

# 為光達與 ToF 系統實現奈秒級精密雷射脈衝控制

Leaphar Castro

Member Group Technical Staff

Anant Sinha

Application Engineer, High-Speed Amplifiers

## 簡介

隨著自動駕駛車輛、工業自動化與先進機器人日益普及，對可靠 3D 測距與感測的需求也與日俱增。光達與飛時測距 (ToF) 系統仰賴精準控制的雷射脈衝來測量距離和空間資訊。為了滿足這些需求，雷射驅動器必須提供高峯值電流，並在溫度變化與元件老化過程中維持脈衝間的穩定性。無論是用於導航還是高速工業檢測，這些系統都依賴能在實際條件下，提供快速、穩定及可重複的雷射脈衝。使用閘極驅動器、外部場效電晶體及電流感測元件的傳統離散式拓撲結構，可滿足特定設計需求；然而，它們通常會在佈局複雜度、校準難度及熱性能方面引起取捨。

## 為什麼雷射脈衝控制具有挑戰性？

雷射驅動器不只提供電流，還會直接影響光達和 ToF 系統用於計算距離的時序資訊。考量一個由多個來源組成的簡化時序變化預算，在本文中，有三個影響因素：

- 上升和下降時間 ( $t_{r/f}$ )：脈衝通過檢測閾值的速度。
- 傳播延遲 ( $t_{pd}$ )：從觸發器到實際光發射所需的時間。
- 脈衝間的變化 ( $t_{pp}$ )：脈衝間在時序或振幅上的漂移程度。

## 升降時間的影響

光達與 ToF 系統透過發射雷射脈衝至目標，並接收其返回訊號，藉由計算雷射往返時間來測量目標距離。分辨微小距離變化的能力，取決於脈衝邊緣在無光 and 全光之間轉換的速度。更快的升降時間可降低距離測量的不確定性，並為接收器提供更明確的參考點。在高解析度系統中，升降時間通常介於 1ns 至 5ns。

當脈衝邊緣較慢時，系統無法確定訊號穿越接收器偵測閾值的確切時刻。因此，當  $t_{r/f}$  為 1ns 時，會產生約 150mm 的距離誤差，其關係可近似表示為：**方程式 1**

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

其中  $\Delta D$  為距離變化量， $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

前述不確定性會隨著脈衝邊緣變慢而增加，而脈衝邊緣的速度會受到寄生效應的限制，例如封裝與印刷電路板 (PCB) 電感，以及雷射二極體與驅動器輸出的電容。例如，將  $t_{r/f}$  從 500ps 增加到 1ns 可使距離加倍，而 2ns 的邊緣則可將其擴展至近 300mm，進而限制了系統分辨小於  $\Delta D$  的目標距離差異的能力。

## 傳播延遲

在高速光學系統中，每一奈秒都非常重要。如果傳播延遲隨溫度、供應電壓或元件公差而變動，則會改變用於距離計算的時序參考基準，也可能中斷通道間同步。在直接 ToF 應用 (dToF) 中，根據**方程式 2**中所示的 ToF 關係， $t_{pd}$  若產生 100ps 的變動，約等同於 30mm 的距離誤差：

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

其中， $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ， $D$  為距離， $t$  為時間。

任何過多延遲都會直接轉換為測距誤差。如**圖 1**中所示，500ps 的變動可能導致超過 150mm 的往返距離誤差，對於目標達到這公分級或毫米級精度的 dToF 系統而言是不可接受的。

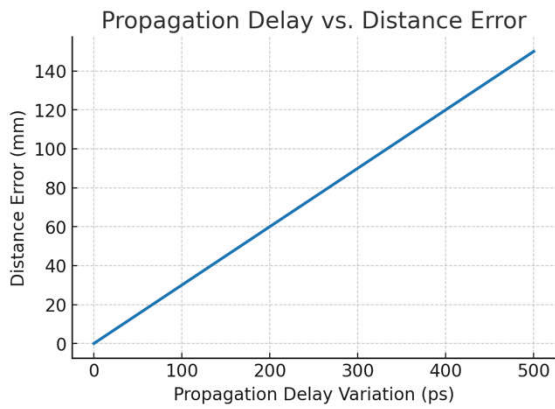


圖 1. 傳播延遲與距離誤差 (預估)

雖然可以在系統校準期間校準固定延遲，但自我加熱等可變延遲，則會引入量測與量測之間的不確定性，這種不確定性並不容易校準。

### 脈衝間的穩定性

即使是快速、脈寬狹窄的雷射脈衝，也必須在每個脈衝之間保持一致。峰值電流的變化會直接轉化為光學功率的變化，進而降低測量準確度與系統可靠性。溫度偏移、電源波動與裝置老化是這種漂移的常見原因。

從系統角度來看，接收器仰賴傳回的光學訊號來判斷距離。因此，脈衝強度的差異可能會被誤解為距離變化，特別是在長距離情況下，傳回訊號接近檢測閾值時更是如此。在基於閾值的測距系統中，峰值電流變動 1%，會導致光學功率變動約 1%，進而可能產生數十公分的距離誤差。如圖 2 中所示，即使是 ±2% 到 ±5% 的微小振幅變化，也會改變脈衝包絡與每個脈衝所傳遞的光能，從而降低測距精度與長期可重複性。因此，高性能設計會嚴格控制驅動電流，在所有運作條件下將  $t_{pp}$  變化維持在幾個百分點以內。

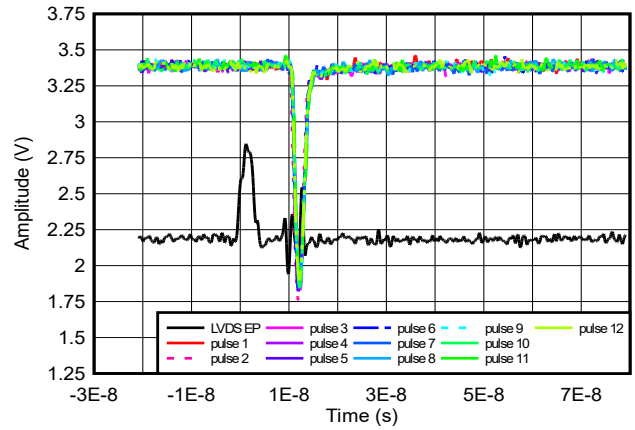


圖 2. 12 個脈衝、1.5A 電流條件下之脈衝間振幅 ( $R_{damp} = 1\Omega$ ，兩組  $5\Omega$  電阻與  $330pF$  電容之減震器網路， $AVDD = PVDD = VLD = 5V$ )

透過定義系統級時序限制，下一步是將其轉化為實際雷射驅動器實作。

### 實作精密雷射脈衝控制

產生精準的雷射脈衝不僅僅是將電流導入雷射二極體而已。驅動器必須具有快速邊緣，可預測延遲和可重複脈衝振幅來提供高峰值電流。TI 的 LMH13000 高速雷射驅動器透過將  $V_{SET}$  接腳的輸入電壓轉換為  $I_{OUT}$  端受精確調節的汲極電流來生成脈衝，如方程式 3 所述。數位類比轉換器 (DAC) 或參考電壓源來設定  $V_{SET}$ ，而裝置的內部電流鏡像和控制電路則會調節流經雷射二極體電流，如圖 3 中所示。謹慎選擇  $V_{SET}$ ， $R_{SET}$  與雷射陽極偏壓 (VLD)，設計人員可以調整脈衝振幅、時序與整體脈衝穩定性。

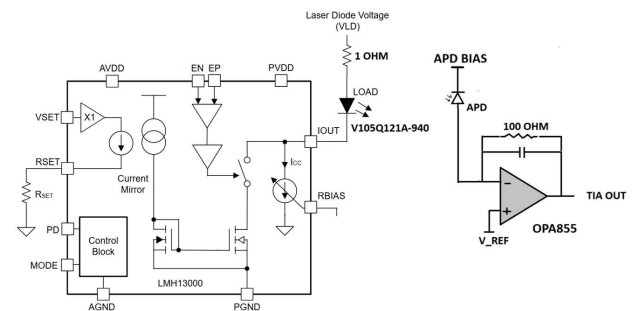


圖 3. 具二極體與 LMH13000 的傳送路徑電路方塊圖

以下是設定脈衝電流與速度的設計步驟。

1. 定義目標輸出電流 ( $I_{OUT}$ )。從雷射二極體所需的光功率開始。方程式 3 表示由雷射斜率效率設定的峰值輸出電流：

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

其中， $P_{OPT}$  是所需的光學輸出功率， $\eta$  則為雷射的斜率效率（單位為 W/A）。例如，若  $P_{OPT} = 1W$ ，且  $\eta = 0.5W$ ，則  $I_{OUT} = 2A$ 。

由於 LMH13000 支援最高 5A 的脈衝電流，因此所選雷射二極體必須達到或低於此限制的目標光學功率。準確設定  $I_{OUT}$  對於最小化  $t_{pp}$  和減少振幅驅動的時序誤差非常重要。

2. 選擇  $R_{SET}$  與  $V_{SET}$ 。LMH13000 使用  $V_{SET}$  與  $R_{SET}$  之比率，並乘以內部增益係數  $k$  來設定輸出電流 (方程式 4)：

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

在高電流模式 (MODE = 1) 下， $k \approx 50k$ 。例如，當  $R_{SET} = 20k\Omega$ ，且  $V_{SET} = 0.8V$  時：

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

可以透過 DAC 微調  $V_{SET}$  進行精細調整。由於 LMH13000 在晶片內部進行電流調節，因此，此方法可將對溫度和電源變化的靈敏度降至最低，有助於在時序預算內維持較小的  $t_{pp}$ 。

3. 設定 VLD。VLD 必須足夠高，以支援雷射二極體的順向電壓，以及在快速電流轉換期間所需的動態電壓。LMH13000 產品規格表提供方程式 5 作為設計參考準則：

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

其中：

- $V_{IOUT}$  是  $I_{OUT}$  的最小合規電壓
- $V_F$  是雷射在  $I_{OUT}$  下的順向電壓
- $L$  為總迴路電感（封裝與 PCB）
- $dI/dt$  是來自上升和下降要求的電流電壓轉換速率（單位：安培/秒）
- $R_{LASER}$  是雷射二極體的動態電阻

- $R_{DAMP}$  是雷射二極體的外部電阻

例如，假設條件如下：

$$V_{IOUT(\text{最小值})} = 6V$$

$$V_F = 2V$$

$$L = 3nH$$

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

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

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

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

因此，起始值為 17V 是合適的。提高 VLD 可加快邊緣速度，但同時也會增加過衝，因此需要謹慎調整。適當選擇 VLD 可確保快速轉換的同時限制過衝，直接減少升降時間 ( $t_{r/f}$ ) 對整體總時序變化 ( $t_{total}$ ) 預算的影響。

4. 將升降時間和阻尼最佳化。升降時間同時受到驅動能力與電路寄生效應的限制。若未加入適當阻尼，快速電流脈衝轉換可能會激發雷射和 PCB 迴路中的振鈴，進而造成過衝和不穩定的光學脈衝。設計人員通常會在  $I_{OUT}$  節點增加阻尼電阻器和減震器網路來解決此問題。電阻器和減震器可共同抑制寄生振鈴，保持快速邊緣，並防止  $t_{r/f}$  不必要地增加  $t_{total}$ 。

依據驅動器的輸出電容選擇減震電容器，計算公式如方程式 6：

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

其中  $C_{IOUT}$  是  $I_{OUT}$  接腳的有效電容。若  $C_{IOUT} = 40pF$ ，則  $C_{SNUB} \approx 200pF$ 。

加入小型阻尼電阻器，與雷射和減震器網路串聯，可抑制不必要的振盪。如圖 4 中所示， $R_{DAMP}$  和  $R_{SNUB}$  的典型值在  $5\Omega$  至  $10\Omega$  範圍內，而減震電容器尺寸則適合輸出節點電容。為最差（最高）的  $C_{IOUT}$  選擇  $C_{SNUB}$ ，在驗證期間微調，以平衡過衝與邊緣速度。如圖 5 所示，此方法可減少快速轉換和 PCB 寄生的振鈴，同時維持精準脈衝控制所需的次奈秒  $t_{r/f}$ 。

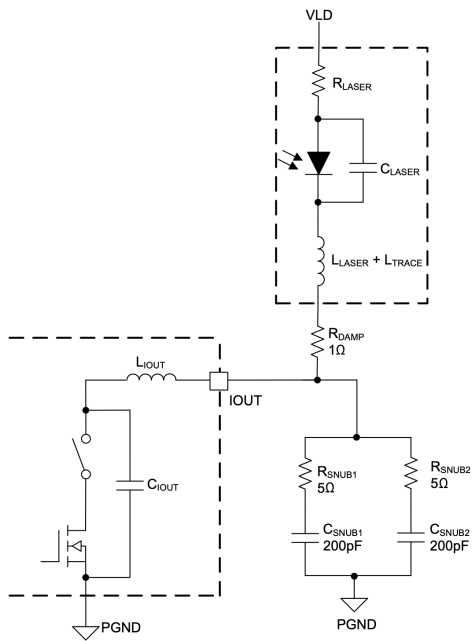


圖 4. 阻尼電阻器與減震器網路電路

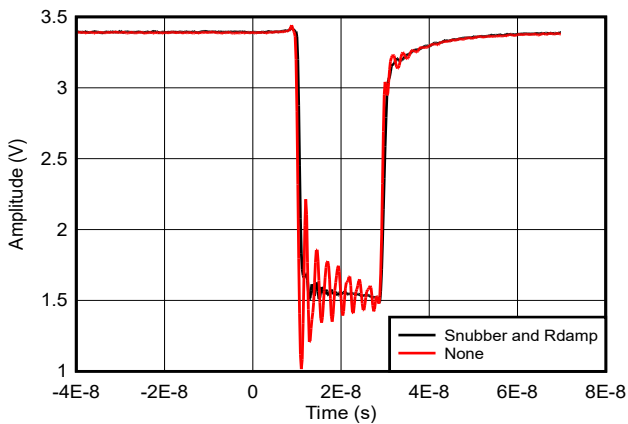


圖 5. 有或無減震器電路或  $R_{DAMP}$  之 LMH13000 脈衝比較

5. 控制傳播延遲。與升降時間不同，傳播延遲不是由公式定義，而是取決於以下佈線圖和介面實務：

- 輸入走線。對具有 100Ω 終端的 EP 接腳和 EN 接腳使用差動走線，或者使用受控阻抗的單端走線，並在 LMH13000 的輸入端進行適當端接。
- 輸出迴路。保持高電流  $I_{OUT}$  迴路短路並與 PGND 緊密耦合，以將電感延遲與振鈴降至最低。
- 系統校準。將驅動器雷射路徑納入 ToF 測量預算，以考量系統中殘留的延遲。

如圖 6 中所示，最小化走線電感並確保輸入端接一致，可減少  $t_{pd}$  的變化，使其影響維持在較小且可預期的範圍內。對於需要更高準確度，或不適合以溫度為基礎進行校準的應用，LMH13000 產品規格表的 6.3.2 章節提供了一種透過直接監控雷射階段產生高精度啟動脈衝的技術。

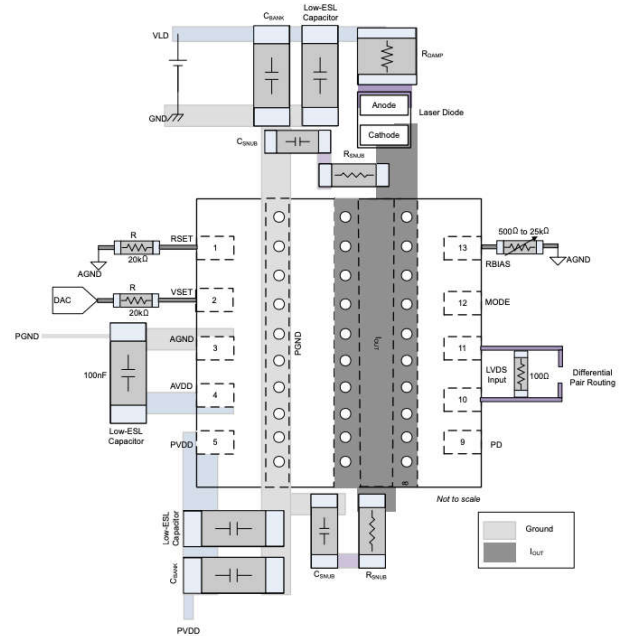


圖 6. LMH13000 表面黏著裝置封裝之佈局範例

### 在脈衝系統中的精準脈衝控制

Lidar 和 ToF 系統通常以脈衝模式運作，在長時間的關斷間隔之間產生高電流脈衝。在此模式下，電流波形必須快速穩定，並在每個脈衝上達到相同的峰值。常見的方法是透過 VLD 預偏壓雷射陽極，並使用 LMH13000 的低電壓差動訊號 (LVDS) 輸入 (EP、EN) 來進行閘極脈衝。這可讓  $V_{SET}$  接腳設定振幅，而 LVDS 輸入則獨立控制時序。

當  $R_{DAMP} = 2.6\Omega$ ， $VLD = 12V$ ，且  $I_{OUT} = 400mA$  (雷射二極體：Osram 的 PLT5 518FB\_P) 時，圖 7 顯示了雷射二極體的實驗室結果。在圖中，藍色表示啟用，黃色表示啟動脈衝，橙色表示  $V_{ANODE}$ 。將振幅與時序去耦合，可最大限度地減少脈衝間的漂移，並維持快速邊緣，從而提高振幅穩定性 ( $t_{pp}$ ) 與邊緣一致性 ( $t_{r/f}$ )，進一步降低  $t_{Total}$ 。

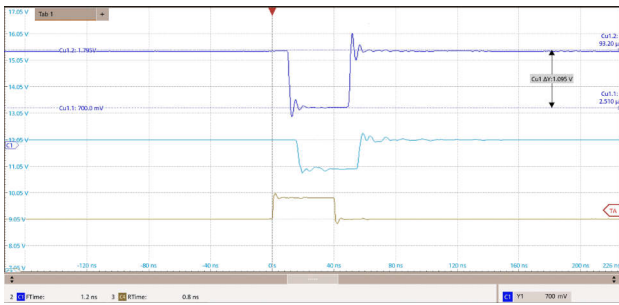


圖 7. 在脈衝模式下的精準脈衝控制

### 雷射發射器測試結果之實例

在表 1 中所示的光達發射器條件下測試 LMH13000，可驗證設計原理。

設計參數	值
二極體	V105Q121A-940
類比 VDD 和功率 VDD	5V
模式	1
脈衝電流	峰值電流達 2A
脈衝寬度	0.6ns, 0.7ns
R <sub>SET</sub>	20kΩ
V <sub>SET</sub>	0.5V (由 DAC 設定)
VLD	4.5V、5V、6.5V
阻尼網路	R <sub>DAMP</sub> = 1Ω R <sub>SNUB</sub> = N/A C <sub>SNUB</sub> = N/A (無減震器)

表 1. LMH13000 脈衝驅動器範例的設計參數

圖 3 顯示測試設定，其中展示了用於偏壓雷射和配置 LMH13000 的電路圖。

圖 8 顯示脈衝操作期間，LMH13000 在不同 VLD 偏壓電壓下的光學反應。暫態波形說明 VLD 如何直接影響上升時間、過衝及穩態電流調節。較低的 VLD 會導致較慢的邊緣轉換，而較高的 VLD 雖可提高速度，但可能會增加過衝。因此，選擇適當的 VLD 可平衡  $t_{r/f}$  和脈衝穩定性，以最大程度地降低其對總體變化預算的影響。

此設計展示了透過精確偏壓和阻尼，可產生快速穩定的光學脈衝，並將過衝和可重複性能降至最低。根據變化預算，此設計可達  $t_{r/f} < 1ns$ ， $t_{pd}$  變化  $< 50ps$ ，且  $t_{pp} < 2%$ 。綜合這些結果， $t_{total}$  遠低於 1ns，進而實現毫米等級的距離精密度。透過整合溫度感測器，可即時補償延遲漂移與振幅偏移，進一步減少環境因素對變化預算的影響。

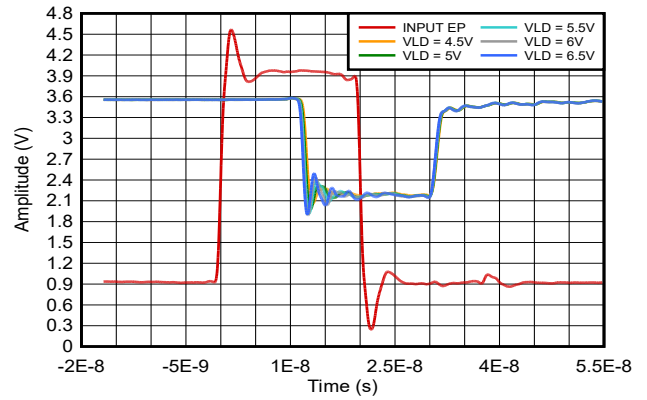


圖 8. 在 VLD 偏壓為 4.5、5、5.5、6 及 6.5 時的光學響應

### 結論

精確的雷射脈衝控制需要在邊緣速度、時序準確度、穩定性與光功率一致性之間取得平衡。LMH13000 將高速電流驅動與穩壓整合在精巧的解決方案中，降低設計複雜度，同時提升重複性和性能。

結合簡易回饋和溫度監控技術，此雷射驅動器可為連續與脈衝雷射運作提供可靠的平台，進而在要求嚴苛的光達、ToF 和工業光學感測應用中，實現可靠精準的性能。

### 其他資源

- 參閱應用簡介《[使用 LMH13000 的雷射二極體自動功率控制](#)》。
- 參閱白皮書《[汽車光達簡介](#)》。
- 下載 [LMH13000 TINA-TI™ 軟體 Spice 模型](#)。

## 作者簡介

Leaphar Castro 是德州儀器的產品行銷工程師，專門從事高速運算放大器產品，並支援各種工業市場，包括工業自動化。他 2016 年於佛羅里達大學取得電子工程學士學位。Leaphar 是 TI 技術階梯的集團技術人員。

Anant Sinha 是德州儀器高速運算放大器產品的應用工程師。他於賈達普大學獲得儀器與電子工程學士學位。

**重要聲明：**本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025