示：

- TDC 组件本身的背景噪声
- 比较器输出的抖动，该抖动本身是输入信号除以输入信号斜率的噪声函数

要确定最确切的噪声定义，务必谨记，此 LIDAR 系统的设计目标是实现 100m 的传感距离，即总 ToF 为 333ns。时钟频率介于 1 和 10MHz 之间，这意味着周期介于 1μs 和 100ns 之间。

因此，时钟产生的噪声将持续一到三个周期。

2.3.3.2.4 周期到周期抖动

根据 JEDEC 标准 JESD65B 中的定义，周期到周期抖动是指在随机的相邻周期对示例中相邻周期之间的周期变化。尽管周期到周期测量用于扩频时钟，而非周期抖动，但它也可以用来测量时钟对系统精度的影响。

2.3.3.2.5 长期抖动

JESD65B 中未定义长期抖动；但是，长期抖动在文献中常被称为探测和测距应用（声纳、LIDAR 等等）。当总测量时间明显长于时钟周期时，长时抖动就会非常重要。

鉴于该 TI 设计的系统级要求，长时抖动在此并不相关。

2.3.3.2.6 相位抖动、时间间隔误差和最大时间间隔误差

相位噪声通常在计时系统中指定，而且此信息常常用于推导相位抖动或时间间隔误差。

相位噪声以 dBc/Hz 为单位（其中 dBc 是与载波相关的 dB），与一系列频率相结合即可得出噪声功率。

$$N = \text{NoisePower} = \int_{12 \text{ kHz}}^{20 \text{ MHz}} \mathcal{L}(f) df \quad (3)$$

通过该噪声功率，可计算出 RMS 抖动：

$$\text{RMSPhaseJitter (radians)} = \sqrt{10^{\frac{N}{10}} \times 2} \quad (4)$$

基于上面的结果，可按如下方式计算抖动（以秒为单位）：

$$\text{RMSJitter (seconds)} = \frac{\text{Jitter (radians)}}{2 \times \pi \times f_{\text{osc}}} \quad (5)$$

2.3.3.2.7 阿伦方差

时钟稳定性方面的一般问题及其对测量的影响在很长一段时间内都是一个理论问题，最终被 D.W. Allan 解决了。定义和适用性方面的注意事项不在本参考设计的范围内，但可以通过原版刊物[7]了解更多信息。

2.3.4 TDC 信号处理

鉴于有关 TDC 信号处理的出版物总体来说相对匮乏，本部分将详细介绍一些基本概念。其中一些概念运用于本参考设计，其他概念则是考虑用于未来的设计版本，但对于希望从这版针对 LIDAR 的首个参考设计入手的工程师，也可以使用这些概念。

2.3.4.1 当前发展状况回顾

多个出版物[1][2][3]采用相同的方案：对从光电探测器接收的信号进行放大，并将其与比较器（其输出可触发 TDC 的 STOP 输入）的验证阈值进行对比。

更高级的方案建议测量下降沿[1]，以便为漂移误差提供补偿方案。

其他文档介绍了如何进行多次 ToF 测量以降低测量的不确定性（与 ADC 的过采样和抖动技术类似）。

2.3.4.2 针对基于 TDC 的设置的建议信号链

所有电子课程均讲授过 ADC 信号处理，该处理方式以 Harry Nyquist 的抽样理论为基础，并由 Claude Shannon 完成后期工作。相关内容于 1948 年发表在论文“A Mathematical Theory of Communication”中，并由此形成了奈奎斯特-香农采样定理。

要使用来自 TDC 的数字样本，必须从另一个角度看待问题。表 3 概述了两种方式的差异和相似之处。

表 3. 比较基于 ADC 的采样和基于 TDC 的采样

参数	基于 ADC 的采样	基于 TDC 的采样
转换触发器	时钟输入（内部或外部）或触发器	电平交叉
模拟信号振幅信息	精确到量化误差	精确但步进数较少
数字输出	输入电压的数字图像	超过阈值时的数字图像
主要噪声特征	电压噪声	抖动

在查看 TDC 生成的样本的信号处理细节之前，另一个重要事项是熟悉贝尔实验室发布的鲜为人知的出版物。1976 年，B.F. Logan 发布了“Information in the Zero Crossings of Bandpass Signals”一文，其中说明了在对 h 进行过零检测时可确定乘常数中的 h 。

换言之，如果具有一个带通信号并捕获了信号过零的时刻，便具备了重构信号所需的全部信息，但不包括振幅。

这样，便能够以合理的方式开始构建基于 TDC 的系统，以捕获过零时的上升沿和下降沿，并在获得所有这些信息后进行处理以获取所需的 ToF。

2.3.4.3 时域相关法

作者尚未找到所述方法的现有名称，因此在下文中称为“时域相关法”。时域相关法通过 TDC（具有过零时的采样上升沿和下降沿）对传输和接收信号进行采样。

时域相关法具有以下优势：

- 光学多路径检测
- 更高的 SNR

要拒绝（或检测）光学多路径，传输模式必须为正交码形式，而且接收器只需与最新的传输模式相关联。

要检测光学多路径，接收器需要将各模式存储在缓冲器中，然后进行试用。

下图对本概念进行了说明。

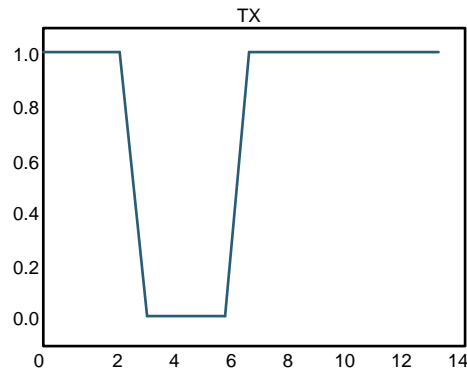


图 10. 传输模式（可选择任意时间单元）：1-1-0-0-1-1-1-1

如果没有任何噪声，比较器的输出将如图 11 中所示。

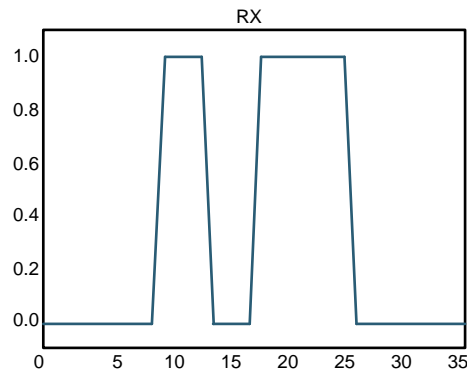


图 11. 没有噪声时的比较器输出

MCU 读取 TDC 值后，将在内存中记录 [10,+]、[14,-]、[17,+]...，其中数字表示时间戳，而符号表示上升沿或下降沿。可以使用一个非常简单的子例程将其扩展到阵列中，类似于图 11。

假设信号链现在存在噪声，我们来看看该比较器可能的输出情况，如图 12 所示。

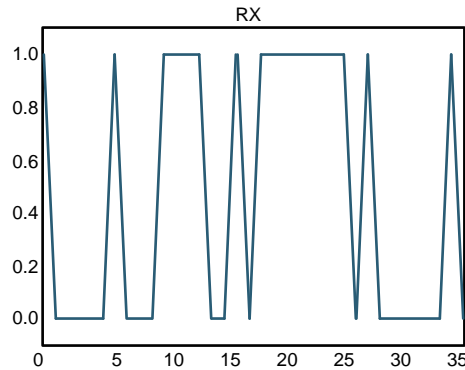


图 12. 存在噪声时比较器馈送到 TDC 的输出

通常情况下，选择的比较器阈值为 RMS 本底噪声的三倍（或者六倍，具体取决于误报和漏报之间的妥协情况）。采用这种建议的方法，可以显著降低阈值，从而减少漏报的数量。但是，通过传统方法，MCU 子例程可能会考虑 5 个任意时间单元的 ToF。

然而，计算出无噪声接收信号和有噪声接收信号之间简单的交叉相关性（参见图 13）后，两种情况都可以正确计算出准确的 ToF（10 个任意单元）。

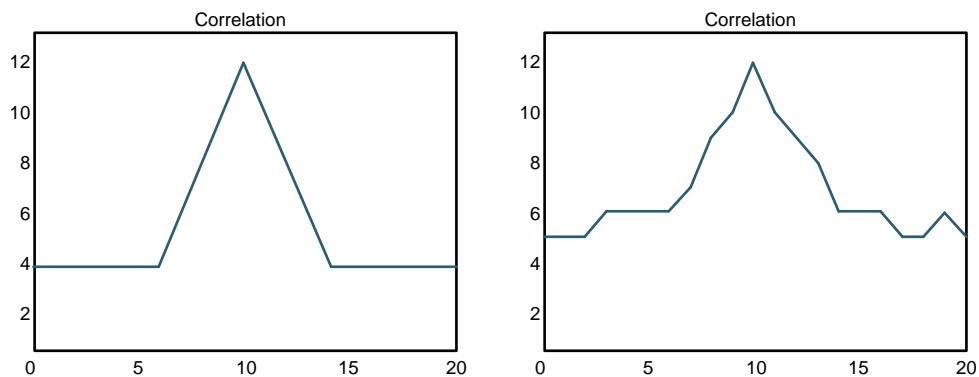


图 13. 接收信号和传输信号之间的相关性（分别为无噪声和有噪声）

2.3.4.4 信噪比

信噪比定义为信号功率与背景噪声（或无用信号）功率的比率。

对于基于 TDC 的信号链，请谨慎选择检测阈值。当电平超过该阈值时，则表明检测到信号。

要检测单个事件（生成和处理单个 STOP 信号）时，需选择相应的阈值，使发生误报的几率在系统性能的可接受范围内。

在此提醒，白高斯噪声的即时值高于信号的标准偏差（也称为 RMS 值），其值为 16%。因此，如果系统可以容纳高于 16% 的假性 ToF 结果（通过求平均值或查看其他系统级别的稳健性），则输入阈值可以设置为背景噪声级别的平均值加上其 RMS 值。

假设背景噪声的均值为零，下表总结了在此情况下的系统稳健性。

表 4. 错误触发器

RMS 函数 V_{TH}	TDC 的错误触发几率
1	16%
2	2.3%
3	0.13%

考虑到该噪声的白高斯特性，触发时间将均匀分布在 0 和理论 ToF 值之间。

测量多个 STOP 脉冲的功能将有助于提高稳健性，因为可以拒绝未按传输模式间隔的脉冲组。

检测对象从单脉冲上升沿转变为所有过零情况，这有助于进一步提高 SNR。通过针对所有信号选择一个任意振幅，还可以使用 Logan 设置的理论框架。SNR 高于功率比值，是振幅平方的比值。如果将任意幅度选作“1”（一），则 SNR 将变为脉宽平方的比值：

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{V^2_{signal}}{V^2_{noise}} = \frac{\sum t^2_{signal}}{\sum t^2_{noise}} \quad (6)$$

换言之，在一定的时域内，SNR 是信号脉宽平方与噪声脉宽平方的比值。

2.3.4.5 时域相关法的其他优势

建议方案的另一个优势是，它可以为漂移误差[1]计算出补偿方案。

3 测试要求和测试结果

3.1 测试设置

该参考设计为 **BoosterPack™** 形式。这使得该设计可以连接 **TI LaunchPad™** 以轻松使用和评估。所选的 **LaunchPad** 包含 **MSP430FR5969**，这是一个 **16MHz** 超低功耗微控制器，配备有 **60KB FRAM**、**2KB SRAM** 和 **40IO**。微控制器可启动相应的序列来触发两个 **TDC7200** 设备，它们将测量光在物体之间传输所需的时间，以及驱动激光的 **UCC27321** 的相应情况。

本参考设计的重点在于，使用两个 **TDC7200** 设备描述差分 **ToF** 测量法的特点。为此，需计算出两个 **TDC7200** 设备的差分测量的误差。该误差是两个 **TDC7200** 设备接收到完全相同的 **START** 和 **STOP** 脉冲后的 **ToF** 差值，**ToF** 是 **START** 和 **STOP** 脉冲之间的间隔时间

TDC7200 具有 **12ns** 的消隐时间。对于短距离传感而言，此消隐时间太长了。本参考设计几乎不允许 **TDC** 测量出现任何消隐时间。

图 14 显示了测试设置。**LaunchPad** 的 **GPIO** 引脚生成脉冲触发器。该引脚连接两个 **TDC7200** 设备的 **START** 引脚，以及波形发生器 **HP33250A** 的 **TRIG** 输入。

接收到 **START** 脉冲，并且 **MSP430FR5969** 发出的外部时钟信号出现下一个上升沿后，**TDC7200** 的时钟计数器开始计数。该时钟可以设置为 **1MHz**、**4MHz** 和 **16MHz**。

与此同时，接收到 **START** 脉冲后，波形发生器会生成用户设置的延迟并输出 **STOP** 触发器，然后系统会通过相同长度的 **SMA** 电缆将该触发器返回到两个 **TDC7200** 设备的 **STOP** 引脚。

接收到 **STOP** 触发器后，**TDC** 将通过表示寄存器内在等待新的测量结果的中断行为（**INTB** 引脚）向 **MCU** 发送信号。如果未收到 **STOP** 信号，时钟计数器或粗略计数器将发生溢出并生成中断。

根据预期的 **ToF**，可使用两种不同的模式来配置 **TDC7200**。测量模式 1 适用于预期 **ToF** 小于 **500ns** 的情况，而测量模式 2 适用于预期 **ToF** 大于 **500ns** 的情况。根据所选的测量模式，可使用两种不同的方式来计算 **ToF**：

$$TOF_n = (TIME_n)(normLSB) \quad (7)$$

$$TOF1 = (TIME1)(normLSB) + (CLOCK_COUNT1)(CLOCKperiod) - (TIME2)(normLSB) \quad (8)$$

有关这些测量模式的更多信息，请参阅[适用于激光雷达、磁致伸缩和流量计中飞行时间应用的 TDC7200 时数转换器](#)。

要测量本参考设计中两个 TDC7200 设备的差分测量，建议使用测量模式 2（即使 ToF 低于 500ns）。

校准以获取 LSB 的实际值，即 normLSB。请记住，LSB 的实际值可能会因环境变量（温度、系统噪声等）而异。这种差异可能会导致测量结果出现严重的误差。由于设备存在一定的内部延迟，测量结果还会发生偏移误差。

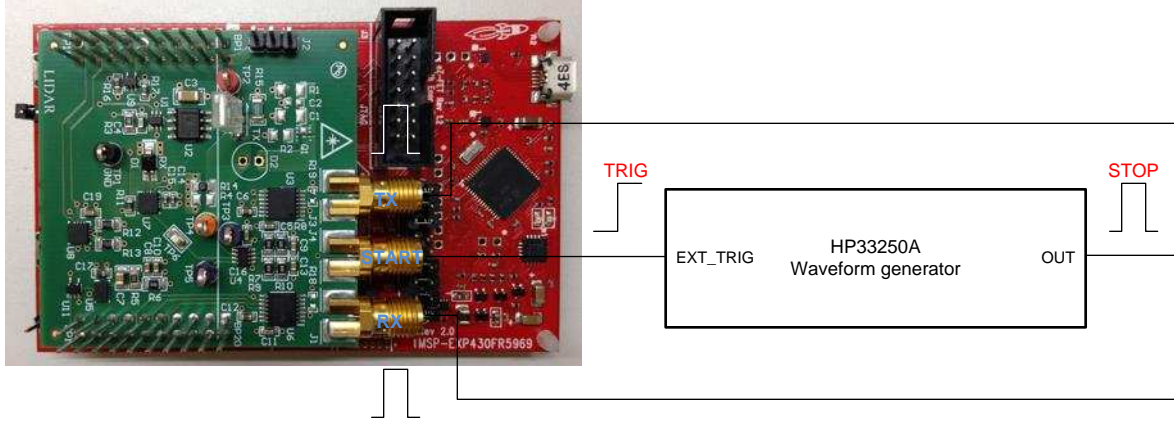


图 14. 测试设置

3.2 测试结果

两个 TDC 的中断状态始终受示波器的监控，以检查 TDC 是否在收到 STOP 触发器后正确地向 MCU 发送信号。

计数器溢出阈值已设置为 $250\mu\text{s}$ 。在图 15 中，未超过阈值，这意味着在 TDC 收到 STOP 触发器后产生中断（绿线）。在图 16 中，超过了阈值，这意味着在时钟达到 $250\mu\text{s}$ ，但尚未收到任何 STOP（红线）触发器时发生中断。

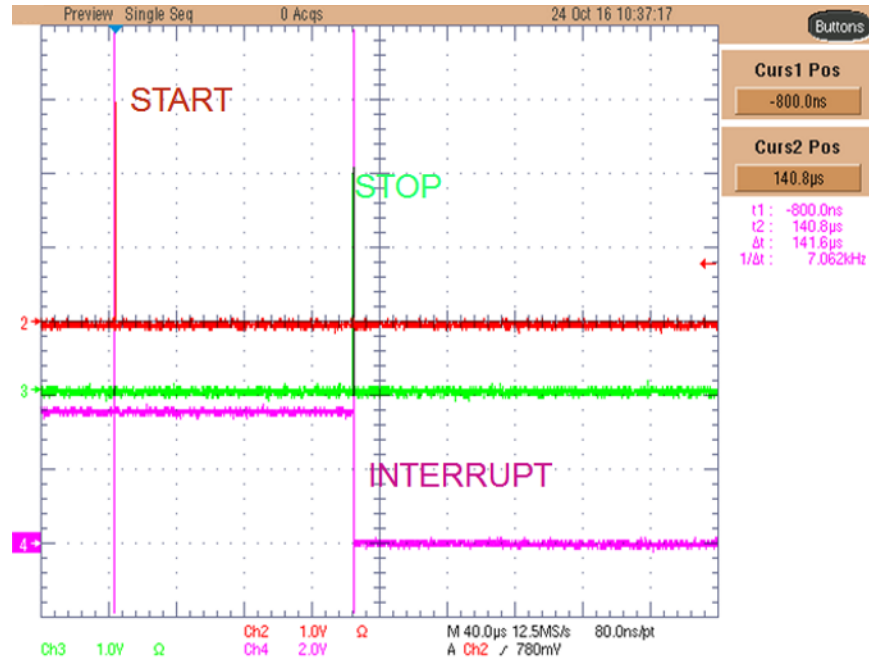


图 15. 未超过计数器溢出阈值时的中断行为

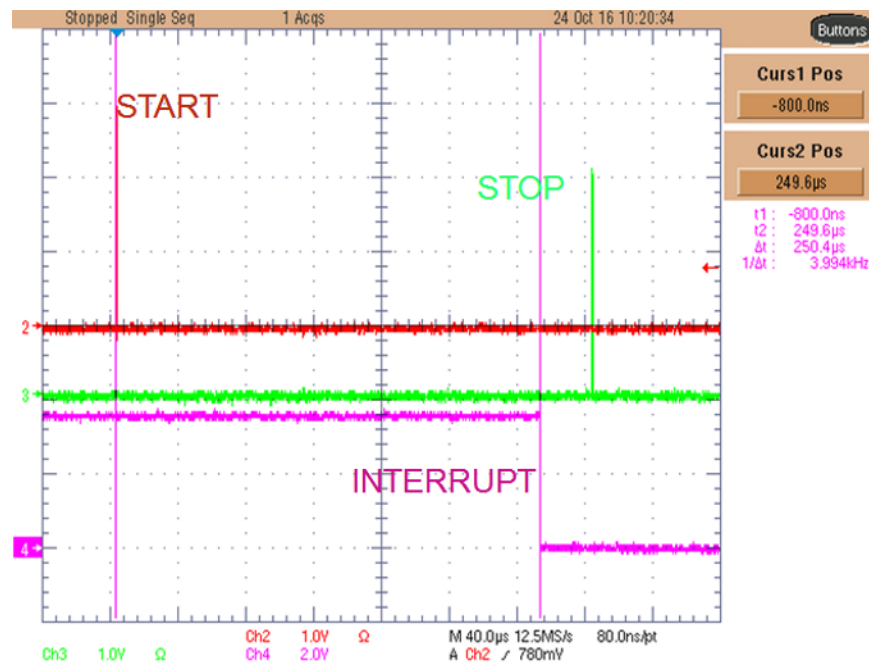


图 16. 超过计数器溢出阈值时的中断行为

START 和 STOP 触发器之间的延迟为 $20\mu\text{s}$ 到 $140\mu\text{s}$ 不等，波形发生器的步长为 $20\mu\text{s}$ ；可针对每一步计算出两个 TDC 的测量 ToF 之间的误差。

此计算已向 TDC 馈送了来自 MSP430FR5969 的三种不同的时钟频率（1MHz、4MHz 和 16MHz）。结果显示在图 17、图 18 和图 19 中，其中 y 轴表示误差，x 轴表示波形发生器产生的延迟。

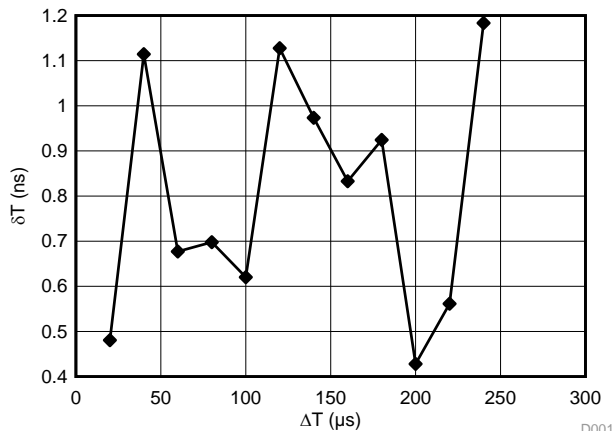


图 17. 1MHz 时钟的差分误差

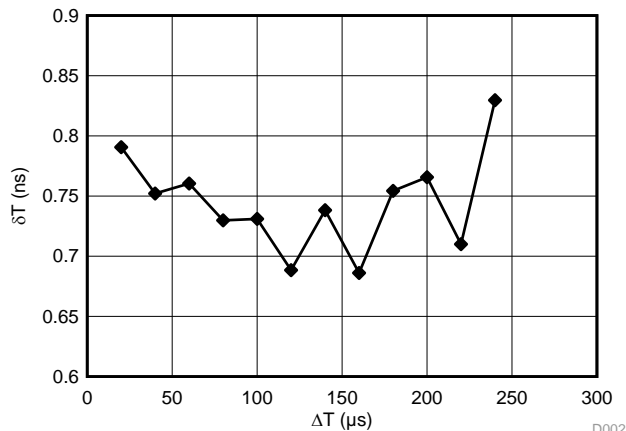


图 18. 4MHz 时钟的差分误差

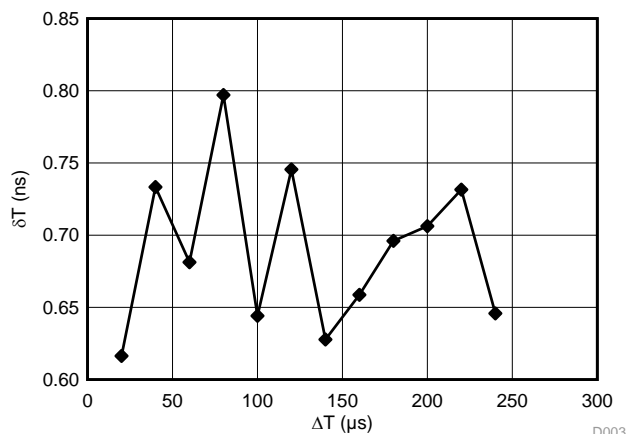


图 19. 16MHz 时钟的差分误差

正如这些图中所示，误差会随着时钟频率的增加而降低。情况确实如此，因为 TDC 的标准偏差会随着时钟频率的增加而降低。采用 16MHz 时钟时，与硬件本身相关的系统差分误差的峰间值为 800ps。务必要注意导致产生误差的以下原因：HP33250A 的 1ns 触发器输入突发抖动 (RMS)、MSP430FR5969 的内部时钟的精度，以及一些布线失配情形。

抖动会在每个时钟周期内累积，因此与时间测量相关的不确定性是指时钟抖动和所测量时钟周期数的函数。低于 30ps 的误差可以提升平均值，其相应地精度则低于 1cm。

4 设计文件

4.1 电路原理图

要下载原理图，请参见 [TIDA-00663](#) 的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参见 [TIDA-00663](#) 的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 布局图

要下载板层图，请参见 [TIDA-00663](#)。

4.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参见 [TIDA-00663](#) 的设计文件。

4.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参见 [TIDA-00663](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参见 [TIDA-00663](#) 的设计文件。

5 软件文件

要下载软件文件，请参见 [TIDA-00663](#)。

6 相关文档

1. Optical Engineering, [Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement](#), 40:10-19
2. University of Oulu, [Integrated Receiver Channel and Timing Discrimination Circuits for a Pulsed Time-of-flight Laser Rangefinder](#)
3. IEEE, [A 9-channel Time-to-Digital Converter for an Imaging Lidar Application](#)
4. Chalmers University of Technology, [Development of a low-cost laser range-finder \(LIDAR\): Master's Thesis in Systems, Control and Mechatronics](#)
5. RIEGL, [Multi-Wavelength Airborne Laser Scanning](#)
6. University of Washington, [Optical Detectors](#)
7. Allan, D. W., [Conversion of Frequency Stability Measures from the Time-domain to the Frequency-domain, vice-versa and Power-law Spectral Densities](#)

6.1 商标

E2E, MSP430, BoosterPack, LaunchPad are trademarks of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

7 术语

TDC— 时数转换器

为了更好地理解 TDC 这个名称，可将 ADC 视作“压数转换器”。ADC 用于将物理单位“伏特”转换为数字图像，对应图像通常与绝对引用成比例。与此类似，TDC 是 ADC 领域的一个分支，专注于将物理单位“时间”转换为数字值。

8 关于作者

MATTHIEU CHEVRIER 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责定义和开发面向工业领域的参考设计解决方案。Matthieu 在嵌入式系统设计的硬件（电源管理、混合信号等）和软件（底层驱动器、RTOS 和编译器）方面有着丰富的经验，在自身岗位上发挥了重要作用。Matthieu 在法国常青藤大学高等电力学院获得了电气工程学硕士 (MSEE) 学位。他持有 IPO、EPO 和 USPTO 的专利。

GIOVANNI CAMPANELLA 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责定义和开发面向工业领域的参考设计解决方案。他在意大利博洛尼亚大学获得了电子与通信工程专业的学士学位，并在都灵理工学院获得了电子工程专业的硕士学位。他是传感器和模拟信号链方面的专家，专注于磁性和分析传感技术，以及对直流刷式伺服驱动器的混合信号控制。

8.1 鸣谢

作者要感谢 **SAMIR CHERIAN** 先生在整个项目期间就 OPA857 的所有关键方面提供的帮助。如果没有 Samir 的帮助，该项目将无法在给定时间内完成。

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from A Revision (January 2017) to B Revision	Page
• 已更改 对结构进行了更改，以适应当前设计指南模板	1
• 已更改 将 905nm 对应的能量密度从 0.62913W/m ² 更改为 0.76337W/m ²	9
• 已更改 将感应元件从太阳光中接收到的能量从 1.4μW 更改为 134μW	9

Changes from Original (December 2016) to A Revision	Page
• 已更改 对语言和图像进行了更改，以适应当前样式指南	1

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能而设计。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等许可包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无屡发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

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 © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司