

Application Note

LMH13000 と LMH32401 を使用した直接タイム オブ フライト (ToF) LiDAR 設計

概要

光学検出および距離測定 (LiDAR) とは、レーザー光を使用して距離を測定するコア距離測定テクノロジーのことです。LiDAR を使用すると、物体や環境の高精度な 3 次元 (3D) マップや構造ポイント クラウドを作成できます。LiDAR には主に、直接タイム オブ フライト (dToF) と間接タイム オブ フライト (iToF) の 2 種類があります。dToF は、ナノ秒単位のレーザー パルスの往復移動時間を測定し、その時間を距離に変換することで物体の距離を決定します。一方、iToF は連続変調光を使用して、放出される信号と戻り信号の間の位相シフト (波形遅延) を測定します。この設計では、LMH13000 と LMH32401 を使用してそれぞれナノ秒 (ns) 単位の光パルスを送受信し、直接タイム オブ フライト (dToF) 手法に基づいて距離を測定する方法を示します。

目次

1 はじめに.....	2
2 説明.....	3
3 トランスミッタ.....	4
3.1 光出力と測定距離との関係.....	4
3.2 逆二乗法と距離.....	4
3.3 光出力により最大範囲が決定.....	4
4 レシーバ.....	6
4.1 TIA の安定性に関する検討事項.....	6
4.2 トランスインピーダンス アンプの選定: LMH32401.....	9
5 光学系ハウジング設計.....	11
6 測定の設定.....	12
7 ラボでの測定.....	14
8 まとめ.....	15
9 参考資料.....	16

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

LiDAR は、短いレーザー パルスを放射し、物体で反射した後にパルスが戻ってくるまでの時間を計測することによって距離を測定するリモート センシング技術です。これは、一般的にタイム オブ フライト (ToF) と呼ばれます。このプロセスを毎秒数百万回繰り返し、各距離測定を正確な角度情報や位置情報と組み合わせることで、LiDAR システムでは、実際の環境を正確に表現する高分解能の 3D ポイント クラウドを生成できます。

LiDAR 内では、iToF と dToF は 2 つの異なる距離抽出方法を表しています。これら 2 つは、基本的に異なる LiDAR の深度センシング手法です。どちらも、対象物までの光の往復時間を測定する必要がありますが、その時間情報の抽出方法が大きく異なります。

iToF では、トランスミッタは振幅変調または位相変調した連続光を放射し、レシーバ受信機は発信エコー信号と受信エコー信号の間の位相シフトを測定します。光の速度は一定であるため、位相シフトは往復中に光が移動した距離に直接変換されます。それに対して、dToF は短いレーザー パルスを送信し、高速検出器とタイミング回路を使用して各エコーパルスの正確な到着時間をピコ秒単位の精度で測定することにより、長距離、高精度の距離測定を実現します。

この記事では、テキサス インストルメンツのレーザー ドライバ LMH13000 と統合型トランスインピーダンス アンプ LMH32401 を使用して、dToF LiDAR 向けフロント エンドを設計する方法を説明します。

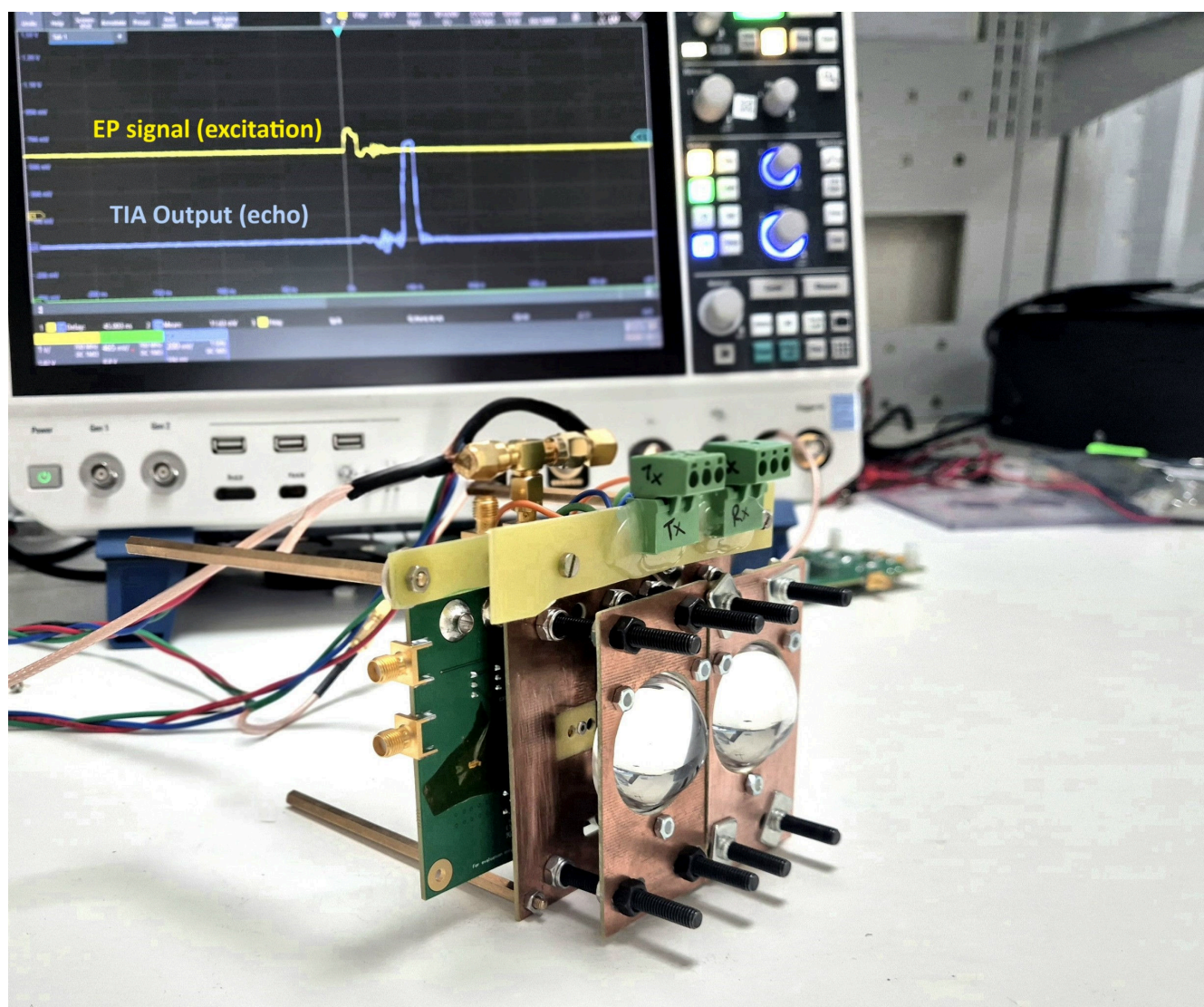


図 1-1. LiDAR の設定

2 説明

説明したように、直接タイム オブ フライトとは、光がソースから物体まで移動し、ソースに戻るまでにかかる時間 (Δt) を測定する手法のことです。この情報から、ソースから物体までの距離を算出できます。これをハードウェアに実装するには、狭い大出力の光パルスを生じ得るトランスミッタまたはソースと、物体に当たって反射した弱いエコーの光パルス信号を検出できるだけの感度を持つレシーバが必要です。トランスミッタとレシーバは通常、距離を測定する物体の方に向けて、並べて配置します。これにより、送信経路の信号と反射経路の信号の移動距離が同じになります。このように、ソースから物体までの距離 (d) は、光の速度 (c) に、光パルスのタイム オブ フライト (Δt) の半分を乗算した値になります。

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

この設計では、レーザー (TL90AT03) を光源として使用します。光源は、TI のレーザードライバ LMH13000 で駆動します。LMH13000 はレーザーをパルスし、赤外線の高いバーストを放射します。レーザーからの光学出力光はレンズを使用してコリメートされ、その後送信されます。その後、オープン スペースを通過し、光が経路上にある任意の物体に当たった時点で反射します。

反射光は収束レンズによって収集され、アバランシェ フォトダイオード (APD) に焦点を当てます。アバランシェ フォトダイオードでは、光パルスが小電流に変換されます。その後、この電流が増幅され、トランスインピーダンス アンプ LMH32401 を使用して電圧信号に変換され、反射パルスの到着を示すクリーンな電気信号が生成されます。

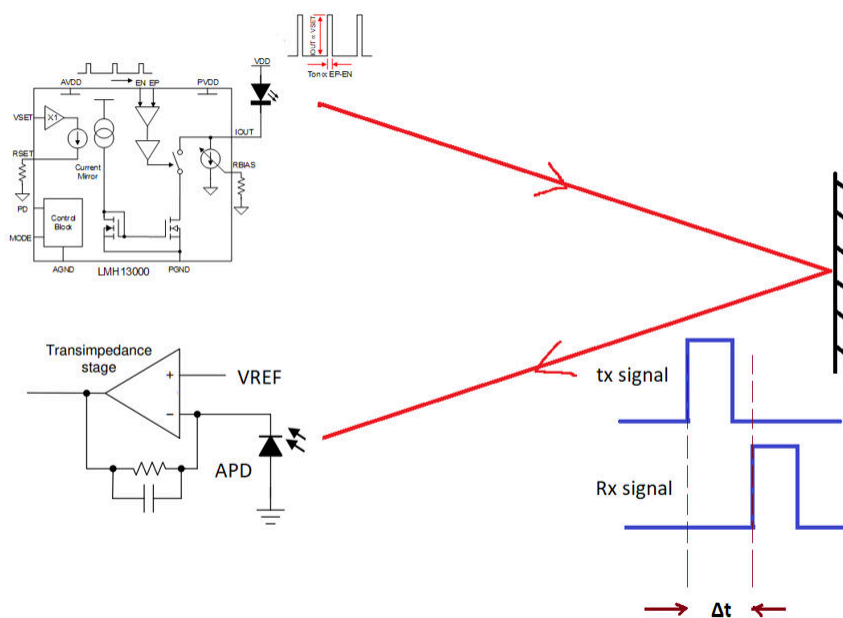


図 2-1. LiDAR の設定

3 トランスミッタ

トランスミッタ サブシステムには、高出力光エミッタと高精度電流ドライブ段が組み込まれており、長距離 LiDAR 動作に必要な狭い高エネルギー光パルスを生じます。この設計で選択した光源は、最大 20A のパルス電流を持続できる 905nm 赤外線デバイスである Osram の TL90AT03 レーザー ダイオードです。このダイオードは、長距離のタイム オブ フライト アプリケーションに最適です。このレーザを駆動するため、この設計では高速で正確なレーザー パルス用に最適化された電圧制御電流源であるテキサス インストルメンツの LMH13000 を使用しています。LMH13000 では、外部 FET なしでナノ秒 (ns) 未満の立ち上がり時間と立ち下がり時間を実現できるため、優れたパルス忠実性を維持しながら、トランスミッタ アーキテクチャを大幅に簡素化できます。レーザーのピーク電流は VSET ピンを使用してプログラムされ、印加された電圧とその結果発生する出力電流との間に線形関係があります。パルス タイミングと繰り返しは EP /EN 入力により制御されるため、放射される光パルスを正確に変調できます。このデバイスでは、モード 0 (5mA ~ 1A) とモード 1 (50mA ~ 5A) という 2 つの動作モードから選択できるため、設計者はさまざまな電力レベルや動作条件に合わせてドライバを構成できます。LMH13000 は本質的に電流出力デバイスであるため、複数のドライバを並列接続して利用可能なピーク電流を 5A を超える値にスケールアップでき、高レンジで高分解能の LiDAR システムの要件を満たす柔軟なトランスミッタ構成にすることができます。

3.1 光出力と測定距離との関係

LiDAR システムでは、光学出力電力と距離測定は基本的に互いに関連しています。つまり、距離によってセンサに戻る出力量が決められ、出力量によって LiDAR で測定できる最大距離が決まります。

3.2 逆二乗法と距離

レーザー光のパルスが空気中を通過すると、光が広がります。レーザー パルスが対象物に当たると、光はあらゆる方向に散乱します。反射して LiDAR のレシーバに戻る光は、逆二乗法則によって算定されます。

距離が長くなると、戻る光出力の強さは急激に低下します。物体までの距離を 2 倍にすると、戻る光出力は 4 の因数で低下します ($1 \div 2^2$)。2 倍の距離では、受信信号はせいぜい 25% です。

つまり、距離によってセンサに戻る出力量が決められ、出力量によって LiDAR で測定できる「最大距離」が決まります。

3.3 光出力により最大範囲が決定

戻り信号は距離とともに急激に弱くなるため、LiDAR システムには、反射光が背景ノイズ (たとえば、太陽光) よりも確実に強くなるように、十分な初期光学出力電力が必要です。

高いピーク電力: 非常に強力な短いレーザー光を放射することにより、往復の移動でも十分な光が残存するため、遠くの物体を検出できます。

安全限界値: 出力電力を無限に増やすことはできません。システムは、多くの場合、厳格な目の安全規則 (クラス 1 の制限) に準拠して、レーザーの波長 (一般に 905nm または 1550nm) に応じて最大光出力を制限する必要があります。

長距離の測定範囲を実現するために、非常に高いピークの光パルス出力を 2ns ~ 3ns のような非常に短い持続時間で送信すると同時に、デューティ サイクルをピーク電力に基づいて -0.1% 以下の非常に小さい割合に維持することを目標とします。そうすることで、レシーバが検出できる十分に強いエコー光パルス信号を確保しつつ、総光出力をクラス 1 レーザーの目の安全規則の制限内に維持することができます。

図 3-1 に、LMH13000 を使用して dToF LiDAR の光パルスを送信するレーザーの駆動方法を示します。

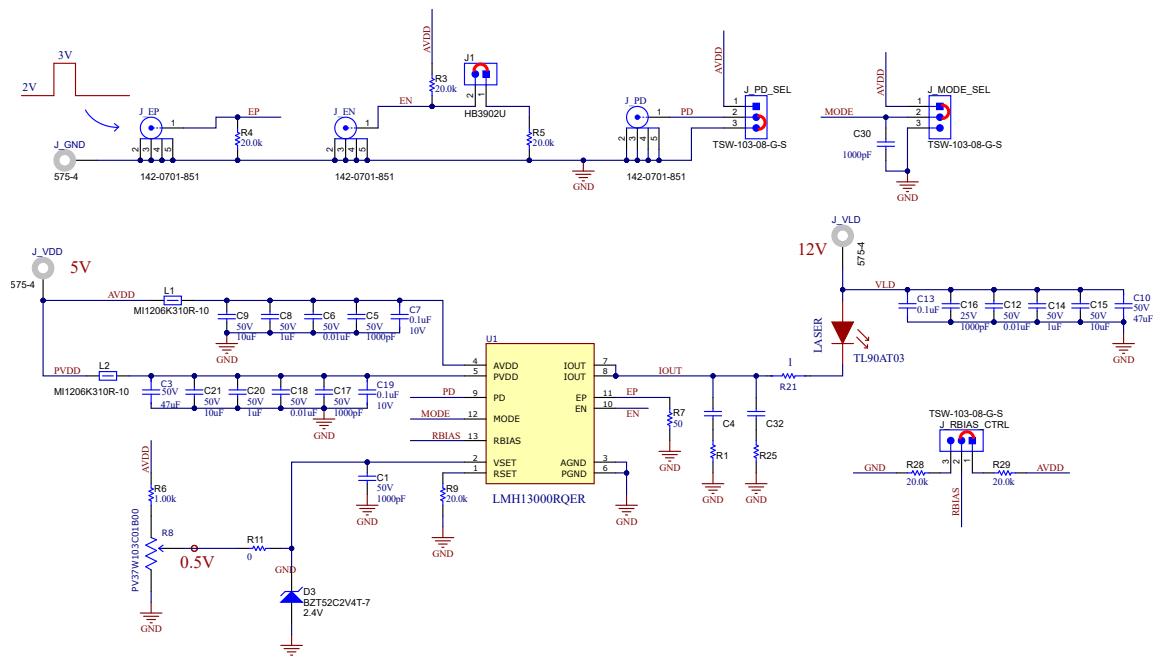


図 3-1. トランスミッタの回路図

4 レシーバ

レシーバのサブシステムは、弱い時間遅延の光エコーを、正確なタイム オブ フライト処理に最適なクリーンな電気信号に変換します。レシーバのサブシステムは、主にアバランシェ フォトダイオード (APD) とトランスインピーダンス アンプ (TIA) で構成されます。APD は光フロント エンドとして機能し、入射光子に応答して比例する電流を生成し、アバランシェ乗算によって内部ゲインを実現します。これにより、長距離 LiDAR 検出の感度が向上します。その後、この電流は、式 2 に従ってトランスインピーダンス ゲインを確立する帰還抵抗 (R_f) を使って構成されるオペアンプである TIA によって使用できる電圧に変換されます。

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

オペアンプでは反転入力でバーチャル グランドが維持されるため、APD は安定したバイアス ポイントを認識し、線形で予測可能な電流 / 電圧変換を維持します。追加のゲインが必要な場合は、TIA の後に 2 次側電圧増幅段を追加できます。

高性能レシーバを設計するには、安定性、ノイズ、帯域幅に細心の注意を払う必要があります。APD および PCB のパターンは、帰還抵抗と相互作用する入力容量を導入し、位相マージンを劣化させてリンギングや発振を引き起こす可能性があります。安定性を維持するために、小さな帰還コンデンサ C_f を R_f と並列に配置し、周波数応答を成形して、適切に減衰した過渡動作を維持します。

アンプからの入力バイアス電流も DC 誤差に直接寄与します。バイアス電流は R_f を乗算するためです。したがって、オフセットを最小限に抑えるためにバイアス電流が非常に小さい JFET 入力または CMOS 入力のアンプが推奨されます。

最後に、ゲインと帯域幅は本質的に関連しています。 R_f を大きくすると感度は向上しますが、入力容量と帰還インピーダンスの複合的な影響により帯域幅は減少します。LiDAR レシーバの設計で必要なダイナミックレンジ、ノイズ性能、タイミング精度を達成するには、APD、TIA アーキテクチャ、補償部品を適切に組み合わせる選択することが不可欠です。

4.1 TIA の安定性に関する検討事項

フォトダイオードが理想的な電流源であると仮定すると、TIA の出力電圧は式 3 で求められます。

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

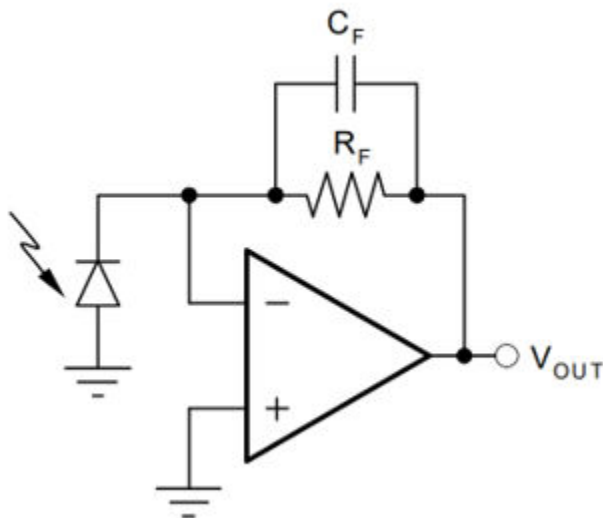


図 4-1. 理想的なフォトダイオード TIA 回路

実用的な実装では、フォトダイオードを単に理想的な電流源として扱うことはできません。代わりに、このデバイスは、等価シャント抵抗 R_D 、接合部容量 C_D と並列に接続された理想的な電流源としてより正確にモデル化されています。オペアンプの入力容量も軽視できないため、 C_D の一部として含める必要があります。

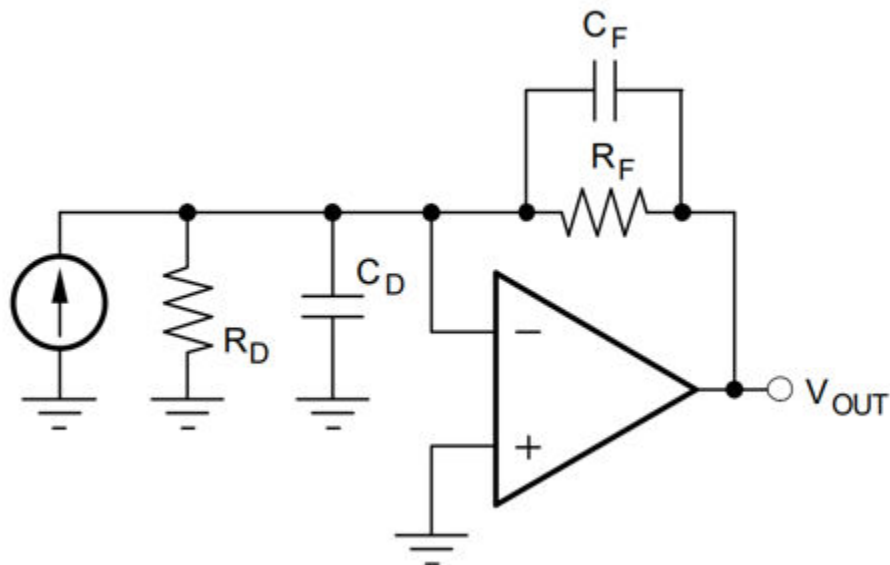


図 4-2. TIA でのフォトダイオード電氣的モデル

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

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

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

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

一般に、 $R_D \gg R_F$ 、 $R_F || R_D = R_F$ であり、DC ゲインもユニティになります。

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

これは、 f_Z が常に f_P より小さいことを意味します。

システムが安定するには、 f_P をオペアンプの開ループ曲線内に配置する必要があります。

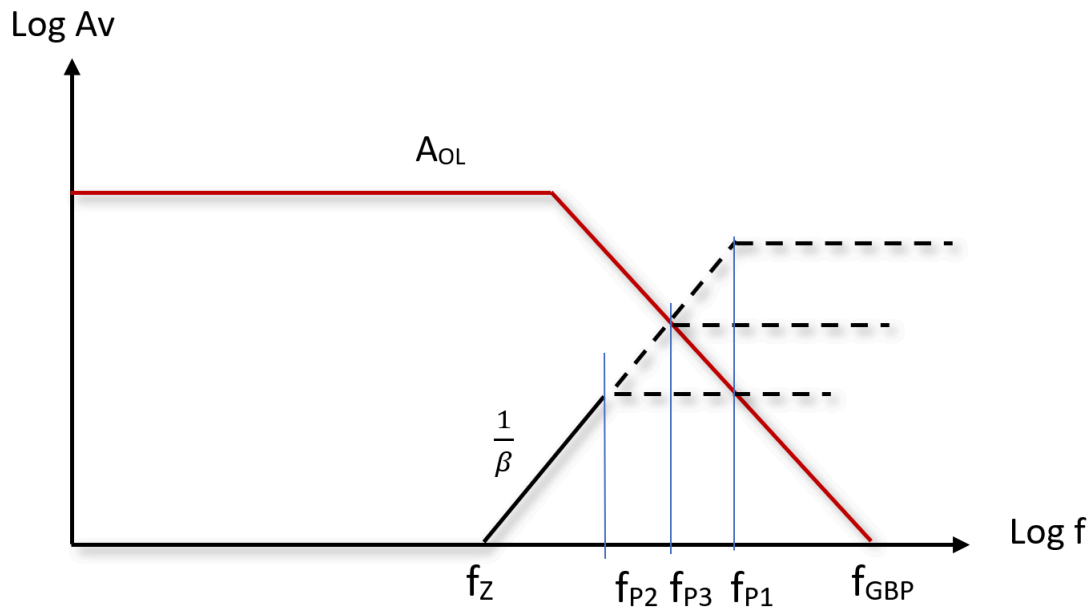


図 4-3. TIA の開ループおよび閉ループ応答と周波数との関係

図 4-3 に、閉ループ応答 (フィードバック係数の逆数) と開ループ ゲイン曲線が交差する 3 種類のシナリオを示します。2 つの曲線の閉鎖速度が 40dB のときに不安定になります。この状況は、 f_{P1} の場合のように f_P が開ループ曲線から外れた場合に発生し、この場合は回路が発振します。 f_{P2} の場合のように f_P が開ループ曲線内にある場合、トランスインピーダンス回路は無条件に安定しますが、この場合の安定性はトランスインピーダンス帯域幅との関係で決まります。ベストプラクティスとして、 f_{P3} のように、 f_P を開ループ ゲイン曲線上に配置します。

f_P は帰還回路によって決定されるため、 C_F を慎重に選択する必要があります。ノイズ ゲインに対する高周波漸近線は容量値のみで決まることに着目すれば、このプロセスを大幅に簡略化できます。

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

f_P が AOL 曲線上にある場合、

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

C_F の求め方:

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

フォトダイオード容量とオペアンプの GBP を決定したら、安定性を維持するために、式 9 ~ 式 11 に従って帰還コンデンサの容量値を適切に選択する必要があります。

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

この結果から、特定のオペアンプとフォトダイオードについて、トランスインピーダンスの帯域幅は帰還抵抗の平方根に反比例することがわかります。したがって、帯域幅が重要な要件である場合、最善のアプローチは、中程度のトランスインピーダンス ゲイン段に続いて広帯域電圧ゲイン段を選択することです。

4.2 トランスインピーダンス アンプの選定: LMH32401

LMH32401 は、プログラマブル ゲイン トランスインピーダンス アンプ (TIA) 段と、固定ゲインのシングルエンド入力 / 差動出力アンプ段を搭載した統合型デバイスであり、主に LIDAR およびパルス ToF システム向けに設計されています。

LMH32401 は、フォトダイオード シンク (高速回復クランプ) とソース (長い回復によるソフト クランプ) 構成の両方をサポートしています。プログラマブル ゲインの TIA 段と、それに続く固定ゲインの差動出力段を備えています。特定のフォトダイオード容量については、低ゲイン構成でより高い帯域幅に対応しますが、高ゲインでは入力換算ノイズが低くなります (出力は $\times$ 倍増しますが、ノイズの増加は $\sqrt{\times}$ だけです)。ゲインは、GAIN ピンにより制御されます。低ゲイン モードの場合は Low、高ゲイン モードの場合は High です。

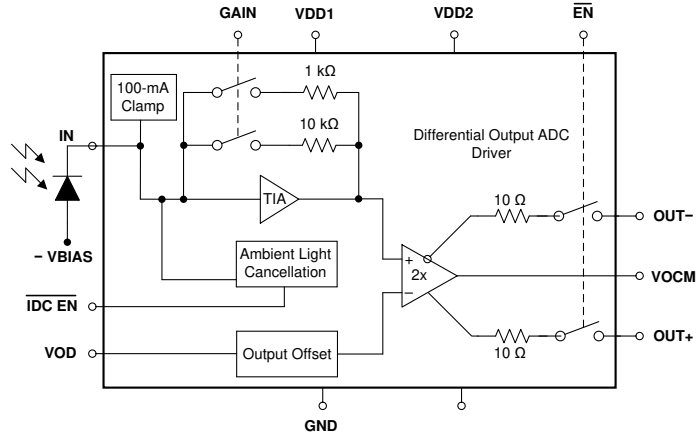


図 4-4. LMH32401 のブロック図

LMH32401 を使用する利点は、幅広い入力コンデンサ値に対して、外部補償コンデンサを必要としないことです。フォトダイオードの容量値と帯域幅要件に基づいて、使用するゲインモードをユーザーが選択できます。図 4-5 および図 4-6 に、低ゲイン モードと高ゲイン モードそれぞれについて、さまざまな入力コンデンサ値での LMH32401 の帯域幅を示します。

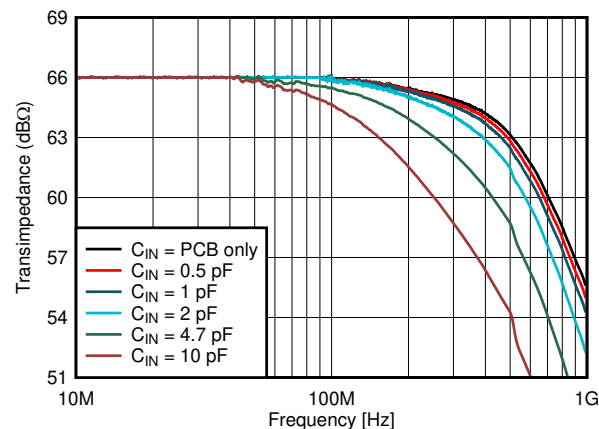


図 4-5. 小信号応答と入力容量との関係 (ゲイン = 2K)

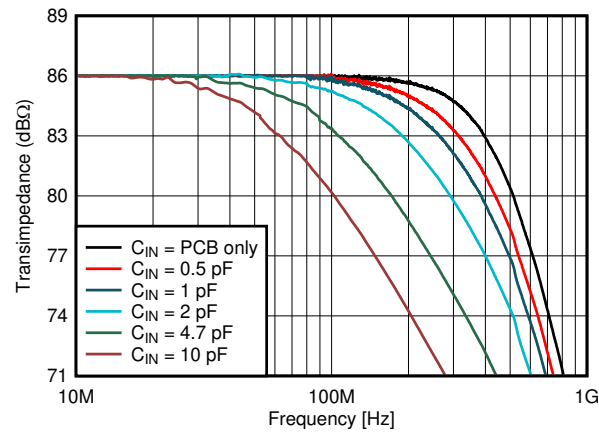


図 4-6. 小信号応答と入力容量との関係 (ゲイン = 20K)

さらにゲインが必要な場合は、2 台目のアンプを次の段として追加することもできます。

この設計では、Marktech フォトダイオード MTAPD-06-009 を選択し、100 の APD ゲインが得られるように -120V でフォトダイオードをバイアスしました。このバイアス電圧では、ダイオード容量は約 1pF です。TIA LMH32401 は 20k のゲインに設定され、上のグラフから、期待される帯域幅は約 280MHz となります。

1 次システムでは立ち上がり時間 = $0.35/BW$ なので、この構成では立ち上がり時間が約 1.25ns と予想できます。

図 4-7 に、レシーバの全回路図を示します。

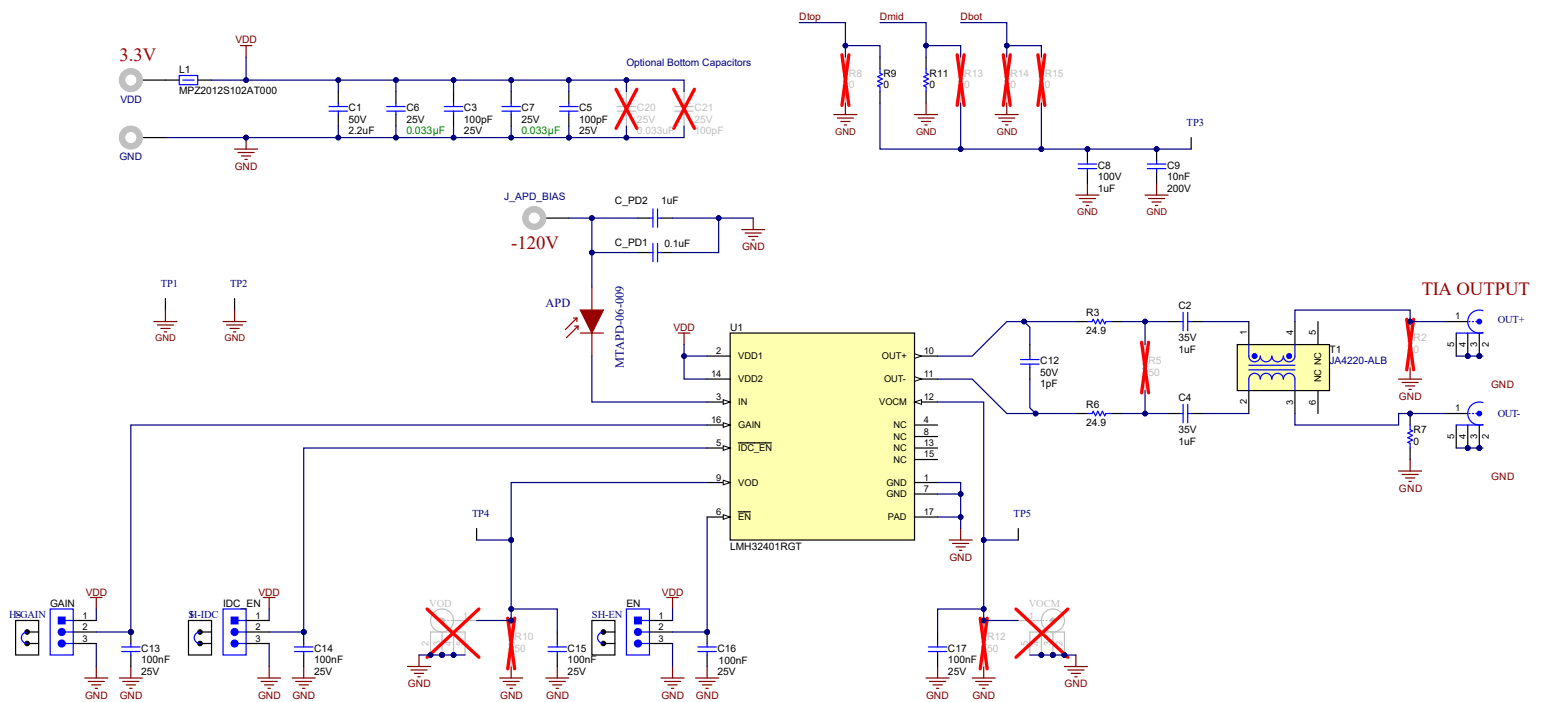


図 4-7. レシーバの回路図

5 光学系ハウジング設計

ほとんどの LiDAR システムでは、エッジ発光または **VSCEL** 半導体レーザー ダイオードを使用します。極めて小さい出力開口部を通る光回折の物理的性質のため、半導体表面から出るとビームは急速かつ不均一に発散します。

エッジ発光レーザー ダイオードでは、レーザーの **PN** 接合の 2 つの直交軸に沿った 2 つの主要な種類のビーム発散、つまり、平行と垂直があります。エッジ発光レーザー ダイオードの非対称な形状により、**p-n** 接合に平行な放射開口部は垂直軸に沿った開口部よりも著しく広く、平行軸に沿った初期ビーム ウェストが広がります。その結果、光学回折の法則に従って、開口部が狭いほど空間的な広がりが大きくなります。したがって、垂直軸は、初期ビーム ウェストが狭いにもかかわらず、実質的に発散角が大きく高くなります。この構造的非対称性のため、レーザー ダイオードから出る生ビームは、対称な円形プロファイルではなく、細長い楕円形に急速に変形します。つまり、この強く発散するビームを適切にコリメートされた平行光線に変換するには、外部コリメート光学系が必要です。

この設計で使用されているレーザー ダイオード **TL90AT03** は、トランスミッタ (**Tx**) の光源として機能し、**10°**の平行ビーム発散と **25°**の垂直発散を示します。このレーザーからの送信ビームのコリメーションは、焦点距離 **22mm**、直径 **35mm** のプラノ凸レンズを使用して実現されます。

図 5-1 に示すように、光経路の受信 (**Rx**) 側で同一のレンズ構成を使用して収束し、帰還エコーの光パルスの焦点をアバランシェ フォトダイオード (**APD**) センサのアクティブ領域に合わせます。

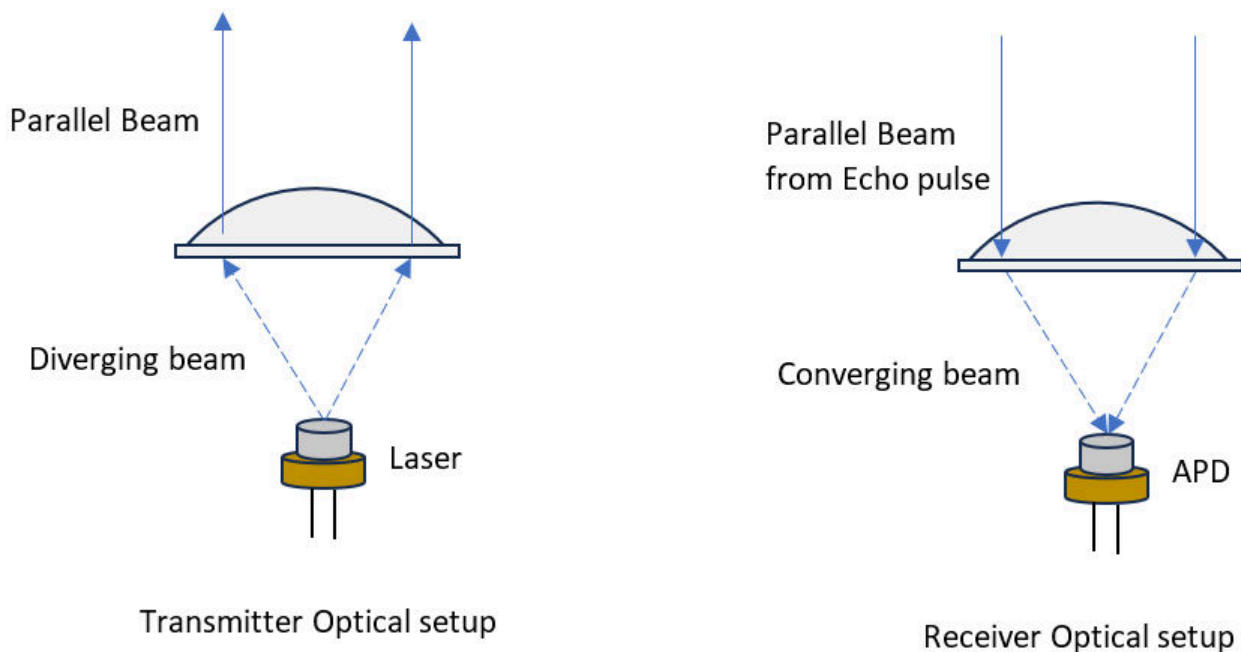


図 5-1. Tx および Rx 用の光学レンズの設定

6 測定の設定

ToF の測定を行うには、送信されたレーザー パルスと受信エコーの間の間隔を正確に決定する必要があります。LMH13000 を駆動する励起信号を開始基準として使用するシステムでは、ドライバの LVDS 入力から電流出力への伝搬遅延を慎重に較正する必要があります。温度およびプロセス間のこの遅延と遅延変動は、補正されないままにしておくと、距離測定誤差に直接影響します。堅牢な方法として、レーザー電流を直接検出して開始基準を導出することもできます。こうすることで、ドライバの内部伝搬特性に依存しなくなります。これは、直列センス抵抗をレーザー ダイオードとともに挿入することで実現され、同時にダンピング素子として機能して、過渡動作を改善します。この抵抗の両端に発生する電圧は、図 6-1 に示すように、抵抗とコンデンサのネットワークを使用してレベル シフトおよび調整が行われ、実際の光放射の開始を反映する正確なスタート パルスリファレンスを生成します。

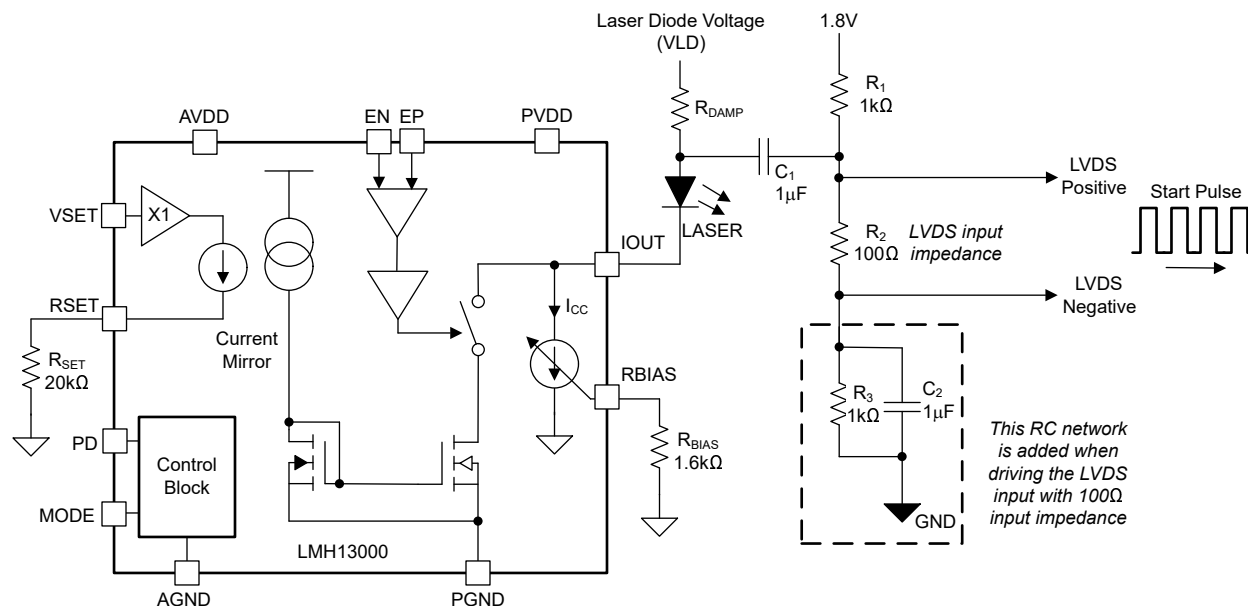


図 6-1. IOUT レーザー電流からリファレンス パルス生成を開始

このアプリケーション ノートで説明する実験的な設定では、絶対距離測定ではなく、デルタ測定アプローチを使用します。ソースからの物体までの絶対距離を決定する代わりに、ベースラインに対する距離の変化を測定します。この方法では、LMH13000 内の伝搬遅延や下流のシグナル コンディショニング回路の伝搬遅延を含めて、トランスミッタとレシーバの両方のパスから固定システム遅延を本質的に相殺できます。その結果、ドライバの伝播遅延や温度に依存するタイミング変動を明示的に較正することなく、正確な相対距離をトラッキングすることが可能になります。

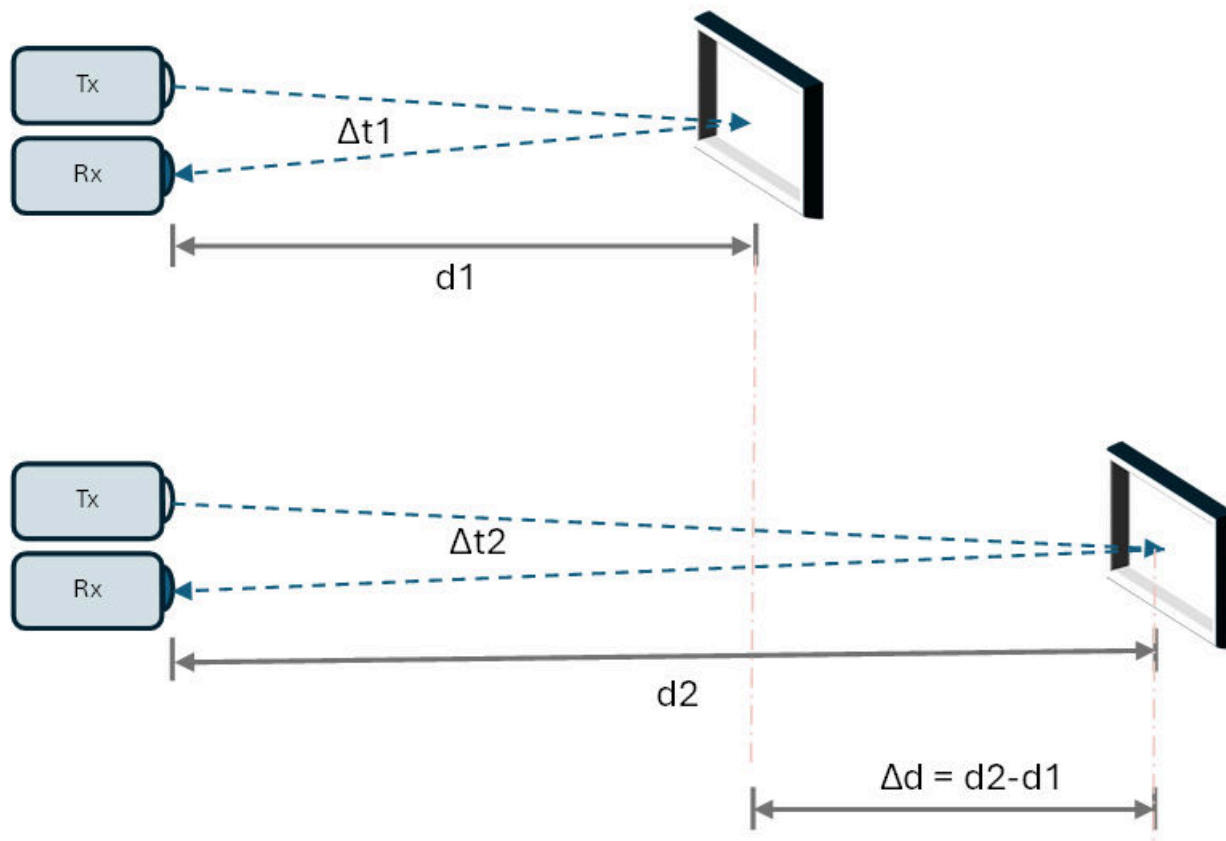


図 6-2. デルタ距離測定アプローチのブロック図

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

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

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

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

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

ここで、

- C = 光の速度
- tPD (Tx) = Tx 回路の伝搬遅延
- tPD (Rx) = Rx 回路の伝搬遅延

7 ラボでの測定

実験用の設定に基づき、LMH13000 トランスミッタと LMH32401 レシーバの信号チェーンの組み合わせを使用して、直接タイム オブ フライト測定の精度を検証します。対象物がまず初期位置 (d1) に配置され、LMH13000 の励起信号 (EP) と LMH32401 から処理されたエコー信号との間の遅延時間が測定されることで、対応するタイム オブ フライト (ToF) がオシロスコープでキャプチャされます。次に、対象物が 1.5 m 先の新しい位置 (d2) まで移動され、同じ動作条件下で測定が再度行われます。図 7-1 および図 7-2 に示すオシロスコープのパターンは、既知の 1.5m の移動に正確に対応するパルス遅延の増加を明確に示しています。システムでは相対的なタイム オブ フライトが測定されるため、ドライバ伝搬遅延、APD および TIA 処理遅延、シグナル コンディショニング遅延などのすべての固定遅延はキャンセルされ、光パス長の真の変化のみが残ります。これらの結果から、dToF アーキテクチャは、微小な距離の変化を正確に解決し、LMH13000 と LMH32401 の組み合わせが、高精度 LiDAR アプリケーション向けに設計されたクリーンで信頼性の高いタイミング チェーンを提供することが確認されます。

図 7-1 と図 7-2 に示すスコープ ショットは、物体位置 (d1) および (d2 = d1 + 1.5m) について、LMH13000 励起パルスから LMH32401 で処理されたエコー信号までの遅延を示すタイム オブ フライトの測定波形です。観察される遅延の増加は、予想される光パス長の変化と一致しています。

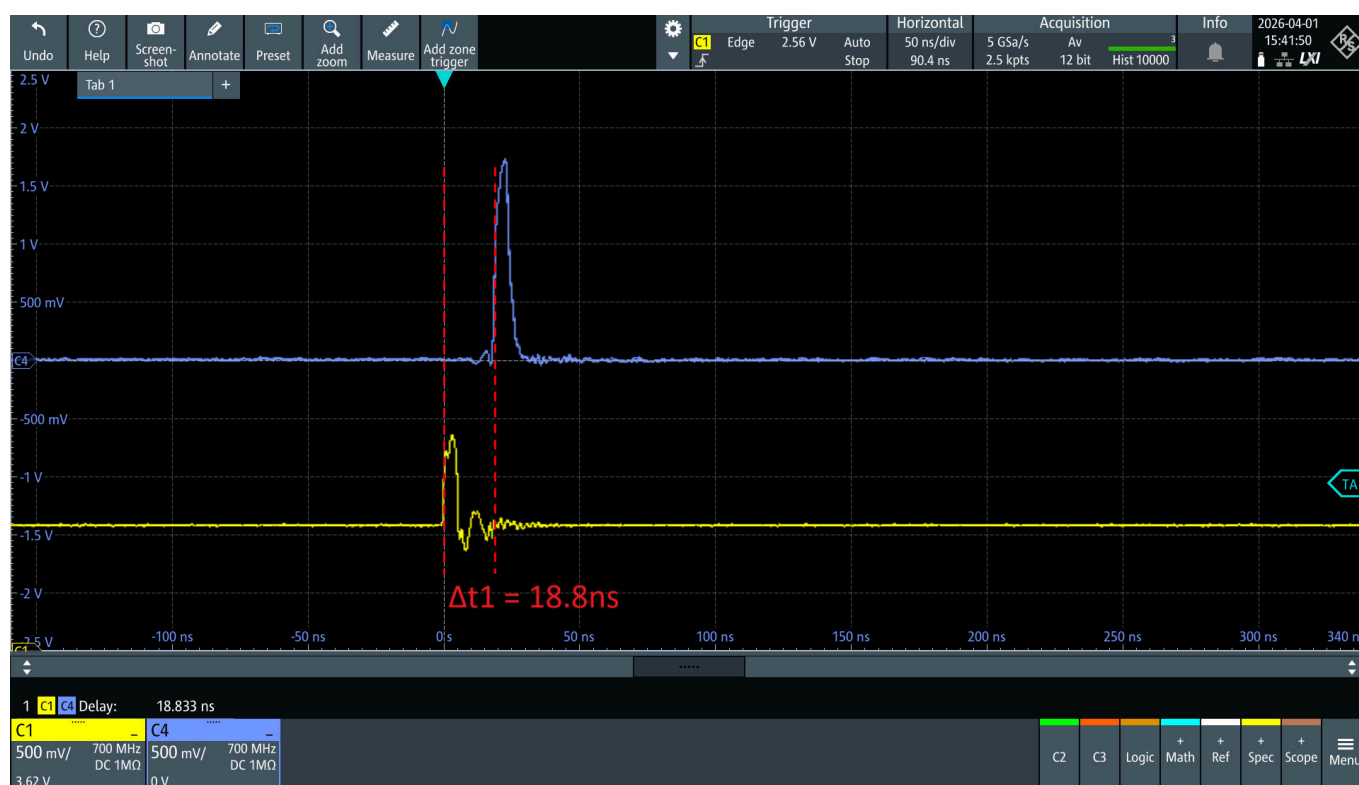


図 7-1. d1 距離の ToF

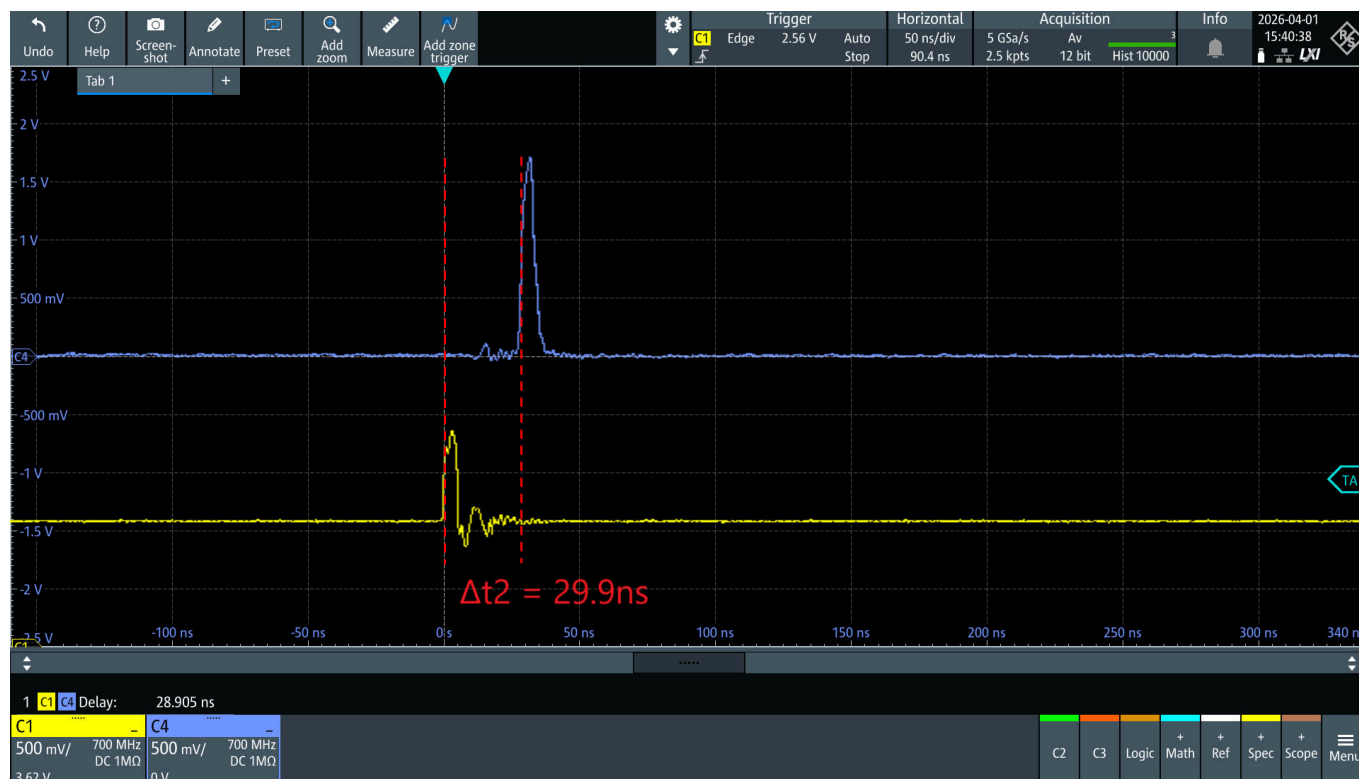


図 7-2. d2 距離の ToF

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

8 まとめ

TI の LMH13000 レーザー ドライバと LMH32401 TIA の組み合わせにより、高精度で使いやすい dToF LiDAR アーキテクチャを実現できます。LMH13000 では、高精度のレーザー電流制御が可能で、外部 FET なしでナノ秒未満の電流パルスを提供することができ、正確なタイミングでクリーンな光励起を実現します。レーザー電流を直接検出してスタートパルスを生成することで、精度がさらに向上し、伝播遅延の較正が不要になります。レシーバ側では、LMH32401 は APD ベースのエコー検出用に設計された低ノイズ、高帯域幅のトランスインピーダンス変換を提供します。LMH32401 の内蔵ゲイン制御および安定性機能により、補償とレイアウトを簡素化できるため、全動作条件にわたって堅牢性が向上します。これらのデバイスを組み合わせることで、高分解能 LiDAR 用に設計された密結合の送受信チェーンが形成されます。このアプリケーション ノートの最後のセクションでは、ラボ測定の結果を示しており、性能の検証や、優れたタイミング精度とシグナル インテグリティの確認が行えます。このように、LMH13000 と LMH32401 により小型、正確、かつ量産対応の dToF LiDAR 設計を実現できます。

9 参考資料

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月