

LiDAR および ToF システム向け、ナノ秒レベルの高精度レーザー パルス制御の実現

Leaphar Castro

Member Group Technical Staff

Anant Sinha

Application Engineer, High-Speed Amplifiers

概要

自動運転車、産業オートメーション、先進ロボティクスの普及が進むにつれて、信頼性の高い 3D 距離測定およびセンシングへの需要が高まっています。LiDAR およびタイム オブ フライト (ToF) システムは、距離や空間情報を測定するために、精密に制御されたレーザー パルスに依存しています。こうした要件を満たすには、高いピーク電流を供給し、温度変化や経年変化に対してパルス間の安定性を維持できるレーザー ドライバが必要です。ナビゲーション用途であれ高速産業検査用途であれ、これらのシステムは、実環境下において高速かつ安定し、再現性の高いレーザー パルスに依存しています。ゲートドライバ、外部電界効果トランジスタ、電流検出素子を使用する従来のディスクリートトポロジは、特定の設計要件を満たすことができます。ただし、レイアウトの複雑さ、キャリブレーションの工数、放熱性能の面でトレードオフが生じることがよくあります。

レーザー パルス制御が困難な理由

レーザー ドライバは、単に電流を供給するだけではありません。これらは、LiDAR システムや ToF システムが距離を計算するために使用するタイミング情報に直接影響を及ぼします。いくつかの要因からなる単純なタイミングの変動バジェットを考えてみましょう。本記事では、次の 3 つの要因を挙げます。

- 立ち上がりおよび立ち下がり時間 ($t_{r/f}$): パルスが検出スレッシュホールドを通過する速度。
- 伝播遅延 (t_{pd}): トリガから実際の発光までに要する時間。
- パルス間変動 (t_{pp}): パルスごとにタイミングまたは振幅がドリフトする量。

立ち上がり / 立ち下がり時間の影響

LiDAR および ToF システムは、レーザー パルスがターゲットまで到達し、レシーバに戻るまでの往復時間を計算することで距離を測定します。わずかな距離の変化を識別できる能力は、パルス エッジが無光状態から全光状態へ遷移する速度に依存します。立ち上がり / 立ち下がり時間が短縮されると、距離の不確かさが減少し、レシーバはより明確な基準ポイントを得られます。高分解能システムでは、立ち上がり / 立ち下がり時間は通常 1ns ~ 5ns の範囲となります。

パルス エッジが遅い場合、信号がレシーバの検出スレッシュホールドを超える正確な瞬間を、システムは判定できません。したがって、 $t_{r/f}$ が 1ns のエッジは、約 150mm の距離の不確かさを生じさせます。これは **式 1** で近似されます。

$$\Delta D = \frac{ct_{r/f}}{2} \quad (1)$$

ここで、 ΔD は距離の不確かさを表し、 $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ です。

この不確かさは、パルス エッジが遅くなるほど増大します。パルス エッジは、パッケージやプリント基板 (PCB) のインダクタンスなどの寄生成分に加え、レーザー ダイオードやドライバ出力の容量によって制限される可能性があります。たとえば、 $t_{r/f}$ を 500ps から 1ns に増やすと距離の不確かさが 2 倍になり、2ns のエッジではそれが 300mm 近くまで拡大し、システムは ΔD より小さいターゲット距離の差を識別する能力が制限されます。

伝搬遅延

高速光学システムでは、1 ナノ秒の違いが重要になります。伝搬遅延が温度、電源電圧、部品の許容誤差によって変化すると、距離計算に使用するタイミング基準がシフトし、チャネ

ル間の同期が乱れる可能性もあります。ダイレクト ToF アプリケーション (dToF) では、 t_{pd} の 100ps の変動は、**式 2** に示す ToF の関係式に基づき、約 30mm の距離誤差に相当します。

$$D = c \times t \quad (2)$$

ここで、 $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 、 D は距離、 t は時間を表します。

余分な遅延はすべて、距離測定誤差に直接つながります。**図 1** に示すように、500ps の変動によって往復距離の誤差が 150mm を超える可能性があります。これは、センチメートルレベルまたはミリメートルレベルの精度を目標とする dToF システムにおいては許容できません。

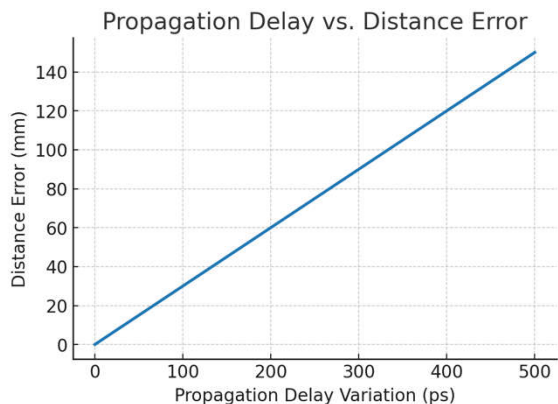


図 1. 伝搬遅延と距離誤差 (推定値) との関係

システムのアライメント中に固定遅延をキャリブレーションすることは可能ですが、自己発熱などの可変遅延は測定ごとの不確かさを生じさせ、容易には補正できません。

パルス間の安定性

高速で狭いレーザーパルスであっても、パルスごとに一貫している必要があります。ピーク電流の変動は光出力の変化に直接つながり、測定精度やシステムの信頼性を低下させます。このドリフトの一般的な要因は、温度変化、電源電圧の変動、デバイスの経年劣化です。

システムの観点から見ると、レーザは戻ってきた光信号に基づいて距離を決定します。したがって、パルス強度の違いが距離の変化として誤認される可能性があり、特に戻り信号が検出スレッシュホールドに近づく長距離の場合は顕著になります。スレッシュホールドベースの距離測定システムでは、ピーク電

流が 1% 変化すると光出力が約 1% 変化します。これにより、数十センチ程度の距離誤差が発生する可能性があります。**図 2** に示すように、 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ のわずかな振幅変動でも、パルスエンベロープやパルスあたりの光エネルギーが変化し、距離測定の精度と、時間経過における再現性が低下する可能性があります。そのため、高性能設計では駆動電流を厳密に制御し、すべての動作条件において t_{pp} の変動を数パーセント以内に維持します。

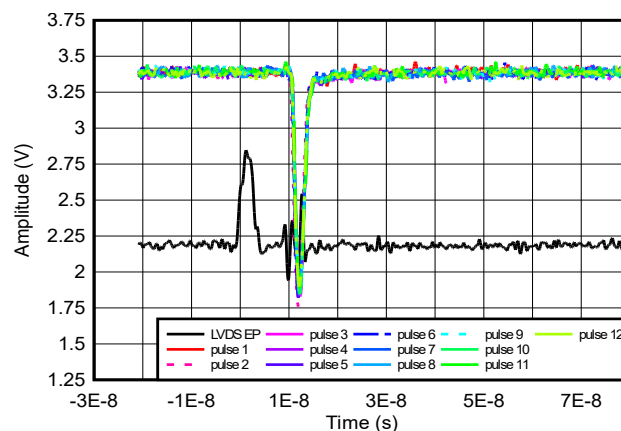


図 2. 12 パルス、1.5A 電流、 $R_{damp} = 1\Omega$ 、 5Ω 抵抗と 330pF コンデンサからなるスナバ 2 ペア、 $AVDD = PVDD = VLD = 5\text{V}$ におけるパルス間振幅

システムレベルのタイミング制約が定義できれば、次のステップは、それらを実際のレーザードライバの実装に落とし込むことです。

高精度レーザーパルス制御の実装

正確なレーザーパルスを生成するには、ダイオードに電流を供給するだけでは不十分です。ドライバは、高いピーク電流を高速なエッジで供給し、予測可能な遅延、再現性のあるパルス振幅を実現する必要があります。TI の LMH13000 高速レーザードライバは、**式 3** に示すように、 V_{SET} ピンの入力電圧を I_{OUT} における正確に制御されたシンク電流に変換することで、パルスを生成します。**図 3** に示すように、D/A コンバータ (DAC) または基準電源によって V_{SET} が設定され、デバイス内部の電流ミラーおよび制御回路がレーザーダイオードを流れる電流を制御します。 V_{SET} 、 R_{SET} 、レーザーアノードバイアス電圧 (VLD) を慎重に選択することで、パルス振幅、タイミング、および全体的なパルス安定性を調整することができます。

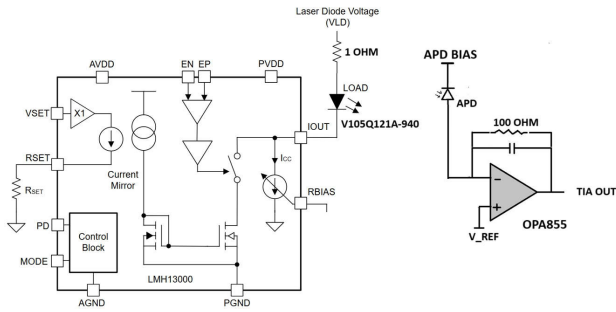


図3. レーザーダイオードによるLMH13000を使用した送信パスと、フォトダイオードによるOPA855を使用した受信パスの例

以下は、パルス電流および速度を設定するための設計手順です。

1. 目標出力電流 (I_{OUT}) を定義します。まず、レーザーダイオードに必要な光出力から始めます。式3は、レーザーのスロープ効率によって決まるピーク出力電流を表します。

$$I_{OUT} = \frac{P_{OPT}}{\eta} \quad (3)$$

ここで、 P_{OPT} は目的の光出力、 η はレーザーのスロープ効率 (W/A) です。たとえば、 $P_{OPT} = 1W$ 、 $\eta = 0.5W/A$ の場合、 $I_{OUT} = 2A$ となります。

LMH13000 は最大 5A のパルス電流をサポートしているため、選択するレーザーダイオードは、この制限値以下で目標の光電力を達成する必要があります。 I_{OUT} を正確に設定することは、 t_{pp} を最小化し、振幅起因のタイミング誤差を低減する上で極めて重要です。

2. R_{SET} および V_{SET} を選択します。LMH13000 は、 V_{SET} と R_{SET} の比を内部ゲイン係数 k でスケールリングすることで、出力電流を設定します (式4)。

$$I_{OUT} = \frac{V_{SET}}{R_{SET}} \times k \quad (4)$$

大電流モード時 (MODE = 1) は、 $k \approx 50k$ です。たとえば、 $R_{SET} = 20k\Omega$ 、 $V_{SET} = 0.8V$ の場合、

$$I_{OUT} = \frac{0.8}{20k} \times 50k \approx 2.0A$$

DAC で V_{SET} をトリミングすることで、微調整が可能です。LMH13000 はオンチップで電流を制御するため、この方法により、温度および電源変動に対する感度が最小限に抑えられ、 t_{pp} をタイミング バジェット内で小さく維持できます。

3. VLD を設定します。VLD は、レーザーの順方向電圧に加え、高速な電流遷移時に必要な動的電圧をサポートできるだけの十分な高さにする必要があります。LMH13000 のデータシートには、サイジングの指標として式5が示されています。

$$VLD = V_{OUT(MIN)} + V_F \times \frac{dI}{dt} + I_{OUT} \times (R_{LASER} + R_{DAMP}) \quad (5)$$

ここで

- V_{IOUT} は、 I_{OUT} における最小コンプライアンス電圧
- V_F は、 I_{OUT} におけるレーザーの順方向電圧
- L は、ループ全体のインダクタンス (パッケージおよび PCB を含む)
- dI/dt は、立ち上がり / 立ち下がりの要件から決まる電流スルーレート (A/s)
- R_{LASER} は、レーザーダイオードの動的抵抗
- R_{DAMP} は、レーザーダイオードの外部抵抗

たとえば、以下の条件の場合、

$$V_{IOUT(MIN)} = 6V$$

$$V_F = 2V$$

$$L = 3nH$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2A}{1ns} = 2 \times 10^9 A/s$$

$$R_{LASER} = 0.3\Omega$$

$$R_{DAMP} = 1\Omega$$

$$VLD \approx 6 + 2 + (3 \times 10^{-9})(2 \times 10^9) + 2(0.3 + 1.0) \approx 16.6V$$

したがって、初期値として 17V が適切です。VLD を大きくするとエッジ速度が向上しますが、オーバーシュートが増加する可能性があるため、慎重に調整する必要があります。適切な VLD の選択により、オーバーシュートを制限しながら高速な遷移を実現でき、全体的なタイミング変動

(t_{total}) バジェットに対する立ち上がり / 立ち下がり時間 ($t_{r/f}$) の寄与を直接低減できます。

- 立ち上がり / 立ち下がり時間とダンピングを最適化します。立ち上がり / 立ち下がり時間は、ドライバ能力と回路の寄生成分の両方によって決まります。適切なダンピングがないと、高速な電流パルスの遷移によってレーザーおよび PCB ループのリングングが励起され、オーバーシュートや不安定な光パルスの原因となります。設計者は通常、 I_{OUT} ノードにダンピング抵抗とスナバ回路を追加することで、この問題に対処できます。この抵抗とスナバを組み合わせることで、寄生リングングを抑制し、高速エッジを維持し、 $t_{r/f}$ が不必要に t_{total} を増加させることを防止できます。

スナバコンデンサは、式 6 で計算されたドライバの出力容量に基づいて選択します。

$$C_{SNUB} \approx 5 \times C_{IOUT} \quad (6)$$

ここで、 C_{IOUT} は I_{OUT} ピンの実効容量です。 $C_{IOUT} = 40\text{pF}$ の場合、 $C_{SNUB} \approx 200\text{pF}$ となります。

レーザー回路およびスナバ回路と直列に小さいダンピング抵抗を追加することで、不要な発振を抑制できます。図 4 に示すように、 R_{DAMP} および R_{SNUB} の標準値は $5\Omega \sim 10\Omega$ の範囲であり、スナバコンデンサは出力ノードの容量に合わせて決定します。 C_{SNUB} は、最悪条件 (最大) の C_{IOUT} に対して選定し、検証段階でオーバーシュートとエッジ速度のバランスが取れるようにトリミングします。図 5 に示すように、この手法により、高速遷移や PCB 寄生成分によるリングングを低減しつつ、正確なパルス制御に必要なサブ ナノ秒単位の $t_{r/f}$ を維持できます。

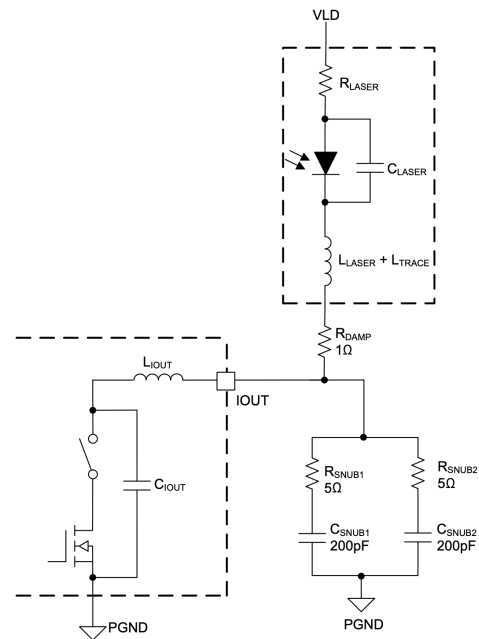


図 4. ダンピング抵抗とスナバ回路

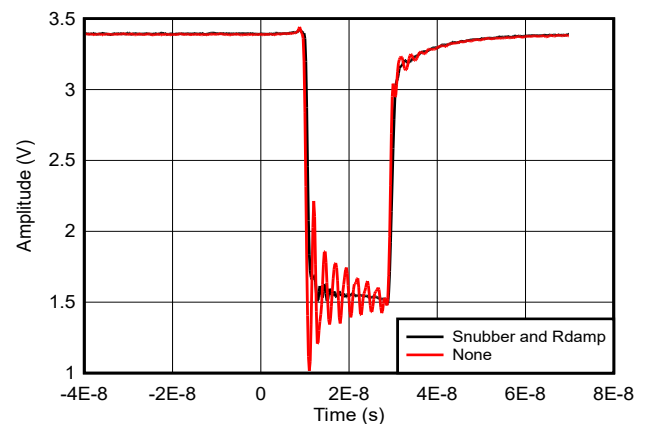


図 5. スナバ回路または R_{DAMP} の有無による LMH13000 のパルス

- 伝搬遅延を制御します。立ち上がり / 立ち下がり時間とは異なり、伝搬遅延は数式で定義されるものではなく、レイアウトやインターフェイスの手法に依存します。
 - 入力配線。EP ピンと EN ピンは 100Ω 終端を用いた差動配線とするか、インピーダンスの制御によるシングルエンド入力として配線し、LMH13000 の入力部で適切に終端します。
 - 出カーループ。大電流が流れる I_{OUT} ループを短くし、PGND と密結合させて、誘導性遅延やリングングを最小限に抑えます。

- システムのキャリブレーション。ドライバからレーザーに至る経路を ToF の測定バジェットに含め、残留するあらゆるシステム遅延を考慮します。

図 6 に示すように、パターンのインダクタンスを最小化し、一貫性のある入力終端を確保することで、 t_{pd} の変動が減少し、この要因による影響を小さくかつ予測可能な範囲に保つことができます。さらに高い精度が必要なアプリケーションや、温度ベースのキャリブレーションが現実的でない場合は、**LMH13000 データシート** の 6.3.2 セクションに、レーザー一段を直接監視することによる高精度なスタートパルス生成の手法が示されています。

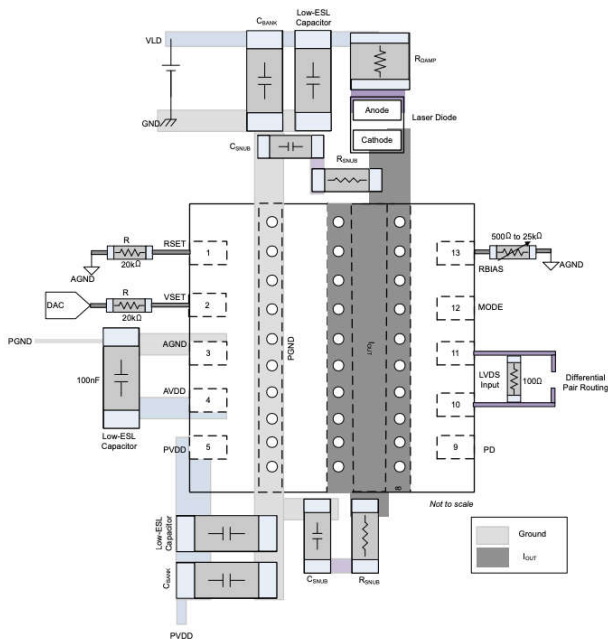


図 6. 表面実装デバイス パッケージにおける LMH13000 のレイアウト例

パルス システムにおける高精度パルス制御

LiDAR および ToF システムは通常パルス モードで動作し、長いオフ時間を挟んで大電流バーストを生成します。このモードでは、電流波形がすぐに安定し、各パルスで同じピーク値に達する必要があります。一般的なアプローチとしては、VLD 経路でレーザーのアノードをプリバイアスし、LMH13000 の低電圧差動信号伝送 (LVDS) 入力 (EP, EN) を使用してパルスをゲートします。これにより、 V_{SET} ピンで振幅を設定しつつ、LVDS 入力でタイミングを独立して制御できるようになります。

$R_{DAMP} = 2.6\Omega$ 、 $VLD = 12V$ 、 $I_{OUT} = 400mA$ (レーザー ダイオード: Osram の PLT5 518FB_P) の場合における、レーザーダイオードを使用した実験結果を図 7 に示します。図では、青はイネーブル、黄はスタートパルス、オレンジは V_{ANODE} を示します。振幅とタイミングをデカップリングすることで、パルス間のドリフトが最小化され、高速エッジが維持されるため、振幅の安定性 (t_{pp}) とエッジの一貫性 ($t_{r/f}$) が向上し、 t_{total} がさらに低減されます。

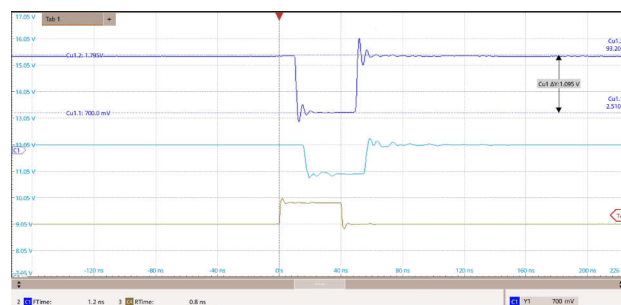


図 7. パルス モードにおける高精度パルス制御

トランスミッタのテスト結果を用いた実践的な例

表 1 に示す LiDAR トランスミッタ条件で LMH13000 をテストすることで、設計原理の妥当性を検証します。

| 設計パラメータ | 値 |
|--------------------|--|
| ダイオード | V105Q121A-940 |
| アナログ VDD および電源 VDD | 5V |
| モード | 1 |
| パルス電流 | ピーク 2A |
| パルス幅 | 0.6ns, 0.7ns |
| R_{SET} | 20k Ω |
| V_{SET} | 0.5V (DAC で設定) |
| VLD | 4.5V、5V、6.5V |
| ダンピング回路 | $R_{DAMP} = 1\Omega$ $R_{SNUB} = N/A$ $C_{SNUB} = N/A$ (スナバなし) |

表 1. LMH13000 パルスドライバの設計パラメータ例

図 3 はテスト設定を示し、レーザーにバイアスを印加し、LMH13000 を構成するために使用する回路図を示しています。

図 8 は、パルス動作時における異なる VLD バイアス電圧での LMH13000 の光応答を示しています。この過渡波形は、

立ち上がり時間、オーバーシュート、定常状態の電流制御に対して VLD がどのように直接影響を及ぼすかを示しています。VLD を小さくするとエッジ遷移が遅くなります。一方で、VLD を高くすると速度は向上しますが、オーバーシュートが増加する可能性があります。適切な VLD を選択することで、 $t_{r/f}$ とパルス安定性のバランスを取り、全体的な変動バジェットへの寄与を最小限に抑えます。

この設計は、注意深くバイアスとダンピングを行うことで、オーバーシュートを最小限に抑えた高速かつ安定した光パルスが得られ、再現性の高い性能を実現できることを示しています。変動バジェットに基づき、この設計では $t_{r/f} < 1\text{ns}$ 、 t_{pd} の変動 $< 50\text{ps}$ 、 $t_{pp} < 2\%$ を達成しています。これらの結果を組み合わせることで、 t_{total} は 1ns を十分に下回り、ミリメートルレベルの距離精度を実現できます。また、温度センサを組み込んで遅延ドリフトと振幅のシフトをリアルタイムで補償することにより、環境起因による変動バジェットへの寄与をさらに低減することが可能です。

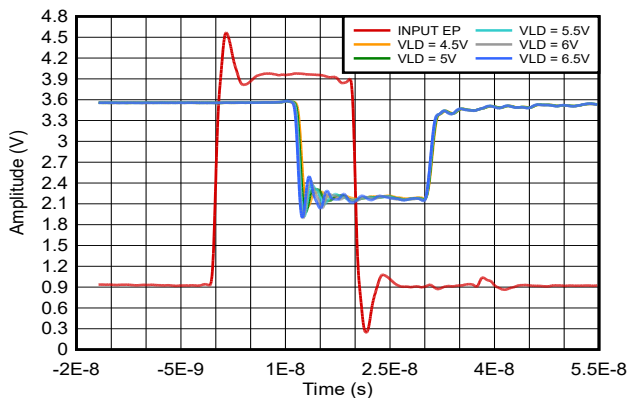


図 8. 4.5、5、5.5、6、6.5 VLD バイアス電圧における光応答

まとめ

高精度のレーザーパルス制御を実現するには、エッジ速度、タイミング精度、安定性、光出力の一貫性のバランスを取る必要があります。高速電流駆動とレギュレーションをコンパクトなソリューションに統合することで、LMH13000 は設計の複雑さを低減するとともに、再現性と性能を向上させます。

重要なお知らせ:ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

単純な帰還と温度監視手法を組み合わせることで、このレーザードライバは、連続およびパルスの両方のレーザー動作に対して信頼性の高いプラットフォームを提供し、要求の厳しい LiDAR、ToF、産業用光センシング アプリケーションにおいて、安定かつ高精度な性能を実現します。

その他の資料

- アプリケーション ブリーフ『[LMH13000 を使用したレーザーダイオードの自動電力制御](#)』をご覧ください。
- ホワイト ペーパー『[車載用 LiDAR の概要](#)』をご覧ください。
- 『[LMH13000 の TINA-TI™ ソフトウェア Spice モデル](#)』をダウンロードしてください。

著者について

Leaphar Castro は、テキサス インスツルメンツのプロダクトマーケティング エンジニアで、高速アンプ製品を専門とし、産業オートメーションを含むさまざまな産業市場をサポートしています。2016 年にセントラル フロリダ大学で電気工学の学士号を取得しています。Leaphar は、TI のテクニカル ラダーにおけるメンバー グループ テクニカル スタッフです。

Anant Sinha は、テキサス インスツルメンツの高速アンプ製品を担当するアプリケーション エンジニアです。ジャダブプル大学で計測および電子工学の学士号を取得しています。

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むいかなる保証も、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、

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](#) 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