

采用 LMH13000 和 LMH32401 的直接飞行时间 LiDAR 设计



摘要

光探测与测距 (LiDAR) 是一种利用激光测量距离的核心测距技术。LiDAR 可用于创建精确的三维 (3D) 地图以及物体和环境的结构化点云。LiDAR 主要分为两种类型：直接飞行时间 (dToF) 和间接飞行时间 (iToF)。dToF 通过测量纳秒级激光脉冲的往返传播时间，并将该时间转换为距离来确定目标距离；而 iToF 使用连续调制光来测量发射信号与返回信号之间的相移 (波延迟)。本设计介绍如何使用 LMH13000 和 LMH32401 分别发射和接收纳秒光脉冲，以通过直接飞行时间技术测量距离。

内容

1 简介.....	2
2 说明.....	3
3 发射器.....	4
3.1 光功率与测距距离.....	4
3.2 平方反比定律与距离.....	4
3.3 光功率决定最大测距距离.....	4
4 接收器.....	6
4.1 TIA 的稳定性注意事项.....	6
4.2 跨阻放大器选择：LMH32401.....	8
5 光学外壳设计.....	11
6 测量设置.....	12
7 实验室测量.....	14
8 总结.....	15
9 参考资料.....	16

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

LiDAR 是一种遥感技术，通过发射短激光脉冲并测量脉冲经目标反射后返回所需的时间来测量距离，这一原理称为飞行时间 (ToF)。通过每秒重复此过程数百万次，并将每次测距结果与精确的角度或位置信息相结合，LiDAR 系统可以生成高分辨率 3D 点云，准确表示真实世界环境。

在 LiDAR 中，iToF 和 dToF 代表两种不同的距离提取方式。二者是截然不同的 LiDAR 深度传感技术，都依靠测量光传播到目标并返回的飞行时间来测距，但提取该时序信息的方式存在本质差异。

在 iToF 中，发射器发出经过振幅调制或相位调制的连续光，接收器测量发射信号与接收到的回波信号之间的相移。由于光速是固定的，相移可直接换算为光在往返过程中传播的距离。相比之下，dToF 发送短激光脉冲，并使用快速探测器和时序电路，以皮秒精度测量每个回波脉冲的精确到达时间，从而实现远距离、高精度的测距。

本文说明了如何使用德州仪器 (TI) 的激光驱动器 LMH13000 和集成跨阻放大器 LMH32401 来设计 dToF LiDAR 前端。

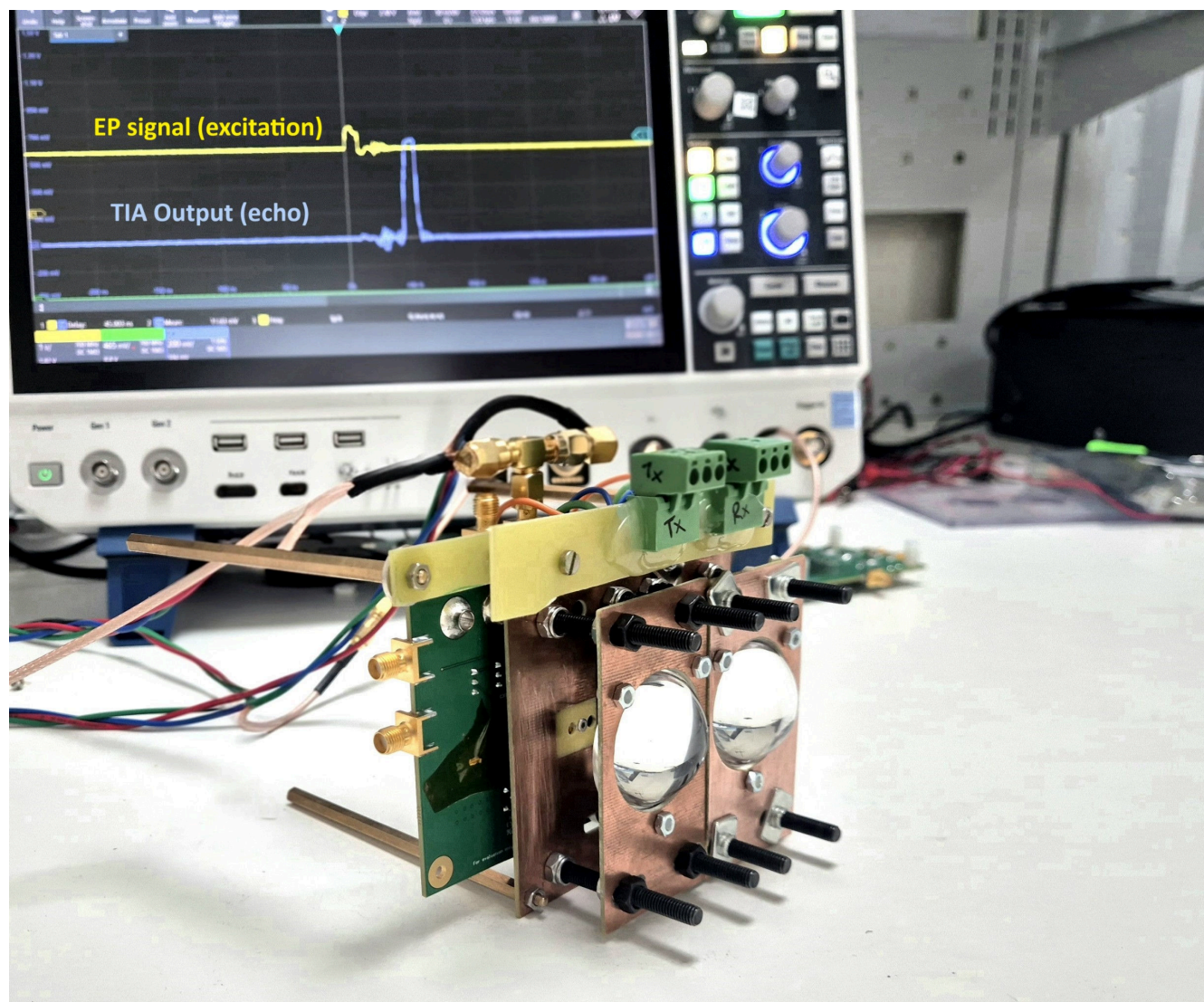


图 1-1. LiDAR 设置

2 说明

如前文所述，直接飞行时间是一种测量光从光源传播到目标再返回所需时间 (Δt) 的技术。根据该信息，可以确定目标到光源的距离。要在硬件中实现这一点，我们需要一个能够产生窄而高功率的光脉冲的发射器或光源，以及一个足够灵敏、能够探测到击中目标后反射回来的微弱回波光脉冲信号的接收器。发射器和接收器通常彼此相邻放置，并面向需要测量距离的目标。这样可以确保发射路径信号和反射路径信号具有相同的传播距离。因此，目标到光源的距离 (d) 等于光速 (c) 乘以光脉冲总飞行时间 (Δt) 的一半。

$$d = c \times \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

在本设计中，使用激光器 (TL90AT03) 作为光源，由 TI 的激光驱动器 LMH13000 驱动。LMH13000 对激光器进行脉冲驱动，以发射短促的红外光脉冲。激光器的光输出通过透镜准直后发射，随后在开放空间中传播，光一旦击中路径上的任何目标就会被反射。

反射光由一个会聚透镜收集，并聚焦到雪崩光电二极管 (APD) 上，该二极管将光脉冲转换为小电流。然后，该电流由跨阻放大器 LMH32401 放大并转换为电压信号，从而生成表示反射脉冲已到达的干净电信号。

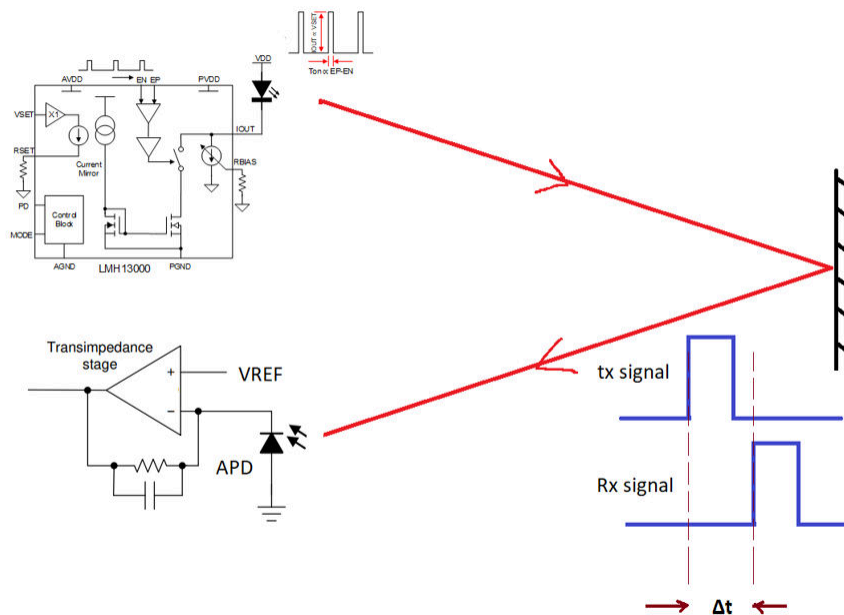


图 2-1. LiDAR 设置

3 发射器

发射器子系统将大功率光发射器与精密电流驱动级集成在一起，以生成远距离 LiDAR 工作所需的窄而高能量光脉冲。本设计选择的光源是 Osram 的 TL90AT03 激光二极管，这是一种 905nm 红外器件，能够承受高达 20A 的脉冲电流，使其成为远距离飞行时间应用的绝佳选择。为驱动该激光器，本设计采用了德州仪器 (TI) 的 LMH13000，这是一种电压控制电流源，针对快速、精确的激光脉冲进行了优化。LMH13000 无需外部 FET 即可提供亚纳秒级上升和下降时间，在保持出色脉冲保真度的同时，显著简化了发射器架构。激光峰值电流通过 VSET 引脚设定，该引脚在施加的电压与产生的输出电流之间形成线性关系。脉冲时序和重复频率通过 EP/EN 输入控制，从而能够精确调制发射的光脉冲。该器件支持两种可选工作模式——模式 0 (5mA 至 1A) 和模式 1 (50mA 至 5A)——允许设计人员针对不同功率水平或工作条件配置驱动器。由于 LMH13000 本质上是电流输出器件，因此可以并联多个驱动器，将可用峰值电流扩展到 5A 以上，从而实现灵活的发射器配置，满足高量程、高分辨率 LiDAR 系统的要求。

3.1 光功率与测距距离

在 LiDAR 系统中，光输出功率与测距在根本上是相互关联的。简而言之，距离决定返回到传感器的功率大小，而输出功率决定 LiDAR 能够测距的最大距离。

3.2 平方反比定律与距离

当激光脉冲在空气中传播时，光会扩散。当激光脉冲击中目标时，目标会将光散射到各个方向。反射回 LiDAR 接收器的那部分光遵循平方反比定律。

返回光的功率随距离增加而急剧下降。如果将到目标的距离加倍，返回的光功率将降为原来的四分之一 ($1 \div 2^2$)。在两倍距离处，接收的信号强度仅为 25%。

简而言之，距离决定返回到传感器的功率大小，而输出功率决定 LiDAR 能够测距的最大距离。

3.3 光功率决定最大测距距离

由于回波信号随距离衰减非常快，LiDAR 系统需要足够的初始光输出功率，以确保返回光强于背景噪声 (例如阳光)。

高峰值功率：发射大功率的短促激光脉冲，能让系统探测到远距离目标，因为足够的光完成往返行程后仍能被接收。

安全限制：输出功率不能无限增加。系统通常必须遵守严格的眼部安全法规 (1 类限值)，这些法规根据激光波长 (通常为 905nm 或 1,550nm) 限制最大光功率。

为了实现远距离测距，我们的目标是发送非常高的峰值光脉冲功率，但持续时间非常短 (例如 2ns 到 3ns)，同时将占空比保持在非常小的比例 (根据峰值功率，保持在 0.1% 或更低)。这可确保我们获得接收器能够探测到的足够强的回波光脉冲信号，同时仍将总光功率保持在 1 类激光的眼睛安全限值内。

图 3-1 展示了如何使用 LMH13000 驱动激光器，为 dTOF LiDAR 发射光脉冲。

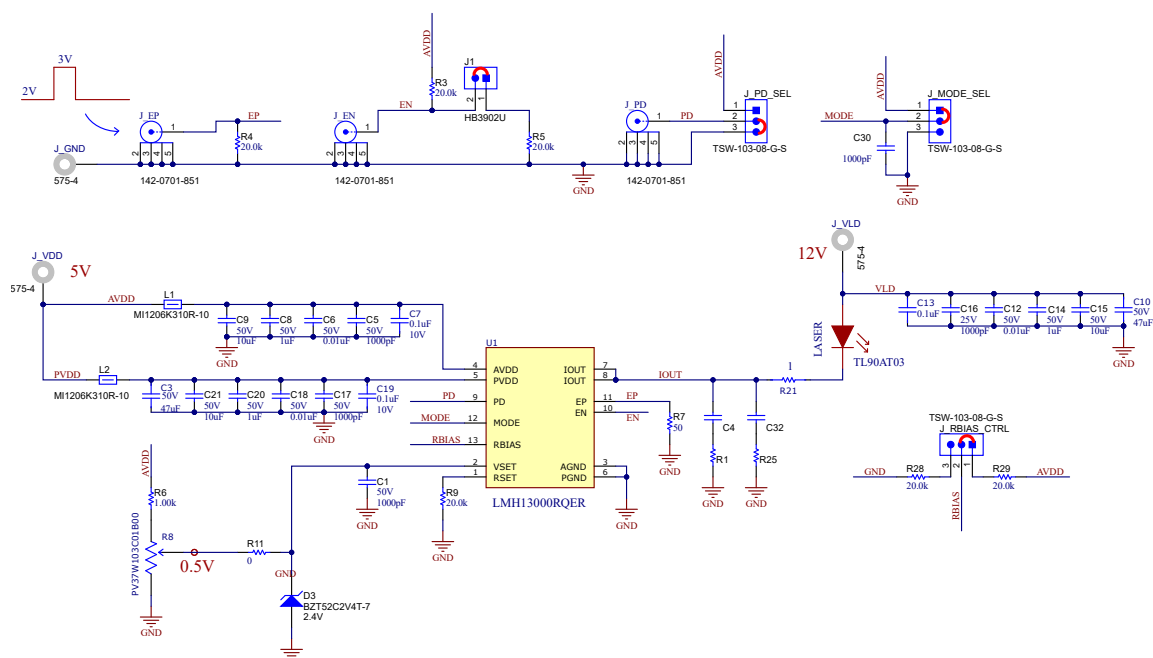


图 3-1. 发射器原理图

4 接收器

接收器子系统将微弱、时间延迟的光回波转换为干净电信号，该信号是精确飞行时间处理的理想选择。接收器子系统主要由雪崩光电二极管 (APD) 和跨阻放大器 (TIA) 组成。APD 作为光学前端，对入射光子作出响应，产生成比例的电流，并通过雪崩倍增提供内部增益，从而提高远距离 LiDAR 探测的灵敏度。然后，该电流由 TIA 转换为可用电压，TIA 是一个配置有反馈电阻器 (R_f) 的运算放大器，其根据 [方程式 2](#) 确立跨阻增益：

$$V_{out} = I_{in} \times R_f \quad (2)$$

由于运算放大器在反相输入端保持虚地，APD 获得稳定的偏置点，从而保持线性且可预测的电流到电压转换。当需要额外增益时，可以在 TIA 之后再增加一级电压放大级。

设计高性能接收器需要特别关注稳定性、噪声和带宽。APD 和 PCB 走线会引入输入电容，该电容与反馈电阻器相互作用形成极点，可能降低相位裕度并导致振铃或振荡。为保持稳定性，将一个小反馈电容器 C_f 与 R_f 并联，以对频率响应进行整形并保持良好阻尼的瞬态特性。

放大器的输入偏置电流也会直接导致直流误差，因为偏置电流会被 R_f 放大；因此，优选具有极低偏置电流的 JFET 输入或 CMOS 输入放大器，以最小化失调。

最后，增益和带宽存在固有的关联：增加 R_f 可提高灵敏度，但由于输入电容和反馈阻抗的综合影响，也会降低带宽。在 LiDAR 接收器设计中，选择 APD、TIA 架构和补偿元件的适当组合，对于实现所需的动态范围、噪声性能和时序精度至关重要。

4.1 TIA 的稳定性注意事项

如果假设光电二极管为理想的电流源，TIA 的输出电压由 [方程式 3](#) 给出：

$$V_{OUT} = \frac{-I_{PD} \times R_F}{(1 + j2\pi f R_F C_F)} \quad (3)$$

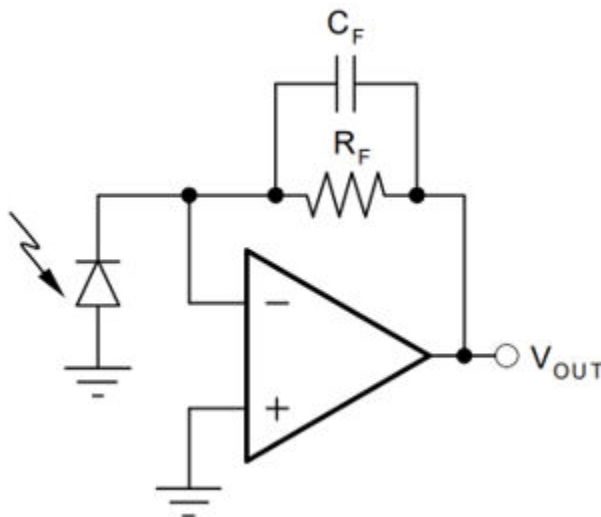


图 4-1. 理想光电二极管 TIA 电路

在实际实现中，光电二极管不能仅被视为理想电流源。相反，该器件更准确地建模为一个理想电流源与等效并联电阻 R_D 和结电容 C_D 并联。运算放大器输入电容也不能忽略，必须作为 C_D 的一部分加以考虑。

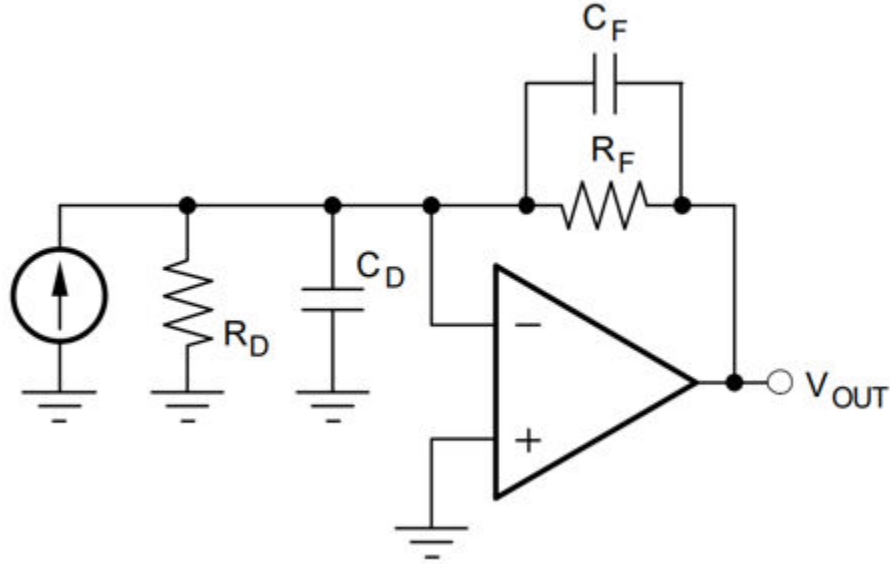


图 4-2. 采用 TIA 的光电二极管电气模型

$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} \times \frac{1 + \frac{j2\pi f(R_F R_D)}{(R_F + R_D)}(C_F + C_D)}{(1 + j2\pi f(R_F C_F))} \quad (4)$$

$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} \times \frac{\left(1 + j\frac{f}{f_Z}\right)}{\left(1 + j\frac{f}{f_P}\right)} \quad (5)$$

$$\text{Here, } f_P = \frac{1}{(2\pi R_F C_F)} \quad (6)$$

$$f_Z = \frac{1}{2\pi(R_F || R_D)(C_F + C_D)} \quad (7)$$

通常， $R_D \gg R_F$ ， $R_F || R_D = R_F$ ，直流增益也变为单位增益。

$$f_Z = \frac{1}{2\pi R_F (C_F + C_D)} \quad (8)$$

这意味着 f_Z 始终低于 f_P 。

为使系统保持稳定， f_P 必须位于运算放大器的开环曲线内。

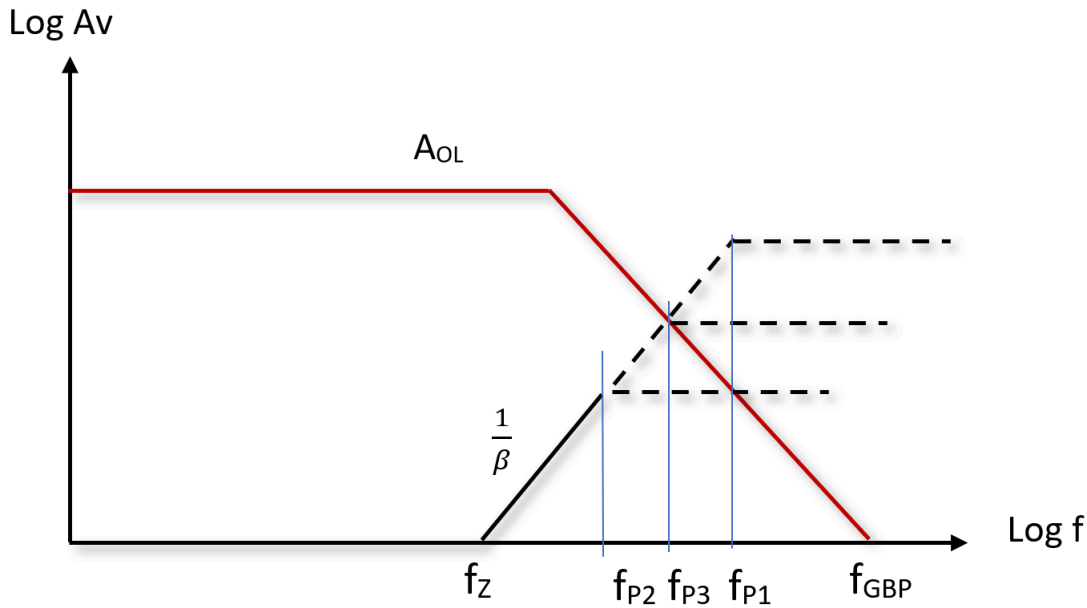


图 4-3. TIA 开环和闭环响应随频率的变化

图 4-3 展示了闭环响应（反馈因数的倒数）与开环增益曲线相交的三种不同场景。当两条曲线的接近速率为 40dB 时，就会发生不稳定。当 f_p 落在开环曲线外时，就会发生这种情况（如 f_{p1} 的情形），此时电路会振荡。如果 f_p 位于开环曲线内（如 f_{p2} 的情形），则跨阻电路会始终保持稳定，但这种情况下的稳定性是以跨阻带宽为代价换来的。最佳实践是将 f_p 置于开环增益曲线上，如 f_{p3} 所示。

由于 f_p 由反馈网络决定，因此只需审慎地选择 C_F 。注意到噪声增益的高频渐近线仅由电容值决定，就可以大大简化这一过程。

$$\text{For } (f > f_p), \text{ACL} = \frac{C_F + C_D}{C_F} \quad (9)$$

为使 f_p 位于 AOL 曲线上，

$$\frac{\text{GBP}}{f_p} = \frac{C_F + C_D}{C_F} \quad (10)$$

求解 C_F ：

$$C_F = \frac{1}{(4\pi R_F \text{GBP})} \times \left(1 + \sqrt{1 + 8\pi R_F C_D \text{GBP}}\right) \quad (11)$$

一旦确定了光电二极管电容和运算放大器 GBP，就必须根据方程式 9 至方程式 11 选择合适的反馈电容值，以保持稳定性。

$$f_p = \sqrt{\frac{\text{GBP}}{2\pi R_F C_D}} \quad (12)$$

该结果表明，对于给定的运算放大器和光电二极管，跨阻带宽与反馈电阻的平方根成反比。因此，如果带宽是关键要求，最佳方法可以是选择适中的跨阻增益级，后接宽带电压增益级。

4.2 跨阻放大器选择：LMH32401

LMH32401 是一款集成器件，具有可编程增益跨阻放大器 (TIA) 级，后接固定增益、单端输入转差动输出放大器级，主要设计用于 LiDAR 和脉冲 ToF 系统

LMH32401 支持光电二极管灌电流（快速恢复钳位）和拉电流（恢复较慢的软钳位）两种配置。该器件具有可编程增益 **TIA** 级，后接固定增益差动输出级。对于特定的光电二极管电容，低增益配置可提供更高的带宽，而高增益可提供更低的输入参考噪声（输出增大为 $\times X$ 倍，而噪声仅增加 $\sqrt{X}$ ）。增益通过 **GAIN** 引脚控制：低电平为低增益模式，高电平为高增益模式

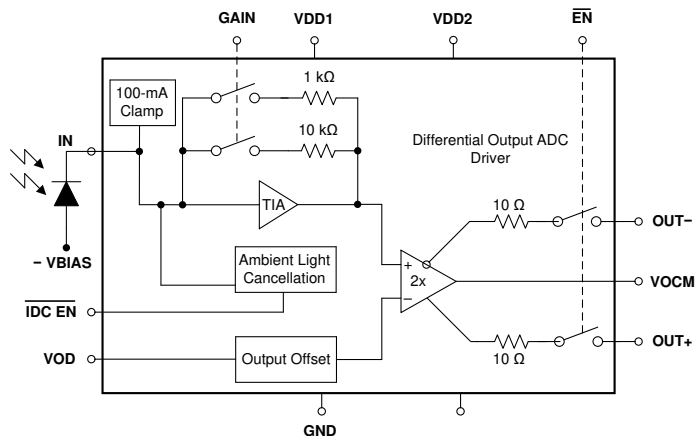


图 4-4. LMH32401 方框图

使用 LMH32401 的好处在于，对于大范围的输入电容值，该器件无需外部补偿电容器。并且根据光电二极管的电容值和带宽要求，用户可以选择使用何种增益模式。图 4-5 和图 4-6 分别展示了低增益和高增益模式下，LMH32401 在不同输入电容值下的带宽。

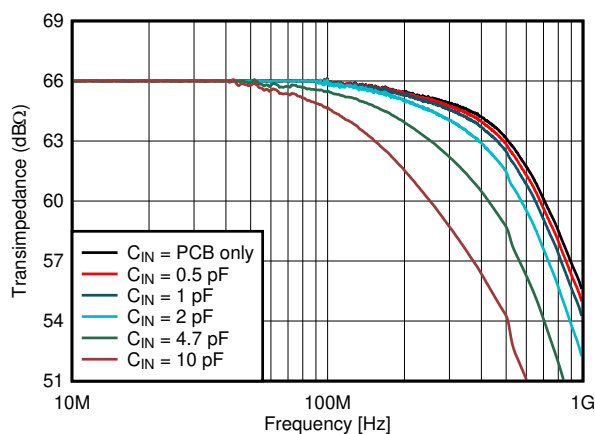


图 4-5. 小信号响应随输入电容的变化 (增益 = 2K)

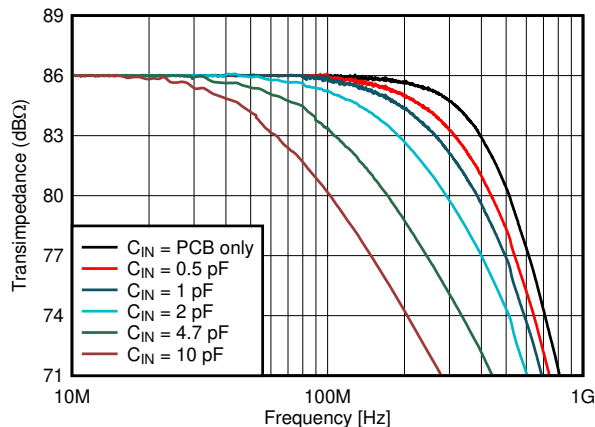


图 4-6. 小信号响应随输入电容的变化 (增益 = 20K)

如果需要额外的增益，还可以再添加一级放大器作为后级。

在本设计中，我们选择了 Marktech 光电二极管 MTAPD-06-009，并将光电二极管偏置在 -120V，以实现 100 的 APD 增益。在该偏置电压下，二极管电容约为 1pF。TIA LMH32401 设置为 20K 增益，根据上图，预期带宽约为 280MHz。

由于一阶系统的上升时间 = $0.35/BW$ ，我们可以预期此配置的上升时间约为 1.25ns。

图 4-7 展示了接收器的完整原理图。

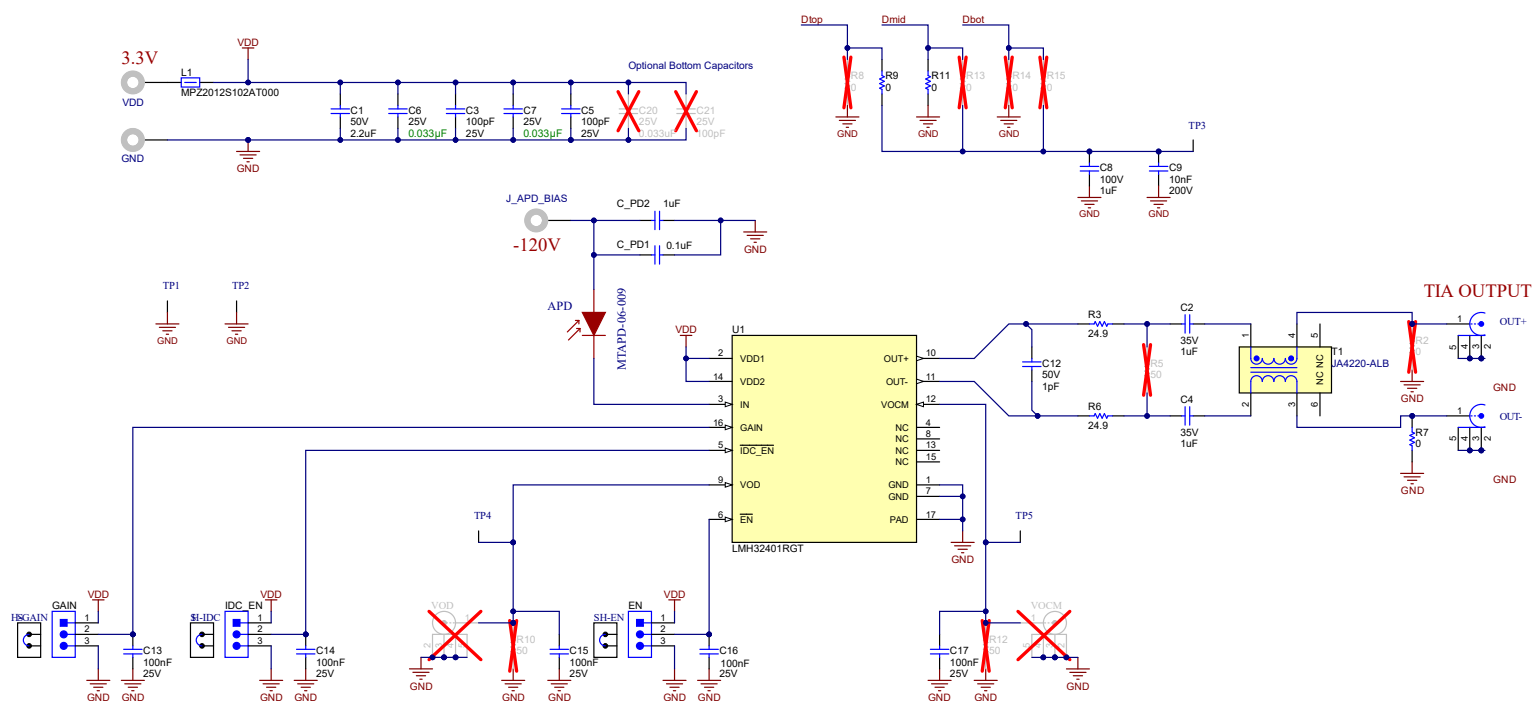


图 4-7. 接收器原理图

5 光学外壳设计

大多数 LiDAR 系统使用边缘发射或 VSCEL 半导体激光二极管。由于光通过极小输出孔径时会发生衍射的物理特性，光束在离开半导体表面后会快速且不均匀地发散。

在边缘发射激光二极管中，沿激光器 PN 结的两个正交轴存在两种主要光束发散类型：平行和垂直。由于边缘发射激光二极管的几何结构不对称，平行于 PN 结的发射孔径明显宽于沿垂直轴的孔径，导致沿平行轴的初始光束腰斑更宽。因此，根据光学衍射定律，较窄的孔径会引起更大的空间扩散。因此，尽管垂直轴的初始光束腰斑更窄，但其发散角却大得多。由于这种结构不对称性，离开激光二极管的原始光束会迅速变形为细长的椭圆形，而不是对称的圆形轮廓。因此，需要外部准直光学元件将这种强烈发散、扩散的光束转换为良好准直的平行光束。

本设计中用作发射器 (Tx) 光源的激光二极管 TL90AT03，其平行光束发散角为 10° ，垂直发散角为 25° 。使用焦距 22mm、直径 35mm 的平凸透镜对该激光器的发射光束进行准直。

在光路的接收 (Rx) 侧使用相同的透镜配置，以会聚返回的回波光脉冲并将其聚焦到雪崩光电二极管 (APD) 传感器的有效区域上，如图 5-1 所示。

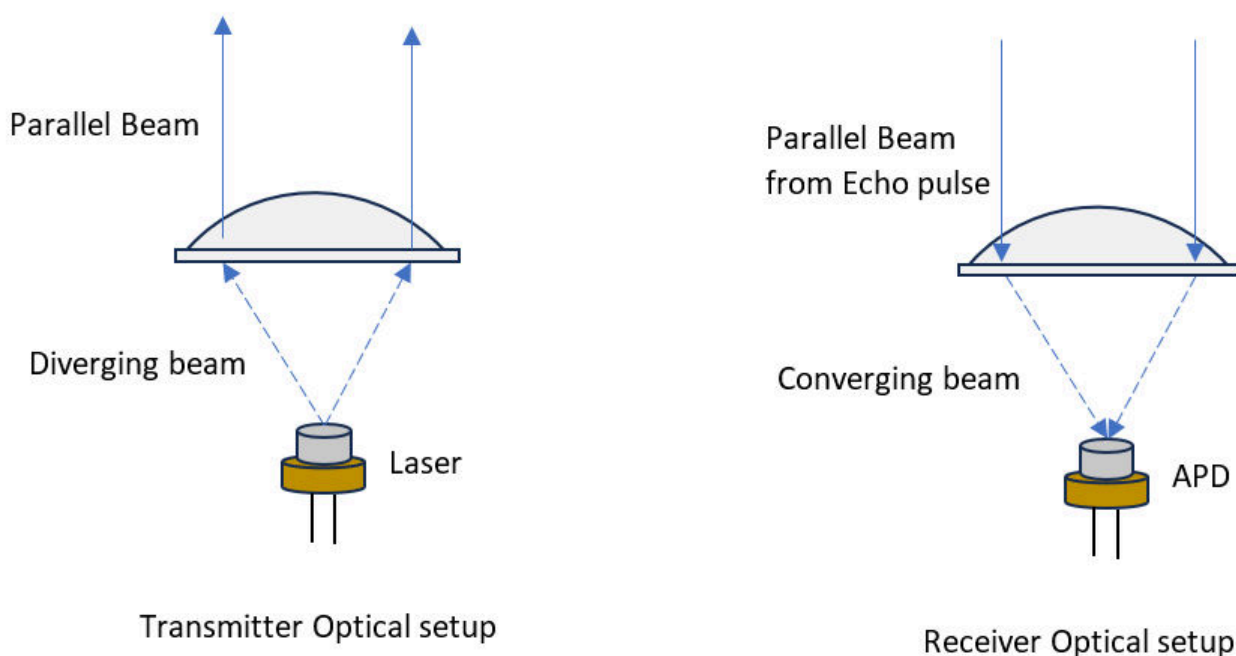


图 5-1. Tx 和 Rx 的光学透镜设置

6 测量设置

ToF 测量依赖于准确确定发射激光脉冲与接收回波之间的时间间隔。在将驱动 LMH13000 的激励信号用作起始基准的系统中，必须仔细校准从驱动器的 LVDS 输入到电流输出的传播延迟。如果不加以补偿，该延迟以及随温度和工艺变化的延迟变化会直接导致测距误差。一种稳健的替代方案是通过直接检测激光电流来生成起始基准，从而消除对驱动器内部传播特性的依赖。实现方法是 将一个检测电阻器与激光二极管串联，该电阻器同时用作阻尼元件以改善瞬态特性。该电阻器两端产生的电压通过电阻器和电容器网络进行电平位移和调理（如图 6-1 所示），以生成精确的起始脉冲基准，反映光发射的实际开始时刻。

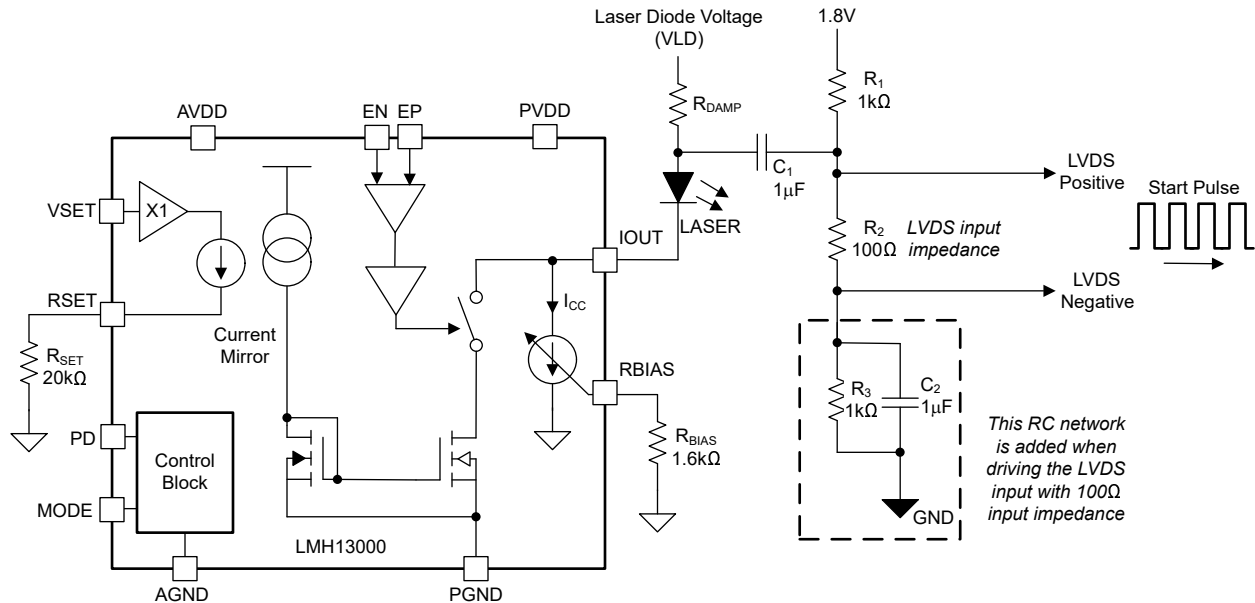


图 6-1. 由 IOUT 激光电流生成起始基准脉冲

对于本应用手册中描述的实验设置，使用增量测量方法，而不是绝对距离测量。系统不是确定目标到光源的绝对距离，而是测量相对于基线的距离变化。该方法本质上抵消了发射器和接收器路径中的固定系统延迟，包括 LMH13000 内部的传播延迟以及下游信号调理电路中的延迟。因此，系统无需显式校准驱动器传播延迟或随温度变化的时序变化，即可实现准确的相对距离跟踪。

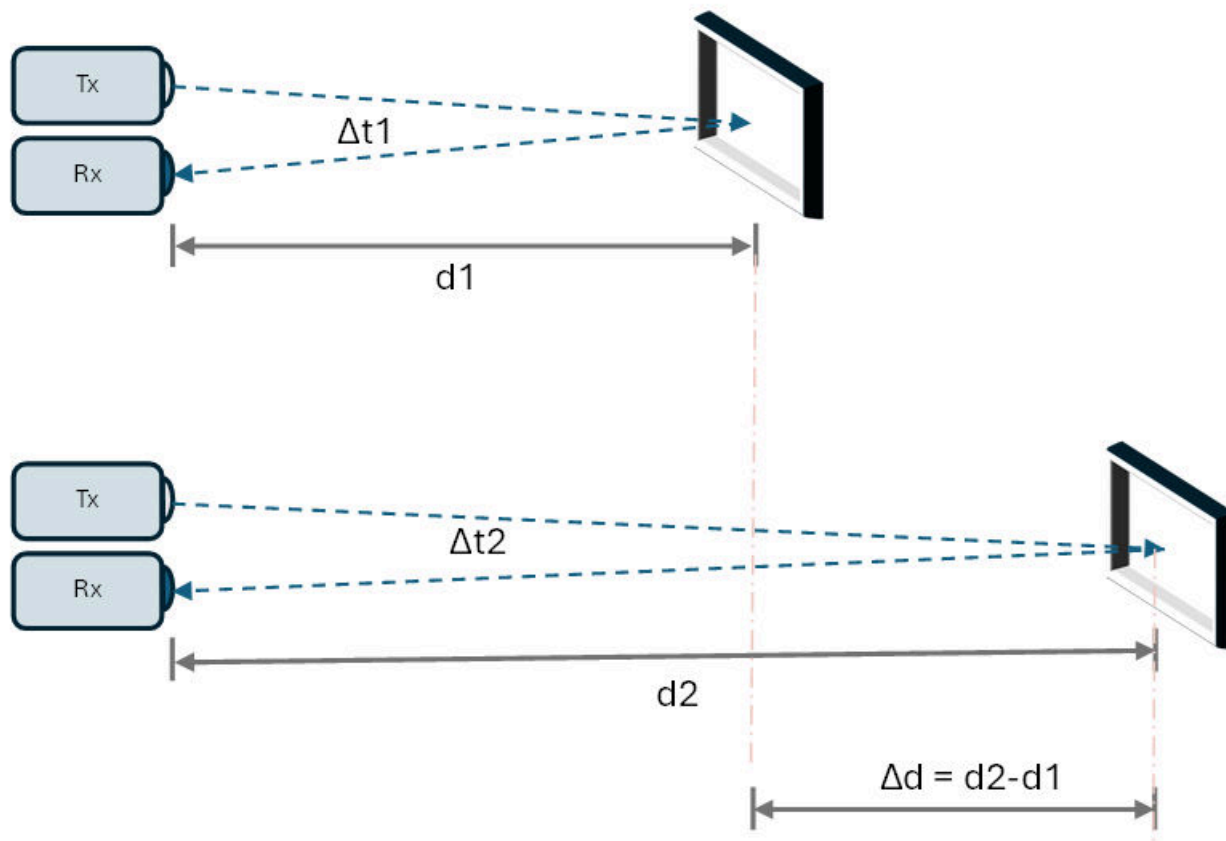


图 6-2. 增量距离测量方法方框图

$$\Delta t1 = tPD(Tx) + tPD(Rx) + ToF(d1) \quad (13)$$

$$\Delta t2 = tPD(Tx) + tPD(Rx) + ToF(d2) \quad (14)$$

$$\Delta t2 - \Delta t1 = ToF(d2) - ToF(d1) \quad (15)$$

$$= ToF(\Delta d) \quad (16)$$

$$\Delta d = [ToF(\Delta d) \times c] / 2 = [(\Delta t2 - \Delta t1) \times c] / 2 \quad (17)$$

其中

- c = 光速
- $tPD(Tx)$ = Tx 回路的传播延迟
- $tPD(Rx)$ = Rx 回路的传播延迟

7 实验室测量

该实验设置用于验证使用 LMH13000 发射器和 LMH32401 接收器组合信号链的直接飞行时间测量精度。首先将目标放置在初始位置 (d1)，通过测量 LMH13000 激励信号 (EP) 与 LMH32401 处理后的回波信号之间的延迟，在示波器上捕获相应的飞行时间。然后将目标向远处移动 1.5m 到新位置 (d2)，并在相同工作条件下重复测量。如图 7-1 和图 7-2 所示，示波器波形清楚地表明，脉冲延迟的增加与已知的 1.5m 位移精确对应。由于系统测量的是相对飞行时间，所有固定延迟（例如驱动器传播延迟、APD 和 TIA 处理延迟以及信号调理延迟）都会被抵消，只剩下光程长度的真实变化。这些结果证实，dToF 架构能够准确分辨小的距离变化，并且 LMH13000 与 LMH32401 的组合为高精度 LiDAR 应用提供了干净、可靠的计时链。

如图 7-1 和图 7-2 所示，示波器截图显示了测得的飞行时间波形，展示了目标位置 (d1) 和 (d2 = d1 + 1.5m) 的 LMH13000 激励脉冲与 LMH32401 处理后的回波信号之间的延迟。观察到的延迟增加与光程长度的预期变化一致。



图 7-1. d1 距离的飞行时间

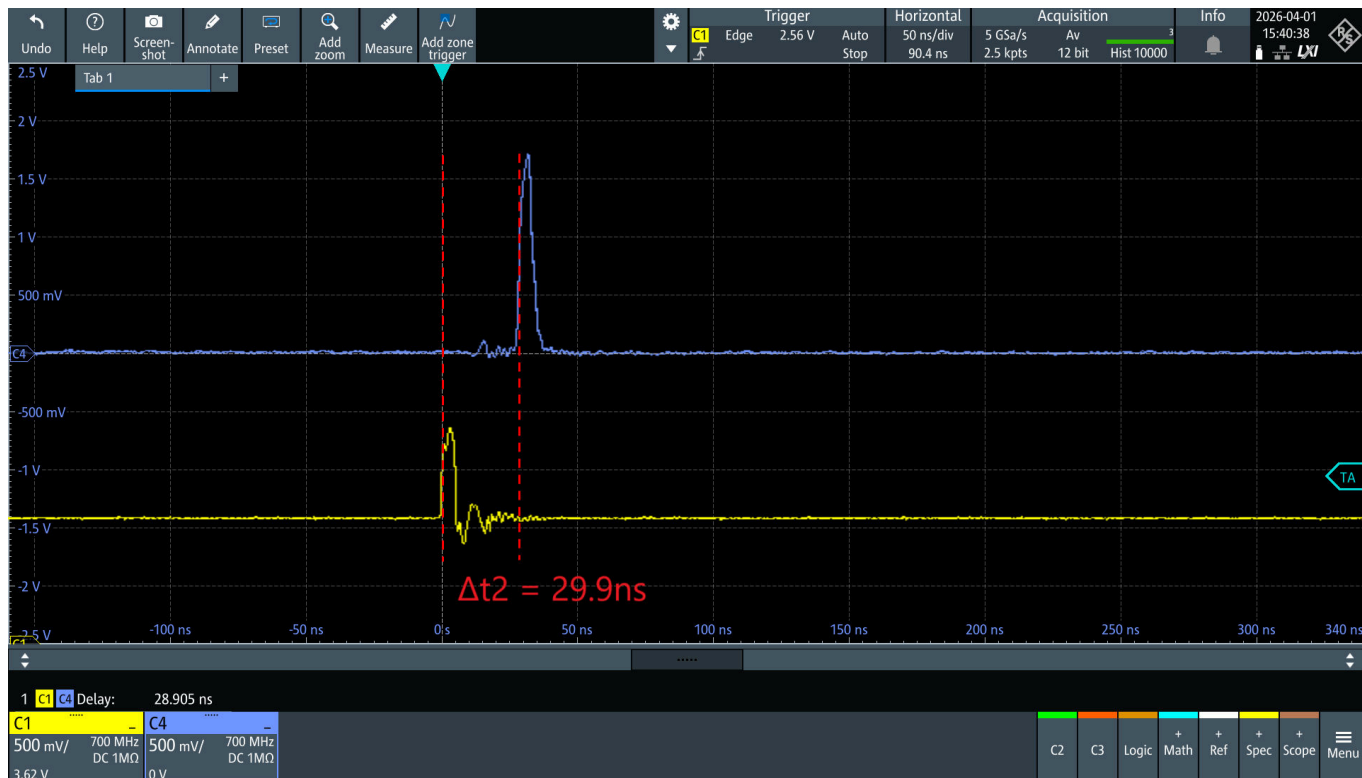


图 7-2. d2 距离的飞行时间

$$\Delta d(\text{calculated from ToF}) = \frac{[(\Delta t_2 - \Delta t_1) \times c]}{2} = \frac{[(28.9 - 18.8)\text{ns} \times (2.997 \times 10^8 \text{m/s})]}{2} \approx 1.5\text{m} \quad (18)$$

8 总结

TI 的 LMH13000 激光驱动器与 LMH32401 TIA 相组合，可实现高精度且易于使用的 dToF LiDAR 架构。LMH13000 可实现精确的激光电流控制，无需外部 FET 即可提供亚纳秒电流脉冲，为精确时序提供干净的光激励。通过直接检测激光电流以生成起始脉冲，可进一步提高精度，并无需校准传播延迟。在接收器侧，LMH32401 提供低噪声、高带宽的跨阻转换，专为基于 APD 的回波探测而设计。LMH32401 的集成增益控制和稳定性特性简化了补偿和布局，提高了各种工作条件下的稳健性。这些器件共同构成了一个紧密耦合的发射-接收链，专为高分辨率 LiDAR 设计。本应用手册最后一节提供的实验室测量结果验证了性能，确认实现了出色的时序精度和信号完整性。总体而言，LMH13000 和 LMH32401 可实现紧凑、精确且可量产的 dToF LiDAR 设计。

9 参考资料

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月